



中国光储直柔建筑战略发 展路径研究

子课题 4：中国光储直柔建筑中直流关 键技术体系研究

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

(严建海, 南京国臣直流配电科技有限公司 研发工程师, 主要研究方向为电力电子与直流微电网, 近年来主持了交流电压暂降保护器、数据中心高压直流系统等项目的研制工作, 完成国家电网公司科技项目 3 项, 多次参与 CIREN 和 IEEE 的国际学术会议, 在国内外核心期刊及会议上发表论文 20 余篇, 授权专利 20 余项。(邮箱: 15212191592@163.com))

ABOUT THE AUTHORS

(Jianhai Yan, R&D engineer of Nanjing Golden Cooperate DC Power Distribution Technology Co., Ltd. His main research direction is power electronics and DC microgrid. In recent years, he has presided over the research and development of AC voltage sag protectors, data center high-voltage DC systems, etc. He has completed 3 scientific and technological projects of the State Grid Corporation of China, participated in CIREN and IEEE international academic conferences for many times, published more than 20 papers in core journals and conferences at home and abroad, and authorized more than 20 patents. (Email: 15212191592@163.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

在“近零能耗建筑”实践过程中，光伏发电无疑成为建筑电力供应的重要手段。传统的光伏发电均采用交流方案，然而随着大量的分布式光伏并网，低压电网的电能质量问题（谐波、不平衡）逐渐显现，导致电网公司对光伏并网做出了严格限制。光储直柔直流系统采用“自发自用，集中并网”的设计运行方式，不仅实现了分布式光伏的有效利用，还极大程度上解决了低压电网的电能质量问题，为规模化推进分布式光伏的发展提供了良好的技术支撑。与交流系统最大的区别在于分布式电源及负荷均通过直流接入，由于处于研究推广阶段，系统中的设备、控制、保护等均未形成系统性的技术方案和标准。针对上述现状，本课题在现有技术的基础上，从实际应用的角度，对建筑光储直柔系统主要技术进行梳理，并就其中部分关键技术展开实用化研究，形成不同场景下的光储直柔系统方案。

本课题的主要研究内容包括以下几个方面：

（1）建筑光储直柔系统的源荷特性及优化控制策略

分析了建筑光储直柔系统内关键设备的现状和特性，包括电源、变换器、直流负荷、储能设备以及开关设备等。针对光储直柔内源荷特性，考虑到建筑用电本身特点，对建筑光储直柔系统进行了控制策略的研究，分析了分层控制策略和电压带控制策略，并研究了系统的具体运行模式。

（2）建筑光储直柔系统的系统保护与用电安全

考虑到当前直流系统在实际应用中的各类故障问题，首先分析了系统的故障类型和主要特征，包括变换器故障和电缆线路故障等。根据不同故障类型的特点，提出了响应的保护要求并分析了系统不同保护方案的类型。其次，在上述研究的基础上，提出了系统级保护策略，并根据保护策略给出了实际的保护配置方案举例。最后，在具体的保护产品研发方面，研究相应的数字化保护设备，并对成本低、体积小、易于推广的直流灭弧及绝缘检测方法进行研究，实现了直流负荷的无电弧操作以及直流支路多类型漏电流的快速保护，促进直流系统在建筑中的推广应用。

（3）建筑光储直柔系统内关键设备选型开发及直流负荷设计

针对市场光储直柔产品缺乏的现状，分析建筑光储直柔系统内电能变换需求，结合理论分析与实验测量，形成系统内变换装置的选型或开发方案，并对

常规负荷进行直流化设计或改造。形成了包括电力电子变换设备（柔性双向变换器、整流设备、各类 DC/DC 等）、保护测控装置（母线保护、交直流线路一体化保护、支路保护）、系统监控管理平台以及多类型直流负荷等关键设备，满足了光储直柔系统的推广应用需求。

（4）不同场景下建筑光储直柔系统的方案设计

对不同场景下建筑光储直柔系统的电压等级、接地方式等进行研究，并设计合理的系统运行模式。具体形成了包括商业场景、住宅场景以及工业场景等不同类型的设计方案，并对方案系统结构、电压等级选取、核心装置以及运行模式等进行了选取配置。

在前述研究的基础上，从拓扑结构选取、接地和接线方式以及容量配置等方面，给出了不同方式的特点对比和选取原则或建议。项目研究内容可为实现能源生产、消费、技术和体制改革提供重要的实践参考，对于新兴产业的发展，实现能源科技和装备水平的全面提升等方面都具有重要的理论和现实意义。对于双碳目标的实现，具有一定的促进作用。

Executive Summary

In the practice process of "near-zero energy consumption building", photovoltaic power generation has undoubtedly become an important means of building power supply. The traditional photovoltaic power generation adopts the AC scheme. However, with a large number of distributed photovoltaics connected to the grid, the power quality problems (harmonics, unbalance) of the low-voltage power grid have gradually emerged, resulting in strict restrictions on the photovoltaic grid connection by the power grid company. The PEDF system adopts the design and operation mode of "self-generated and self-used, centralized grid-connected", which not only realizes the effective utilization of distributed photovoltaics, but also solves the power quality problem of low-voltage power grids to a great extent, and promotes distributed photovoltaics on a large scale. The development of photovoltaics provides a good technical support. The biggest difference from the AC system is that the distributed power and loads are connected through DC. Due to the research and promotion stage, the equipment, control, and protection in the system have not formed systematic technical solutions and standards. In view of the above situation and on the basis of the existing technology, this subject sorts out the main technologies of the building PEDF system, and conducts practical research on some of the key technologies to form PEDF solutions for different scenarios from the perspective of practical application.

The main research contents of this topic include the following aspects:

(1) Source load characteristics and optimal control strategy

The status and characteristics of key equipment in the PEDF building are analyzed, including power supply, converters, DC loads, energy storage equipment and switchgear. Aiming at the characteristics of the internal source charge of the PEDF system, and considering the characteristics of building electricity consumption, the control strategy is studied, the layered control strategy and the voltage band control strategy are analyzed, and the specific operation modes of the system are studied.

(2) System protection and power safety

Considering the various fault problems of the current DC system in practical applications, the fault types and main characteristics of the system are firstly analyzed, including converter faults and cable line faults. According to the characteristics of different fault types, the corresponding protection requirements are put forward and the types of different protection schemes of the system are analyzed. Secondly, based on the above research, a system-level protection strategy is proposed, and an example of the actual protection configuration scheme is given according to the protection strategy.

Finally, in the development of specific protection products, the corresponding digital protection equipment is studied, and the DC arc extinguishing and insulation detection methods with low cost, small size, and easy promotion are studied, and the arc-free operation of DC loads and the DC branch are realized. The rapid protection of multiple types of leakage currents promotes the popularization and application of DC systems in buildings.

(3) Selection and development of key equipment and design of DC loads

Aiming at promoting the current situation of the lack of PEDF products in the market, the electric energy conversion requirements in the building PEDF system is analyzed. Combining theoretical analysis and experimental measurement, the selection or development plan of the conversion device in the system is formed, and DC design for conventional loads or retrofit is carried out. Power electronic conversion equipment (flexible bidirectional converter, rectifier equipment, various types of DC/DC, etc.), protection measurement and control devices (busbar protection, integrated protection of AC and DC lines, branch protection, etc.), system monitoring and management platform and multi-type DC loads and other key equipment are formed to meet the needs of the promotion and application of the PEDF system.

(4) Scheme design of different scenes

The voltage level and grounding method of the building PEDF system in different scenarios are studied, and a reasonable system operation mode is designed. Specifically, different types of design schemes including commercial scenarios, residential scenarios and industrial scenarios have been formed, and the system structure, voltage level selection, core devices and operation modes of the scheme have been selected and configured.

On the basis of the aforementioned research, from the aspects of topology selection, grounding and wiring methods, and capacity configuration, the characteristics comparison and selection principles or suggestions of different methods are given. The research contents of the project can provide important practical reference for the realization of energy production, consumption, technology and system reform, and have important theoretical and practical significance for the development of emerging industries and the overall improvement of energy technology and equipment level. It has a certain role in promoting the realization of the carbon neutralization and carbon peak target.

目 录

1	研究背景及意义	1
2	建筑光储直柔关键技术发展概述	3
2.1	建筑光储直柔系统的源荷特性及优化控制策略	3
2.2	建筑光储直柔系统的系统保护与用电安全	5
2.3	建筑光储直柔系统内关键设备及直流负荷	8
2.4	不同场景下的建筑直流系统	15
3	建筑光储直柔系统的源荷特性及优化控制策略	21
3.1	建筑光储直柔系统的源荷特性	21
3.2	建筑光储直柔系统的优化控制策略	28
3.3	光储直柔系统运行模式	35
4	建筑光储直柔系统的系统保护与用电安全	38
4.1	光储直柔系统故障特点及保护要求	38
4.2	光储直柔系统保护类型	40
4.3	系统保护策略	41
5	建筑光储直柔系统内关键设备选型开发及直流负荷设计	44
5.1	电力电子变换设备	44
5.2	保护测控装置	52
5.3	系统监控管理平台	60
5.4	直流负荷	65
6	不同场景下建筑光储直柔系统的方案设计	73
6.1	商业办公	73
6.2	居民住宅	77
6.3	工业场景	80
6.4	方案设计建议	81
7	总结与展望	84

1 研究背景及意义

光储直柔系统是在直流配电网的基础上，融合了光伏、储能、直流配电系统和柔性用电负荷，其核心目的是实现建筑刚性负载柔性化，增加建筑灵活调节能力，强化电力系统“荷随源动”的负荷响应调控。建筑作为城市电力消费的主体，肩负“节能降碳”的历史重任。发展光储直柔建筑，不仅可以促进自身节能、提高建筑用能体验，还可有效缓解城市电网负荷峰值、电网增容和可靠性提升等压力。此外，光储直柔建筑配备分布式能源、储能和需求响应等技术，实现用能的灵活性调节，减小建筑对外的能源需求，同时削峰填谷平滑负荷曲线，增强设备的运行能效，延缓甚至避免配电基础设施的升级改造。发展光储直柔建筑，构建“荷随源动”的调控模式，减小了大规模可再生能源接入导致的峰谷差，很大程度上解决电网灵活调节能力下降和发电水平下降的问题，符合电网的未来发展方向。在电网逐渐增加的扩容成本的当下，光储直柔技术的发展展现出它更经济的特性。在建筑侧配备分布式光伏电源和储能，利用直流微电网接入简单、调控灵活的优势，能够有效地提升用电的可靠性，并且配合峰谷电价、需求响应等激励政策，还能够降低用户的用电成本。

国外对直流配电网的拓扑结构研究起步较早。美国弗吉尼亚理工大学 CPES (Center for Power Electronics Systems) 提出一种未来家庭直流配电系统；美国北卡罗来纳大学提出了 The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) 系统结构，用于构建未来自动灵活的配电网；韩国成均馆大学和三星电子公司面向家庭应用提出一种低压直流配电网方案，并进行了应用试验；日本大阪大学提出 $\pm 170\text{V}$ 双极直流母线供电方案，并通过电力电子设备进行电能形式转换和升降压以满足负荷需求；日本大阪大学的 Kakigano H. 等从人体安全和设备安全角度论证了民用住宅低压直流配电系统的电压等级，提出了 400V 的直流配电电压；意大利米兰理工大学于 2004 年提出了一种与大阪大学的双极结构类似的直流配电系统结构。国内方面，国家电网公司、各大高校、电气设备供应商都积极开展了对直流配电网的研究。国家电网有限公司及中国电力企业联合会根据现有研究成果，组织各方面专家给出了不同应用场景下直流配电网的典型电网结构，对工程建设中电网结构的选择具有借鉴意义；浙江大学对直流配电网的特点、优势及其网络的整体概念进

行了较为详细地综述，提出了直流配电网的拓扑结构——环状、放射状与两端配电。

但整体而言，当前光储直柔技术仍处于起步阶段，缺乏统一设计规范标准，相关的设备配套亦不成熟，缺少不同应用场景、商业模式下的适应性评价体系，以及亟需发展节能低碳的运行调控技术。要想实现工程大规模的推广运行，需要更广泛的、跨学科的研究和大量的实践经验积累和产业链的。据此，从光储直柔建筑的优化设计、设备配套、运行调控、安全防护等四个方面，开展光储直柔系统的源荷特性及优化控制策略研究、建筑光储直柔系统的系统保护与用电安全研究、建筑光储直柔系统内关键设备选型开发及直流负荷设计、不同场景下建筑光储直柔系统的方案设计的研究工作。

2 建筑光储直柔关键技术发展概述

低碳建筑“光储直柔”系统的推广应用与其技术发展水平密切相关，其拓扑结构设计方法、设备及控制策略发展水平关系到光储直柔系统从设计到运行的实施；另外，光储直柔系统中的柔性应用强调与电网侧的互动作用，因此与电网的互动模式成为其关键点所在。以下就低碳建筑的光储直柔系统的拓扑结构设计、设备协同互动、运行调控策略、与电网交互模式及示范应用等五个方面的研究水平进行介绍。

2.1 建筑光储直柔系统的源荷特性及优化控制策略

建筑负荷柔性化可以促进建筑自身的节能和经济用电，效缓解城市电网负荷峰值，针对未来建筑领域将有大量分布式储能、充电桩以及空调等设备接入电网，有必要对现有设备的功率变换特点、控制策略等进行分析研究，为进一步提高现有负荷柔性化程度具有重要意义。

在电动汽车充电桩能量变换方面：目前国内外电动汽车充电桩的功率变换部分一般采用两级变换方式，即 AC/DC+DC/DC，前级 AC/DC 较为成熟的拓扑是三相 PFC VIENNA，后级 DC/DC 拓扑一般根据电平不同分为两电平变换方式和三电平变换方式。整流器作为电动汽车充电桩重要部分，受到国内外广泛关注研究。例如基于自抗扰控制算法的电压型 PWM 整流器，增强了 EVCP 充电时的抗干扰能力，然而整流器消耗来自电网的恒定功率，在电网参量变化较大时只能“切负荷”运行，不能主动响应电网需求。采用负荷侧虚拟同步机技术的充电桩具备惯量模拟、有功调整、无功支撑等能力，能够满足电动汽车有序并网、安全充换电的实际需求。基于 LVSM 的三相电压型 PWM 整流器控制策略，在电网参量变化时，可使负荷从“切负荷”变为“降功率”运行，提升了整流器故障穿越能力。将虚拟同步机技术应用在充电桩中，通过变换器的自主降额运行，则可实现了对弱电网的支撑作用。

在分布式储能能量交换方面：储能装置能实现动态调节和稳定母线电压目的，因此，需在母线和蓄电池、超级电容等储能装置间使用高效大功率、快响应双向变换器跨接。目前国内外主要在直流变换器拓扑和控制策略方面开展理论研究，但均用以提高功率密度和效率。由于高频变压器的存在，隔离型双向

DC/DC 变换器还具有体积较大，设计成本高，设计过程复杂目前大多分布式储能系统中采用非隔离型双向 DC/DC 变换器。分布式储能功率单元控制策略有下垂控制法、主从设置法、平均电流均流法、最大电流均流法等，均可实现对各模块输出电流的控制。自适应动态下垂控制通过在不同的工作状态下动态调节下垂系数的大小，改善系统在受到功率波动时的动态响应速度。而传统下垂控制中的下垂系数固定，使得储能模块间的充放电功率比值不变，鉴于各储能模块的 SOC 存在差异，长期以相同的输出功率比值运行，会导致储能模块因过充或过放而退出运行，影响直流微电网运行的稳定性。

在建筑用电设备能量交换技术方面，建筑内部用电设备能耗在社会总耗电量中占比大，并有持续增加的趋势，其中空调负荷、电热水器等柔性负荷在建筑楼宇中占据了重要地位。目前过国内外大多采用控制制冷\热温度的方式，利用集中式控制通过设立中心控制单元，实时处理汇总所有的信息后由调控中心直接向每个负荷发布调控命令，实现空调等负荷降功率运行，以加热、通风和空调以及热水器等恒温控制负荷为例，常通过以下 2 种方式实现：1) 切换开、关状态速率和比值；2) 改变设定温度。但该方式功率调节响应时间较长，在紧急功率调节需求下效果不明显。

综上所述，目前分布式储能、充电桩、建筑用电设备内部功率变换器及控制策略的种类众多，存在功率调节响应时间、交互通信方式以及功能用途等方面存在诸多差异，所对应的互动响应需求也不一样，需要进一步根据换流拓扑类型、控制方式、响应时间以及功能用途对不同类型负荷进行分类研究，在此基础上，充分挖掘各类负荷柔性化潜力，有针对性开展负荷柔性功率调节接口定制化装备样机研究。

随着多种类型直流负荷的应用，直流配电系统呈现多电压等级的特点，多个电压等级的直流母线的互联实现了电压匹配和功率交换，更好的满足用户需求。直流配电系统中集成了分布式电源、储能、并网逆变器、以及各类负荷，考虑分布式电源的间歇性、波动性，系统的稳定运行与各供电的协调控制密切相关。

针对多电压等级直流母线的直流配电系统，国内外学者均开展了不同电压等级的直流配用电控制理论研究，提出多种协调控制策略，可分为集中式与分散式两类。美国弗吉尼亚理工大学构建的直流混合配电网分层控制架构，为直

流配电过渡性发展从控制上提供了可实施方案。集中式控制策略，将上层管理系统需要与各模块单元保持联系，确定其工作模式与出力大小，从而维持系统的功率平衡，实现最优运行；但集中式控制策略对通信的依赖程度较高，系统的稳定性、可靠性完全依赖于该控制单元，该单元一旦出现故障，将有可能导致直流系统崩溃。因此，分散式控制策略应运而生，系统中各模块单元根据直流母线电压信号(DC bus voltage signal, DBS)调整工作模式，共同维持直流母线稳定，控制简单，但是系统级控制中的大部分目标均无法通过基于 DBS 的直流系统协调控制方法来实现，储能单元缺乏有效管理，无法实现储能单元的最优充放电控制，更无法实现直流微电网全局的最优经济运行。另外，直流母线电压波动范围较大、无法实现最优运行。为了解决这个问题，基于互联通信的直流系统分层运行控制策略将分散式控制与上层管理相结合，在不同时间尺度上分别实现设备级控制和系统级控制，完成电气量控制、电能质量调节以及经济运行控制，旨在实现直流微电网控制系统的标准化、可扩展性以及提高直流系统整体运行性能，极大提升了系统的可靠性与经济性。同时，适用于中低压直流配电系统的分散式统一控制策略结合 DBS 的分散式控制策略与直流变压器的统一控制策略，也可实现系统的全局功率平衡。

目前，直流配电系统的协调控制策略主要针对单一母线结构的直流配电网，对于多个电压等级的直流配电系统的运行模式多样，切换流程复杂，对协调控制策略提出了更高的要求。同时，直流负荷类型多样化也阻碍了自适应协调控制的研究。因此，对多直流母线的光储直柔系统的统一的自适应协调控制策略亟待研究，对不同类型负荷的自适应调节亟待解决。

2.2 建筑光储直柔系统的系统保护与用电安全

保护的完善是直流系统安全稳定运行的必要条件之一，国内外专家学者一直关注和研究直流系统的各类保护，直流系统的保护自上世纪九十年代得到了较为快速的发展。

(1) 短路保护

目前对于短路保护主要采取断路器和熔断器解决。直流断路器的主要作用是改变直流系统的运行方式，用来清除直流侧出现的故障，实现直流系统的保护。早在 1994 年，Komastu 就已指出，通过使用真空断路器和混合固态真空灭弧室，在较短的时间内断开故障电流；2005 年，Meyer 等人探讨通过外部谐振

电路和混合固态方法，为电弧电流提供一个旁路通道或者熄灭电弧的方法；2007 年，针对传统的、低成本的断路器无法用在较高电压等级直流系统的问题，Krstic 等人提出伸展、分裂的方法，但考虑到直流断路器受电缆的电感、电阻限制和直流电压水平以及线间电容的影响，电弧具有不稳定性与暂态特性复杂。

2002 年，西安交通大学电气工程学院赵登福、董继民、王东等对直流系统短路故障的快速识别与短路保护进行研究，提出了利用霍尔传感器测量直流系统回路电流、母线电压，以电流、电压综合判据快速识别直流系统短路故障的方法。采用可控直流断路器替代传统的熔断器法，将交流系统三段式微机电流保护原理应用于直流系统的短路保护，设计了辐射式 I、II、III 段直流供电回路，同时为防止在切除故障支路时因 II、III 段开关同时拒动，而由 I 段开关切除故障引起的其他供电支路电源消失问题，对 III 段直流供电回路采用了备用开关自投方案，并研制了直流系统三段式微机电流保护装置。天津大学副教授薛士敏指出采用保护、控制集成方案可以降低保护系统的复杂性，降低系统成本，也可大大减少保护动作时间，是未来直流系统保护技术的发展方向之一。2014 年，为了克服熔断器和直流断路器的缺点，结合变换器中全控型电力电子器件 IGBT 可快速关断的特点，国网电科院提出了基于电力电子技术的主动式短路保护，保护时间和效果都优于传统的断路器。ABB、上海良信、常熟开关、人民电器等企业均研发了相应的直流断路器产品，用来保护线路及电源设备免受过载、欠电压、短路等的危害。但该产品存在保护功能单一且无数字化功能的问题，不能满足多场景需求。

（2）接地保护

直流系统是不接地系统，整个网络的直流电压偏移量是同一个，因此，定位接地故障是一个比较棘手的问题。Karlsson 针对直流不接地系统，利用在换流器节点安装电流测量装置实现接地故障检测，该方案可同时在直流和交流两侧对接地故障进行检测，对短路故障也起到一定的保护作用。采用这种检测方案，需要故障线路两端之间进行通信。

早在 80 年代初，我国就已开始了对直流系统绝缘自动监测仪器的开发研制，到了 80 年代末 90 年代初，随着葛洲坝、三峡水利发电工程的进展以及我国内陆火力发电厂规模的发展，研制出一套寻检速度快、检测精度高的直流系统绝缘监测仪器越来越成为我国电力事业发展的迫切需要。在 1988 年，按

电力部下达的科研项目要求，长江水利委员会与武汉市琴台电子研制所合作研制成功“WZJ-4 型微机直流系统绝缘监测仪”，并通过技术鉴定，在当时填补了国内该领域的技术空白。近年来，该所也对监测仪器进行过多次技术改进。目前国内专业从事直流系统绝缘监测仪器开发生产的公司不多，主要有武汉市琴台电器有限公司、北京思达星电力自动化有限公司、浙江星炬电力电子有限公司、大连旅顺电力电子有限公司等厂家。但就产品总体性能而言，我国现有直流绝缘监测仪器的实际现场监测效果不甚理想，主要存在以下一些问题：仪器的检测精度低，尤其在干扰严重的工业现场检测精度很难达到仪器技术参数所规定的精度要求；仪器的寻检速度慢，在一些挂接负载较多的直流系统，仪器对全部支路寻检所需时间过长；仪器电路结构复杂，成本高。

在直流系统绝缘监测研究领域，国内科研人员对检测方法进行了广泛深入的探索，取得了一些成果，有些方法已经在电力系统和通信系统的绝缘监测中得到了应用，有些方法还有待于进一步的试验和完善。从国内目前的研究现状来看，主要有以下几种方法：平衡电阻法、低频探测法、变频探测法、霍尔磁式平衡法、振荡频率探测法、相位差磁调制检测法等。对于接地和绝缘下降采取如下措施：查看绝缘监察装置报警信号，瞬时停电查找接地点；直流熔丝、空开的上下级配合，定期进行蓄电池组核对性放电试验；在微弱信号处理方法上，采用正交矢量锁相放大的方法；在信号处理电路设计方面，采用了多路并行处理模式；对变频信号法进行改进，提出采样交流信号波形后，进行频谱分析以计算接地电阻来判断故障支路。但投入应用的直流系统接地故障监测装置只能发出接地故障告警信号，无法及时、全面隔离或切除接地故障，此方面的研究仍存在不足，有待进一步改进与完善。

（3）交直流窜入

交直流窜入故障是近年来才受到特别的关注的问题。目前行业内的绝缘监测系统具备基本的母线和支路绝缘下降监测功能，但普遍不具备交流窜入监测、蓄电池接地监测等，而且母线与支路之间不隔离，任何支路发生故障都可能引起其他支路保护不正确动作，所以目前的监测和保护装置无法满足直流电源系统安全运行的要求。

除了上述故障类型保护以外，光储直柔系统中也存在一些直流系统所具备的安全隐患，如灭弧问题、剩余电流保护问题等。

在直流灭弧问题上，与交流系统相比，直流系统最显著的特点是不存在电流过零点。因此，在直流系统发生电弧故障的情况下，高温等离子弧放电很容易发展和维持。根据电流路径，电弧放电可分为并联电弧和串联电弧两种。并联电弧通常是由电线或老化设备的介质击穿引起的短路引起的。如果电气连接松动或由于断线，耦合器，插座和插头等原因导致负载和电源断开，则会产生串联电弧。在两个铜或青铜电极之间产生的电弧放电伴随着强光和巨大的热量。电弧产生时，通过流过诸如空气或气体的介质的电流来维持两个导电电极之间的导电性。由于非熟练电气用户即使在常规环境中操作也可能发生串联电弧，因此应制定适当的措施，例如抑制或灭弧，以保护人员或财产免受电弧故障的影响。除了常用的物理灭弧方法以外，在灭弧产品方面，天水二一三电器集团有限集团提出一种提高直流接触器灭弧能力的灭弧系统方案和有效缩小产品体积的设计方案；广西大学王巨丰等人提出一种自能式多断口灭弧装置，可在 3ms 内时间内全概率熄灭直流电弧，并阻断电弧重燃。

直流剩余电流保护方面，Siemens、Doepke 等公司最早展开 B 型剩余电流检测装置的研制，之后 ABB、Sehneider 等代表企业相继推出带平滑直流检测功能的 B 型产品；美国国家电气规范（national electrical code, NEC）第 690.11 号文件提出了直流母线大于 80V 的光伏并网系统要配备故障电弧检测装置和断路器，以解决光伏直流电弧故障导致的安全问题；西班牙加泰罗尼亚理工大学提出基于通信的直流配电系统保护方案；英国思克莱德大学在低压直流环网中应用电流差动保护实现故障隔离。国内方面，常熟开关，正泰电器等典型企业已经陆续推出 B 型漏电保护产品。该类 B 型剩余电流保护装置虽然可以实现直流剩余电流保护，但其价格较高，不易推广。

综上所述，无论是直流灭弧还是直流漏电保护，集约化，模块化、小型化都将是电力工程直流电源设备未来的发展方向。

2.3 建筑光储直柔系统内关键设备及直流负荷

光储直柔系统示意如图 2-1 所示：

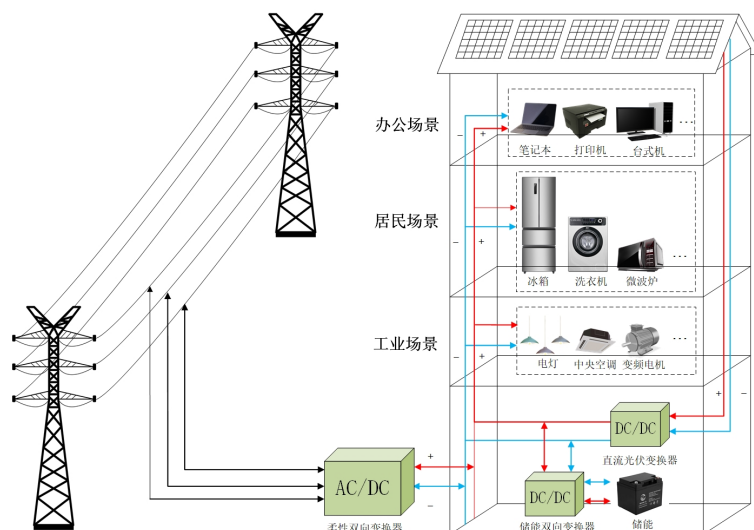


图 2-1 光储直柔系统示意

可见，光储直柔系统本质上属于低压直流配电网，其中包含的主要元素基本可以分为以下几类：

2.3.1 电源

常见的电源有光伏、风电等新能源发电，也可以是交流电网（AC/DC 转换）及其他各种应急电源等。对于多数市内建筑而言，风机不适合与建筑结合，交流电网是常规配电电源，此处不再赘述。重点介绍光伏电源。当前的光伏电源主要是太阳能电池，主要包括以下几类：

1) 单晶硅太阳能电池

单晶硅太阳能电池的光电转换效率为 15%左右，最高的达到 24%，这是目前所有种类的太阳能电池中光电转换效率最高的，但制作成本很大，以至于它还不能被大量广泛和普遍地使用。由于单晶硅一般采用钢化玻璃以及防水树脂进行封装，因此其坚固耐用，使用寿命一般可达 15 年，最高可达 25 年。

2) 多晶硅太阳能电池

多晶硅太阳电池的制作工艺与单晶硅太阳电池差不多，但是多晶硅太阳能电池的光电转换效率则要降低不少，其光电转换效率约 12%左右（2004 年 7 月 1 日日本夏普上市效率为 14.8%的世界最高效率多晶硅太阳能电池）。从制作成本上来讲，比单晶硅太阳能电池要便宜一些，材料制造简便，节约电耗，总的生产成本较低，因此得到大量发展。此外，多晶硅太阳能电池的使用寿命也要比单晶硅太阳能电池短。从性能价格比来讲，单晶硅太阳能电池还略好。

3) 非晶硅太阳能电池

非晶硅太阳电池是 1976 年出现的新型薄膜式太阳电池，它与单晶硅和多晶硅太阳电池的制作方法完全不同，工艺过程大大简化，硅材料消耗很少，电耗更低，它的主要优点是在弱光条件也能发电。但非晶硅太阳电池存在的主要问题是光电转换效率偏低，国际先进水平为 10%左右，且不够稳定，随着时间的延长，其转换效率衰减。

4) 多元化合物太阳电池

多元化合物太阳电池指不是用单一元素半导体材料制成的太阳电池。各国研究的品种繁多，大多数尚未工业化生产，主要有以下几种：a) 硫化镉太阳电池 b) 砷化镓太阳电池 c) 铜铟硒太阳电池（新型多元带隙梯度 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ 薄膜太阳电池）

太阳能电池目前和建筑结合主要有两种形式，结合式光伏建筑（Building-Attached Photovoltaic，以下简称 BAPV）和集成式光伏建筑（Building-Integrated Photovoltaic，以下简称 BIPV）。BAPV 采用简单的支撑系统将太阳能光伏组件固定在建筑物外表面，从而形成发电系统，这使得分布式光伏发电系统的拆卸和维护简单易行，而且不会削弱或破坏建筑物的各项功能。BIPV 通过设计和施工安装将光伏发电组件集成到建筑物上，使分布式光伏发电系统和建筑物的安全防护、节能等功能有机融合，从而提升建筑物的使用性能和绿色指标，具体见图 2-2。

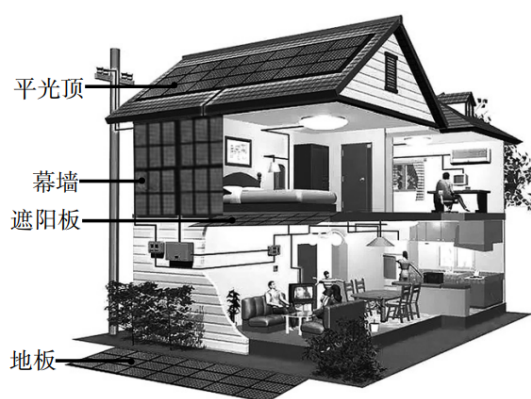


图 2-2 典型 BIPV 建筑体系

除具备发电功能外，BIPV 还具有抗风压性能、水密性能、气密性能、隔音性能、保温和遮阳性能等建筑外围护所必需的性能和独特的装饰功能，达到建

筑围护、建筑节能、太阳能利用和建筑装饰多种功能的完美结合。其优越性主要表现为：

表 2-1 BIPV 优越性

序号	优点介绍
1	光伏打点是无污染的绿色可再生资源，能够减少一般化石燃料发电带来的环境污染，有利于环境保护；
2	光伏阵列一般安装在屋顶和墙面上，直接洗手太阳能，避免墙面温度和屋顶温度过高，降低空调负荷，改善室内环境；
3	原地发电，原地使用，减少电力输送产生的损耗；
4	由于日照处于高压电网用电高峰期，BIPV 系统除保证自身简主任用电外，还可以向电网供电，从而舒缓高峰电力需求，解决电网峰谷供需矛盾，具有极大的社会效益；
5	可以有效利用维护结构表面（屋顶和墙面），无需额外用地或加建其他设施，这对于土地昂贵的城市建设尤为重要；
6	维护保养简单，维护费用低，运行可靠性、稳定性好；
7	大尺度新型彩色光伏模块节约了昂贵的外装饰材料，使建筑物更加美观。

分布光伏建筑主要包括光伏幕墙和光伏采光顶两大关键部分。光伏幕墙是将分布式光伏发电组件与玻璃幕墙相结合，在满足建筑工程装饰功能的基础上，提升建筑的发电能力。设计时，需科学调整幕墙的角度，以提高光伏发电的效果。光伏采光顶是实现分布式光伏发电在建筑工程中高效利用的关键部分。采用光伏采光顶可克服光伏幕墙受日照角度影响的局限性，保证最大限度地利用日照时间，提高光伏发电的能力和效率。此外，还可遮阳板、底板等部位采用光伏组件，具体见表 2-2。

表 2-2 典型 BIPV 形式

BIPV 形式		光伏组件	光伏类型	应用场景
光伏幕墙	采光顶	光伏玻璃	集成	建筑采光顶
	光伏屋顶	光伏屋面瓦		建筑屋顶
	透明	光伏透光玻璃	集成	建筑外层幕墙
	非透明	光伏玻璃（普通）	集成	建筑外层幕墙
遮阳板	采光	光伏遮光板（透光）	集成	建筑遮阳板
	不采光	光伏遮光板（非透光）	集成	建筑遮阳板
光伏地板		光伏石板	集成	庭院石板路

而 BAPV 主要应用于屋顶，通过支架等将普通光伏组件固定在彩钢瓦或者水泥屋顶上。是将组件固定（外挂）在现有建材之外，需要先有屋顶，再铺组件，通常已有建筑上装的光伏都为 BAPV，如图 2-3 所示。BAPV 的巨大的痛点来自于通常安装之前认为它不会漏水，但是安装了光伏之后可能就会漏水。因为传统

工业级的 BAPV 用支架和厂房屋顶的镀铝锌钢板之间，一个是铝合金的材料，一个是镀铝锌的材料，它们会天然的发生变化学的反应，加速它的老化，加速它的腐蚀，可能就会产生非常多的漏水点，这个隐患是不得不考虑的。如果是业主的厂房不需要有那么多的防水的要求，那么传统的 BAPV 还可以进行一定的安装，尤其是可能也不会坚持那么久的厂房。但是如果是高质量发展的企业，非常关心自己的厂房漏水，防火抗风阶，甚至于有更多的一些绿电需求的企业，可能更多的要去考虑 BIPV 的一些解决方案。现在光伏企业都在往产品化方向走，进而实现规模化。而建筑与其他的产品不同，它是定制化的，建筑老板一般不倾向于建一个和旁边建筑一模一样的建筑。但是光伏又希望一个产品可以适应不同的建筑。这就是建筑的定制化和光伏规模化之间的矛盾。



图 2-3 典型的 BAPV 示意

光伏在房屋建筑中的应用不仅是单独地在屋顶或公共设施上安装光伏组件，而且光伏与建筑的深度融合，兼顾设计、安全、节能、美观等问题。分布光伏建筑将太阳能发电与建筑相结合，使得未来的建筑实现电力自给，是未来建筑建设的主要发展方向之一。

2.3.2 变换器

变换器是直流配电网中的核心设备，承载着电能形式的变换功能，把不同形式、不同电压等级的元件联系成真正的直流配电网络。按照电能转换形式，变换器可分为交流-直流、直流-直流型变换器；按照电能传递方向，变换器可分为单向变换器、双向变换器；按照电气隔离特性，变换器可分为隔离型、非隔离型变换器；按照直流侧极性，变换器又可分为单极性变换器、双极性变换

器。

光储直柔系统中的变换器按变换类型主要分为 AC/DC 变换器、DC/DC 变换器两大类。按功能类型分为光伏变换器、储能变换器、升降压变换器、整流变换器、逆变器以及双向整流-逆变器等。

目前市场上的光伏变换器以光伏逆变器为主，例如华为推出的智能光伏控制器和阳光电源的光伏逆变器，输入直流，输出交流，均具备 MPPT 功能，如图 2-4 所示；光伏 DC/DC 变换器仅限于为小功率负荷直接供电的电源模块，例如爱浦电力推出的太阳能 DC/DC 模块电源，输入为 300-1200VDC，输出为 5、12、15、24VDC，但其不具备 MPPT 功能。



图 2-4 华为光伏逆变器

储能变换器 PCS（储能变流器，英译：Power Conversion System）可控制蓄电池的充电和放电过程，进行交直流的变换，在无电网情况下可以直接为交流负荷供电。PCS 由 DC/AC 双向变流器、控制单元等构成。华为、阳光电源等厂家均开发了相应的储能变流器。图 2-5 所示为阳光电源的储能变流器，直流侧电压等级 800-1500V，三相并网。



图 2-5 阳光电源储能变流器

整流变换器类型较多，配电系统中出于成本考虑，常采用整流变压器实现电网整流，整流变压器内单方向的脉动电流经滤波装置变为直流电。典型的整

流变压器的外形如图 2-6 所示。充电桩电源、储能充电机等多采用全控型开关器件，如麦格米特的整流电源以及石家庄通合的整流充电机等。

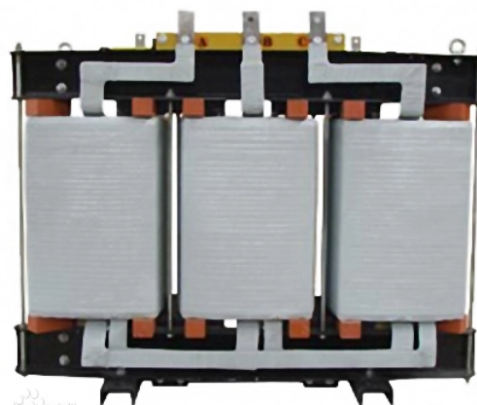


图 2-6 典型的整流变压器

双向整流-逆变器主要有三种主要应用。在混合动力电动汽车(HEV)或电动汽车(EV)中，车内将有车载充电器为汽车蓄电池充电。充电电源从电网流向车辆，也称为 G2V；在一些新的 HEV 或 EV 设计中，要求车辆允许从电池回流到电网(也称为 V2G)；或在孤岛状态下向交流设备供电，具有 V2G 要求的 HEV 或 EV 需要大功率双向 AC-DC 电源作为其车载充电器。深圳市拓沃得科技有限公司的双向整流-逆变器如图 2-7 所示。



图 2-7 双向整流-逆变器

2.3.3 直流负荷

同交流网一样，直流负荷是电能传递的终点。直流负荷形式也比较复杂多样，如大功率的充电桩、空调、计算机群等负荷，也有小功率的照明等电器设备。日本夏普公司在 2007 和 2008 年的日本电子展中两次展示了该公司开发的

“直流生态住宅”技术和产品；日本 TDK 公司在 2008 年也在展览会中展示了该公司的“全直流生态住宅”技术和产品；在 2009 年日本电子展中，夏普、TDK 和日本松下公司分别展示了各自开发的住宅直流技术和相关产品；松下电工公司在 2010 年开始批量销售交直流混合供电的住宅配电产品。

广东白色家电产学研创新联盟于 2009 年 7 月成立了直流家电技术工作组，2018 年 1 月 18 日，深圳市建筑科学研究院股份有限公司与清华大学、住房和城乡建设部科技与产业化发展中心、住房和城乡建设部标准定额研究所、深圳市供电局有限公司、珠海格力电器股份有限公司、南京国臣信息自动化技术有限公司、深圳桑达国际电源科技有限公司、北京交通大学、北京四方继保自动化有限公司、厦门大学、兴业太阳能等十七家中外科研机构、企业代表聚集在深圳国际低碳城，共同发起成立直流建筑联盟，为直流技术的产业化推进做准备。

2.3.4 储能设备

储能设备是一种比较特殊的设备，它既可工作组负荷状态，又可以工作在电源状态。目前市场上主要的储能类型包括物理储能和电化学储能。根据能量转换方式的不同可以将储能分为物理储能、电化学储能和其他储能方式：1) 物理储能包括抽水蓄能、压缩空气蓄能和飞轮储能等，其中抽水蓄能容量大、度电成本低，是目前物理蓄能中应用最多的储能方式。2) 电化学储能是近年来发展迅速的储能类型，主要包括锂离子电池储能、铅蓄电池储能和液流电池储能；其中锂离子电池具有循环特性好、响应速度快的特点，是目前电化学储能中主要的储能方式。3) 其他储能方式包括超导储能和超级电容器储能等，目前因制造成本较高等原因应用较少，仅建设有示范性工程。

2.3.5 开关设备

直流开关一直是直流配电系统关注的重点。由于直流电弧没有过零点，因此开关必须具有较强的灭弧能力。目前在中压侧已经有采用电力电子器件和机械结构的混合式开关问世，但价格仍偏高没法大规模商业推广。直流低压侧目前以塑壳式空气断路器为主，其开断能力达数十千安，断开速度在 10ms 左右，能够满足实际使用，但无法满足系统主保护的需求。

2.4 不同场景下的建筑直流系统

我国的分布光伏建筑也已经获得了广泛的应用。根据建筑物的分类和屋顶的具体情况，分布式光伏发电有以下几种使用场景：

(1) 工业厂房。工业厂房具有屋顶面积大、平整开阔的特点，可充分利用屋顶空间安装分布式光伏发电系统，减少工业生产的电能计费，降低工业生产的用电成本支出，有效缓解工业用电的紧张局面。

(2) 商业建筑。商业建筑多为钢筋混凝土屋顶，有利于安装光伏阵列。商业大厦、写字楼等建筑用户的用电负荷特性一般表现为白天较高、夜间较低，这能够较好地匹配光伏发电特性。但是，商业建筑的外观设计要求较高，在建筑设计阶段应同步考虑光伏发电系统的布置位置及安装方式。

(3) 公共建筑。学校宿舍等公共建筑具有明显的分时用电特征，因此白天可利用分布式光伏发电并进行储能，晚上利用储能进行供电。

(4) 通信基站用电。偏远山区的通信基站一般较为分散，用电负荷较小，且供电线路铺设环境较差，易产生供电不稳定。分布式光伏发电能够有效地提高通信基站用电的可靠性。

首都机场采用铝合金支架将光伏板固定在屋面，且光伏板与屋面之间形成架空层，保证光伏组件在发电的同时还能起到屋面隔热层的作用。此外，为了解决电动车辆充电问题，首都机场新建了一批集光伏、储能、充电和停车为一体的充电车棚。具体方案见图 2-8。但是，已有光伏建筑大都只考虑了分布光伏的发电能力，尚未将电能存储、配电及柔性调节进行一体化考虑。



(a) 光伏板屋面



(b) 光伏充电车棚

图 2-8 首都机场光伏设备

“光储直柔”的出现，为解决建筑结构与分布光伏发电的一体化问题提出了新思路。“光储直柔”是在建筑领域应用太阳能光伏（Photovoltaic）、储能（Energy storage）、直流配电（Direct current）和柔性交互

（Flexibility）四项技术的简称。其中“光”和“储”分别指分布式电源和储能会越来越多地应用于建筑场景，作为建筑配用电系统重要组成部分；“直”

指建筑配用电网的形式发生改变，从传统的中低压交流配电网改为采用中低压直流配电网；“柔”则是指建筑用电设备应具备可中断、可调节的能力，使建筑用电需求从刚性转变为柔性。

近几年，国内外陆续开展了直流建筑示范工程建设。国内外实际运行的直流建筑项目电压等级多在 DC350V~400V。国内外的示范工程主要集中在直流建筑、数据中心、数据中心、海岛供电等低压、小范围等特点特定供电场景，但系统结构各不相同，供电可靠性等方面有所差异。

从系统结构上而言，博恩霍尔姆岛工程、日本仙台工程、巨次岛工程、深圳未来大厦等均采用辐射形结构，在母线故障情况下会极大影响供电情况。博恩霍尔姆岛的供电系统由传统能源和可再生能源发电组成，交流系统分为 60、10、0.4kV 这 3 个电压等级。该直流系统内部分别通过专用母线连接 60kW 的光伏系统、192kWh 的电池储能系统 BESS (Battery Energy Storage System)、2kW 的风力涡轮机和 50kW 的电动汽车快速充电器，并通过一个三相 30kW 的直流变换器与外部 400V 交流电网进行电能交换。ESS 可通过不同数量的蓄电池组串联输出不同等级的直流电压，省略了不同电压等级互联时的直流变压器设备，但由于目前蓄电池组占地范围大且造价较高，实际上并未减少系统的占地面积，不利于家用或商业推广，且 BESS 的投切对开关的要求较高，增加了系统成本；日本电报电话株式会社仙台工程 (NTT) 在日本仙台市启动了日本首个直流配电系统的示范工程^[40]，该工程采用两极三线制母线结，交流侧电压为 400V，直流侧母线电压为 430V，ESS 和光伏电池通过 DC/DC 变换器与直流母线相连，再经过 DC/DC 变换器连接 300V 直流母线，可直接向数据中心的高压直流输电服务器供电。负荷单元电压等级为 48V，由 300V 直流母线通过 5kW DC/DC 变换器供电。该工程在 300V 直流系统安装了带有保险丝和塑壳开关的配电装置 PDU (Power Distribution Unit)，对负荷的电力分配可以在互联状态和孤岛运行状态之间无缝接续；深圳未来大厦交直流混合配用电项目整体架构设计遵循简单、灵活的原则，力求通过最简洁的架构达到分布式能源灵活接入、灵活调度和安全供电的目的。系统架构采用正负双极直流母线形式，实现了建筑内 1 个配电等级提供 2 种电压等级的灵活配电方式，相应的电压等级在高压侧采用极间电压 DC750V，中压采用 DC±375V。充电桩、空调机组等大功率设备接入 DC750V 母线，DC±375V 母线负责建筑内电力传输，楼层内采用 DC+375V 或 DC-375V 单极

供电，并且针对建筑室内用电安全要求高的特点，在人员活动区域采用了 DC48V 特低安全电压，以保障直流配电系统的安全性。

FREEDM 工程和 City of Tomorrow 工程则采用环状供电，供电可靠性较高。2011 年，美国北卡大学站在对船舰直流配电系统进行分析与研究的基础上，提出未来可再生能源传输管理 FREEDM (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management) 系统，采用 12kV 交流作为系统母线，实现交直流配电和即插即用功能。FREEDM 系统包含 3 个关键技术：(1) 即插即用接口。系统含 1 个 400V 直流和 1 个 120V 交流总线接口，可以实现含分布式发电和 ESS 交直流系统的并网。(2) 智能能量管理 IEM (Intelligent Energy Management) 装置。系统的 12kV 母线通过 3 个 IEM 装置分别连接 69kV 外部电网、120V 交流系统和 400V 直流系统，在电压转换和交直流变换的基础上实现能量控制，并具有局部电源管理功能，例如低压交流和直流电压的调节、电网侧电压暂降穿越、负荷侧故障电流限制等。(3) 标准操作系统 DGI。该系统嵌入 IEM 设备中，利用通信网络协调系统管理与其他能源路由器。此外，FREEDM 系统安装了智能故障管理 IFM (Intelligent Fault Management) 设备以隔离电路中的潜在故障，从而提高用户侧的故障恢复能力和电能质量；德国亚琛工业大学提出 City of Tomorrow 城市供电方案，并在亚琛工业大学内建造了 $\pm 5\text{kV}$ 直流配电示范工程，城市配电系统采用中压直流环网供电，通过大功率 AC/DC 换流器 DC/DC 变换器进行电能转换与传输。中压直流配电系统由外部 20kV 交流变电站供电，经 AC/DC 变换后为亚琛工业大学新校区的几个大功率试验台提供电能，总功率为 15.5MW。该直流配电系统采用电缆双极环网方式供电，每台试验装置通过 DC/DC 变换器或 DC/AC 换流器连接到直流母线上。其中，双向 AC/DC 换流器连接直流配电系统和外部交流系统，在正常工作时以整流方式为直流配电系统供电，必要时反转潮流方向，以逆变模式运行为外部交流系统供电。国内，南京国臣在办公楼内构建了建筑光储直柔系统，采用辐射式 IT 不接地拓扑和 DC600V+DC220V 两级配电方案，为办公楼内多类型直流负荷供电；深圳宝龙工业城设计了柔性直流配电工程设计方案，采用双电源手拉手式的网络拓扑，使用电压源换流器换流器从 2 个变电站的 10kV 母线侧吸纳功率，为直流系统提供能量支撑，满足直流系统供电负荷的用电需求。厦门大学的光伏建筑一体化直流微网工程，母线采用 380V 单极接线，给包括空调、充电站、阻性负荷、LED

照明在内的直流负荷供电。张北构建的±500kV 四端环形柔性直流示范工程，可大规模消纳及输送风电、光伏等可再生能源。

据不完全统计，国内外实际运行的直流建筑项目已建成数十个个，建筑类型涵盖了办公、校园、住宅和厂房多个种类，直流配电容量在 10~300kW 之间，如表 2-3 所示。虽然建筑类型和规模上有差异，直流供电的负载也有不同，但整体来说建筑直流系统的电压等级都选择在 DC350~400V 之间，在小功率电器供电方面也都采用的 24V 或 48V 特低安全电压供电。综上，国内外的直流建筑还局限于示范工程，许多研究成果没有得到长期应用的检验，商业化实践几乎还是空白。尤其是我国起步较晚，因此需加快针对直流建筑研究的步伐，在总结以上国内外相关示范工程的经验，深入研究直流配电系统的规划设计、调度运行、经济分析等问题，同时需加快相关标准制定、完善电力市场机制、加大政策推广力度。

表 2-3 国内外直流建筑案例介绍

项目名称	城市	建筑类型	时间	规模/kW	电压等级/V	直流源荷
国内						
深圳建科院未来大厦直流配电系统	深圳	办公	2019	200	DC375/48	双极 AC/DC 变换器、光伏、蓄电池、全直流建筑
苏州同里综合能源服务中心	苏州	工业	2018	4600	DC750/540/220	AC/DC 变换器、光伏、蓄电池、照明、空调、充电桩、数据中心等
吴江同里湖嘉苑直流建筑群	苏州	居民	2019	620	DC375/48	光伏、蓄电池、充电桩、照明、空调、直流家电
南京国臣办公楼	南京	办公	2018	74	DC600/220	AC/DC 变换器、光伏、蓄电池、充电桩、照明、直流家电
大同市国际能源革命科技创新园	大同	办公	2019	500	DC750	AC/DC 变换器、光伏、蓄电池、照明、空调、计算机
CIGS-BIPV 建筑能源集控与实验平台	北京	办公	2019	125	DC750/220	AC/DC 变换器、光伏、蓄电池、农业电源、照明、直流家电
虹桥基金小镇直流微网	上海	办公	2019	210	DC532/220	AC/DC 变换器、光伏、空调、电脑、照明

格力直流小屋	珠海	办公	2018	100	DC400/48	AC/DC 变换器、光伏、蓄电池、充电桩、照明、空调、直流家电
国外						
东北福祉大学直流微电网	日本仙台	办公	2008	218	DC400	住宅电器、集中式能量路由器、光伏
FREEDM	美国北卡罗来纳州	展示实验	2011	100	DC400V	AC/DC 变换器、光伏、储能、隔离型 DC/DC 变换器、直流负荷
NextEnergy Center building in Detroit	美国底特律	厂房	2013	250	DC380/24	LED 照明、通风机、AC/DC 变换器、光伏
Intelligent DC Microgrid Living Lab Aalborg University	丹麦奥尔堡	展示实验	2015	20	DC380/48	直流家用电器、AC/DC 变换器、光伏、水平风机、燃料电池
City of Tomorrow	德国亚琛工业大学	学校	2011	15500	DC±5kV	为新校区的几个大功率试验台供电
弗劳恩霍夫 IISB building	德国埃朗根	办公	2016	200	DC380 /48	照明、空调、USB—C、直流插座直流家电、AC /DC 变换器、光伏、蓄电池、氢燃料电池
DC Lofts Strijp — S Eindhoven	荷兰阿姆斯特丹	住宅	2017	50	—	住宅电器、户式能量路由器
Etratech Inc headquarter	加拿大伯灵顿	厂房	2017	46	DC380	AC /DC 变 换 器（双极）、光伏、蓄电池、燃气发电机

3 建筑光储直柔系统的源荷特性及优化控制策略

3.1 建筑光储直柔系统的源荷特性

3.1.1 光伏发电

光伏发电系统的运行性能取决于多种因素。尤其是环境因素，例如太阳辐射能、环境温度、风速等。为了使一个光伏发电系统运行可靠、高效、经济，我们必须充分考虑本地负荷需求、当地气象资料、电站各部件参数性能。然而，太阳组件及其它部件的性能通常是由生产厂家按照平均标准生产的，这就使得系统的总性能不可能刚好满足当地实际需要，对于一个容量配置过大的光伏发电系统，系统不会满负荷运转，这就造成系统寿命降低和安装费增高；对于一个容量配置过小的光伏发电系统来说，系统无法提供足够多的能量，同时也减少了系统的运行寿命。因此建立光伏系统动态仿真模型，就要对随机性分布的太阳辐射能进行概率建模。

太阳能和常规能源的最大不同是它的随机分布性，某个时刻的光伏阵列的出力却不是人为所能控制的，这是由该时刻的太阳辐射能、地理位置、环境、转换效率等诸多因素共同决定的。太阳辐射的大小与太阳本身辐射性质有关。太阳表面有黑子和光斑，对太阳能的影响只有 0.5%。一般来讲，我们可以忽略太阳表面辐射的变化，而同时考虑与太阳地球的相互空间位置以及它们的运动规律。而到达地表的太阳辐射又随安装地点的季节、时刻、纬度的不同而变化。因此，一天中的太阳辐射是不断变化的，影响太阳辐射的因素相当多。

参考当地气象资料，对影响光伏出力的影响进行分析计算。在光伏发电系统规划中，通常是采用统计全年的太阳辐射量，进而得到整个电池阵列的转换出力，或者得到各月份组件的理论出力。研究表明在某一时刻 t 的太阳能光照强度 $r(t)$ 满足 Beta 分布：

$$f(r(t)) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r(t)}{r_{\max}(t)} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r(t)}{r_{\max}(t)} \right)^{\beta-1} \quad (3-1)$$

式中， $r_{\max}(t)$ 为时刻 t 的最大光照强度； $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数； α 和 β 为 Beta 分布形状参数。

光伏系统发电出力可表达为：

$$P(t) = r(t)A \cdot \eta \quad (3-2)$$

式中， A 为太阳能方阵总面积； η 为光电转换效率。

光伏出力概率密度函数为：

$$f(P_s(t)) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_s(t)}{P_{s\max}(t)} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_s(t)}{P_{s\max}(t)} \right)^{\beta-1} \quad (3-3)$$

式中，光伏发电机组在时刻 t 的最大出力 $P_{s\max}(t)$ 为：

$$P_{s\max}(t) = A \cdot \eta \cdot r_{\max}(t) \quad (3-4)$$

结合式 (2-15) 可得到光伏发电系统出力的期望值 $E(P_s(t))$ 、方差 $D(P_s(t))$ 和二阶原点矩 $E(P_s^2(t))$ 为：

$$E(P_s(t)) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} P_{s\max}(t) \quad (3-5)$$

$$D(P_s(t)) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2 (\alpha + \beta + 1)} P_{s\max}^2(t) \quad (3-6)$$

$$E(P_s^2(t)) = \frac{\alpha(\alpha + 1)}{(\alpha + \beta)(\alpha + \beta + 1)} P_{s\max}^2(t) \quad (3-7)$$

光伏发电出力波动受光照强度变化影响，有很大的随机性。光伏出力的波动情况分为两种，第一种为受太阳运行影响产生光伏发电日出力变化，这种变化情况时间跨度大，变化幅度大，但是变化速度较为缓慢，一般为小时为变化单位，主要影响电力系统的日调度；第二种为有浮云或飞行物掠过时，阴影影响产生的光伏发电出力瞬时变化，实验指出，光伏发电出力可在一秒内降至额定出力的 30%，这种变化可能会对电力系统的暂态稳定性产生影响。

光伏发电的出力随光照强度的变化而变化，在四种不同天气模式（晴天，少云，多云，阴天）下，光伏电源的典型日出力曲线如图 3-1 所示。

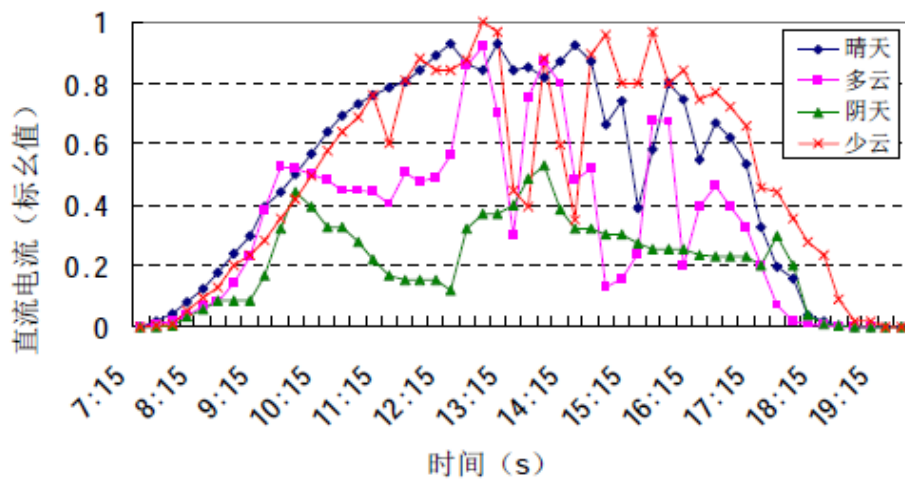


图 3-1 四种天气的光伏发电出力

由上图可以看出，光伏出力具有以下几个特点：

(a) 光伏出力集中在白天，在夜间无出力；

(b) 光伏的有功出力随天气变化波动较大，受气象因素影响明显。不同的天气，其出力规律不同。以多云和少云天气波动最大、最剧烈，晴天和阴天波动较缓慢；

(c) 光伏出力因为光伏发电的原理与传统发电机原理不同，在受到气象因素变化影响时，发电出力的变化几乎不存在调节特性，瞬时发生变化，对电力系统的冲击较大。因此，储能系统对于平抑光伏出力的波动是必须的。

另外，光伏在白天出力比较大。但是一般情况下风力发电夜间发电量比较多。将风力和光伏发电结合起来，通过风光互补，可以改善系统运行。

3.1.2 储能装置

储能装置在新能源发电领域中有着较为广泛的应用。将储能系统应用于电力系统，可以减少系统振荡, 提高系统稳定性，可以减少电力系统负荷峰谷差，提高电能质量。随着微电网的发展，分布式发电技术和储能装置形成的分散电源将成为电力系统的重要组成部分，与此同时，电力系统的调控方法也将有所改变。目前，常见的储能方式有超导储能技术、超级电容储能技术、飞轮储能、压缩空气储能、抽水蓄能、蓄电池储能。表 3-1 和表 3-2 分别列举了不同储能方式的性能比较和优缺点比较。

表 3-1 不同储能方式的性能比较

储能方式	能量转化效率 (%)	储能容量 (MWh)	响应时间	功率
抽水蓄能	>70	>2000	10 秒~4 分	300~1800
压缩空气	>70	5~100000	1~10 分	0.5~27000
超导储能	95	0.0002~100	<1 秒	0.001~2
飞轮储能	90~93	0.0002~500	<1 秒	0.001~1
燃料电池	59	0.0002~2	<1 秒	0.01~3
高效电池	85	0.0001~1	<1 秒	0.01~3

表 3-2 各种储能方式的优缺点

储能方式	优点	缺点	应用场合
抽水蓄能	容量大、成本低	场地要求特殊	日负荷调节、系统备用

压缩空气	容量大、成本低	场地和气体燃料	日负荷调节、系统备用
超导储能	功率大	能量密度低、成本高	电能质量调节、UPS
超级电容器	功率大、效率高	能量密度低、成本高	电能质量调节、UPS
锂电池	能量高、功率高、效率高	成本高	各种应用
飞轮储能	功率高	能量密度低	电能质量调节、频率控制
铅酸电池	低价格	深度充电寿命短	电能质量调节
Na2S 电池	能量高、功率高、效率高	成本高，安全性低	各种应用

下面以蓄电池储能装置为例，构建储能装置的运行模型。

蓄电池储能装置的运行状态包括充电和放电，不论充电或放电都存在一定的能量损失，蓄电池还存在漏电现象。通常可用储能荷电状态变量 (V_{soc}) 来描述蓄电池的电能储存情况， V_{soc} 表达式如式 (3-8) 所示：

$$V_{soc}(t) = \frac{E(t)}{E_{max}} \times 100\% \quad (3-8)$$

式中， $V_{soc}(t)$ 表示调度时刻 t 的储能荷电状态变量值； $E(t)$ 表示调度时刻 t 的蓄电池电量； E_{max} 表示蓄电池能够储存的最大电量。

蓄电池储能装置在充电或放电状态时，相邻调度时刻间的 V_{soc} 关系分别如式 (3-9)、式 (3-10) 所示：

$$V_{soc}(t) = V_{soc}(t-1) \times (1-\gamma) - \frac{P_{ESS}(t) \times \Delta t \times \eta_c}{E_{max}} \quad (3-9)$$

$$V_{soc}(t) = V_{soc}(t-1) \times (1-\gamma) - \frac{P_{ESS}(t) \times \Delta t}{\eta_d \times E_{max}} \quad (3-10)$$

式中， γ 表示蓄电池每小时的漏电比例系数； η_c 、 η_d 分别表示蓄电池的充电、放电效率； $P_{ESS}(t)$ 表示调度时刻 t 的蓄电池充、放电功率，本文规定蓄电池在充电时 $P_{ESS}(t) < 0$ ，放电时 $P_{ESS}(t) > 0$ ； Δt 表示相邻两个调度时刻的时间间隔。

为了延长蓄电池储能装置的寿命以及保证调度方案的连续性，通常将每个调度时刻的 V_{soc} 限制在一定范围内，并且调度周期开始与结束时刻的 V_{soc} 要保持一致，即：

$$V_{soc,j}(t_i) = V_{soc,j}(t_f) \quad (3-11)$$

式中， t_i 和 t_f 分别为调度周期开始时刻和调度周期结束时刻。

储能装置的充/放电功率，以及 SOC 在运行时具有相关约束：

$$P_{\text{ESSmin},j} \leq P_{\text{ESS},j}(t) \leq P_{\text{ESSmax},j} \quad (3-12)$$

$$V_{\text{SOCmin},j} \leq V_{\text{SOC},j}(t) \leq V_{\text{SOCmax},j} \quad (3-13)$$

式中, $P_{\text{ESSmin},j}$ 和 $P_{\text{ESSmax},j}$ 分别为在节点 j 处并网的储能装置所能提供的有功功率上、下限; $V_{\text{SOCmin},j}$ 和 $V_{\text{SOCmax},j}$ 分别为在节点 j 处并网的储能装置剩余容量下限和上限。 $V_{\text{SOC},j}(t)$ 为第 t 个调度时刻在节点 j 处并网的储能装置剩余容量。

从应用角度上来讲, 储能装置如果用于调整峰谷差, 则需要容量较大, 那应该选用容量密度较大的储能设备而如果用于提高系统稳定控制, 就应采取相对容量小、响应速度快的储能技术进行快速的充放电进行调节, 从而提高电力系统稳定性。

储能系统的接入为含风电、光伏发电等可再生能源的电力系统尤其是孤网系统维持其系统能量供求平衡、保证系统电压和频率的稳定起到至关重要的作用; 同时, 随着可再生能源及电网智能化的蓬勃发展, 储能系统的控制技术也随之不断发展, 主要表现在接入方式、工作模式及其相关控制策略等方面。从储能系统接入电网的方式及其控制策略方面来看, 目前主要有两种方式: 一是将储能系统直接(或通过 DC-DC 变换器)并联在可再生能源的电力电子变换器(DC/AC 变换器)的直流端, 且通过此变换器来实现储能系统与可再生能源及电网的能量变换与控制。这种直流汇聚接入的方式具有可靠性高、损耗低及便于控制等优点, 其控制研究的重点在于直流端的可再生能源与储能系统、负载等之间的协调控制, 但因易受可再生能源的电力电子变换器容量限制, 进而影响储能系统的能量及功率控制能力。二是将储能系统经电力电子变换器(DC/AC 或 AC/DC+DC/DC)直接与电网相连, 即并联在可再生能源变换器的交流端。这种直流汇聚接入的方式具有易实现容量扩展、便于模块化管理与控制等优点, 是目前采用最多的一种接入方式。从储能系统的工作模式及其控制策略方面来看, 在实际应用过程中, 一般有两种工作模式: 并网运行模式、孤网运行模式。当储能系统与大电网相连时, 即工作于并网运行模式, 储能系统通常被视作为 PQ 节点, 而多采用简单、易行的 PQ 控制策略。当储能系统工作于孤网运行模式时, 常用控制方法有: 主从式控制和对等式下垂控制。在主从式控制中由主控制器为从控制器提供其电压、频率及功率等给定信息, 而每个从控制器根据主控制器传送的给定信息来控制其各自运行方式。对等式下垂控制通过借鉴同步发电机的自同步和电压-频率下垂特性, 各控制器利用当地检测信息来控制各

自运行方式，无需外部提供给定信息。与主从式控制相比，对等式下垂控制因其无互联线、可实现即插即用、易扩展及可靠性高等优点，已被广泛应用于孤网运行控制。

针对分布式储能系统的控制策略，从应用场景上大致可分为并网运行控制策略和独立运行控制策略。并网运行时控制目标是根据不同应用需求，快速跟随功率参考指令，多用于削峰填谷、平滑可再生能源输出、微电网的联络线功率控制等；独立运行时的控制目标是实现独立微电网的稳定运行。在很多应用场景下，分布式储能系统需要与其他分布式电源或分布式储能系统协调运行共同实现既定的控制目标。分布式储能系统的协调控制可以划分为三个层次：

（1）设备级协调控制。一般为混合储能系统间或储能与分布式电源间的协调控制。各设备通过直流母线耦合，或接入同一交流母线，通过协调控制能够在实现某具体控制目标的同时，充分考虑储能系统的寿命和效率等因素；

（2）微电网级协调控制。微电网中多个分布式储能系统间的协调控制主要采用分层控制的方式，通过微电网中央控制器对各储能控制器下达控制指令，协调各分布式储能系统的运行。

（3）广域协调控制。对于在地理位置上分布较广的分布式储能系统，无法直接采用微电网模式进行管理和控制，需通过配网调度或者虚拟电厂技术。此时的协调控制需涵盖多个微电网以及微电网覆盖范围以外的分布式储能系统，进而实现广域协调控制。

储能的运行方式是指根据需要调节储能的充放电模式和充放电功率，是实现电网经济调度的手段。储能的运行方式和电网中储能的设计功能和收益密切相关，体现了储能投资主体的投资目的。用户投资储能的目的一般为保证重要负荷的供电，因此储能可能会大部分时间工作于浮充备用的状态。发电商投资储能的目的是利用储能获取尽可能大的经济效益，储能的运行方式可能是在工业电价低谷充电，高峰放电。鉴于目前储能成本较高，仅仅利用储能充放电价差获取经济效益难以收回成本，因此目前发电商投资储能的意愿不强。而电网投资储能的目的是利用储能尽可能减小可再生能源并网对电网的影响、减小系统备用容量、或利用分布式储能增强用户侧微电网的可控性，此时储能按照促进可再生能源消纳、优化调节微电网对外联络功率，并兼顾经济效益的方式运行。

3.1.3 负荷特性

建筑负荷的柔性特性是低碳建筑光储直柔系统参与电网互动的前提和基础。国际能源署 Annex 67 项目从多能源系统以及与电网互动的角度提出，建筑负荷的柔性特性定义为“在一定时间段内维持可接受的室内舒适度前提下，需求侧响应电力系统的要求，如提升或降低分布式蓄能容量，增大或减少电力负荷的能力”。既有的关于建筑柔性负荷调节潜力量化评价方法和指标可分为两类：基于优化目标的定量计算方法和建筑柔性负荷特性的直接定量法。基于优化目标的定量计算方法通过对比用户在不参与需求响应和参与需求响应两种情景下的经济、环境或者供需匹配的效益差值，间接计算该用户具备的柔性调节能力。Eduard 首先计算建筑用户在未使用任何柔性能力情景下的二氧化碳排放系数 CEF (Carbon Emissions Factor)，然后计算其使用一系列“能源柔性解决方法（如蓄能）”情景下的 CEF 值，将两者的差值作为用户能源柔性潜力的评价参数。Georges 提出将购电成本最大化与最小化之间的成本差值作为建筑的能源柔性潜力。直接定量法则是直接计算该用户在特定时间段内所能削减或提升负荷（产能）的调节量、以及维持该变化量的时间长度等，目前还处于起步阶段。Klein 提出了针对大型工商业用户的柔性潜力评估方法，主要步骤包括确定研究对象和需求响应项目类型、基于用电特性的用户群聚类分析、分类需求响应项目参与率辨识、价格柔性计算和需求响应潜力评估，是适用于细分用户群的柔性计算方法。

目前关于光储直柔系统与电网的互动效果评判的研究较少，而对于需求响应效果评价的研究较多，需求响应体现的是建筑用户与电网的交互，因此可为本研究提供借鉴。东南大学团队基于系统动力学方法，分析了智能电网下需求响应成本效益的形成机制并建立了相应测算模型，系统动力学方法为需求响应综合效益评估提供了系统性更强、动态性能更佳、因果反馈关系清晰的解决思路。西安交通大学团队从发电商角度，通过求解最优机组组合问题，揭示了需求响应对发电成本的影响作用。GB/T 32127—2015《需求响应效果监测与综合效益评价导则》将需求响应效益根据获得方式分为直接效益与间接效益，其中间接效益包含集合效益、附属效益及减排效益；根据收益主体分为用户效益、电网效益、电厂效益和社会效益。但是没有考虑对这些不同类型的效益进行赋权排序进而获得一个综合的效益评估指标。

建筑负荷的柔性特性可以作为一种长期有效的方法来应对日益复杂的电力需求，从而最小化电网公司输配电成本。目前江苏省、北京市及广东省佛山市等多地政府均确定了激励性需求响应的实施方案。但仍存在一些问题：例如在负荷自主响应行为不确定性方面还需要进一步深化研究，特别是大量柔性负荷基于电价的聚合响应的不确定性对电网调度的影响，计及不确定性后柔性负荷调度如何与常规发电调度相配合；传统发电调度包括日前、日内、实时调度计划等过个时间尺度，柔性负荷如何从预测误差、响应特性、调节能力、调节范围、调度成本等多角度协调参与不同时间尺度的调度还有待进一步分析和研究；未深入探讨不同类型柔性负荷的分解协调问题，在区域电力系统调度层面，往往只能给出参与调度的配电网、专变用户、大用户、负荷聚合商的调度计划、备用容量安排，尚不能将其分解到每一个负荷上。

3.2 建筑光储直柔系统的优化控制策略

3.2.1 光储直柔系统运行状态概述

光储直柔系统可看作由直流微网和交流电网两部分组成，主要运行状态包括以下几种：

- (1) 初始状态：直流微电网处于停机或待机状态，各设备均未运行；
- (2) 并网状态：直流微电网接入交流主电网运行，双向柔性互联装置运行；
- (3) 离网状态：直流微电网独立于交流主电网运行，柔性互联装置停运或待机。

系统运行状态如图 3-2 所示。

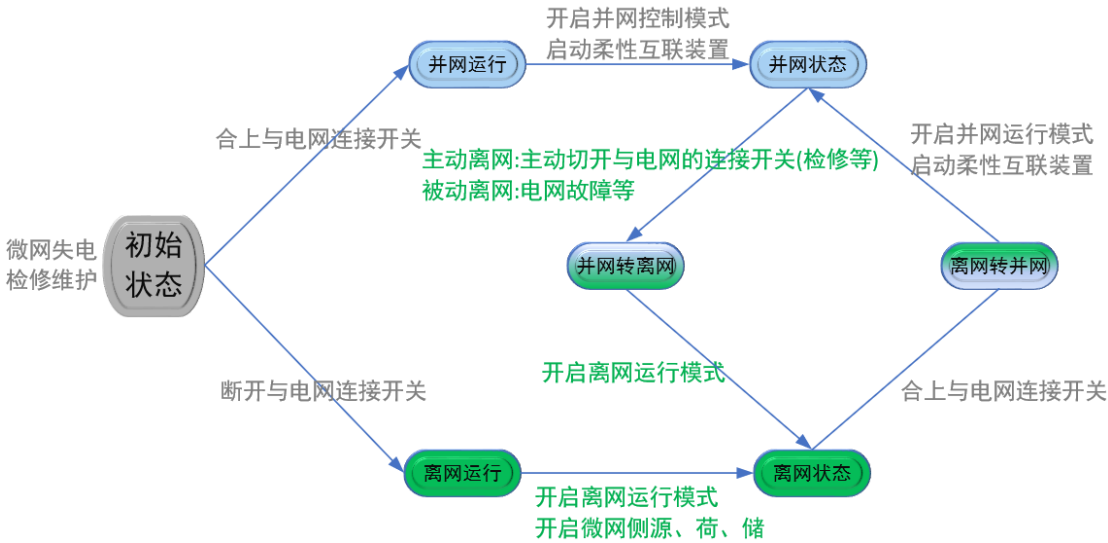


图 3-2 光储直柔系统运行状态

在直流配电网中，光伏阵列及交流主网等各端电源经电力电子变流器（这里指的是柔性互联装置和直流变换器）并入直流母线。变流器控制是直流配电网闭环控制系统中最重要的一环，通过分析变流器控制模式对上下层电网的影响和直流配电网节点类型，对不同类型节点采用差异化控制模式^[1]。

直流配电网变流器控制模式对节点类型的影响如表 3-3 所示。表中， V_{SDC} 为直流二次侧电压。

表 3-3 变流器控制模式对应的节点类型

变流器	控制模式	上层电网	下层电网
柔性互联装置	定 V_{DC} 、Q	V 节点	PQ 节点
	定 P、Q	P 节点	PQ 节点
	定 V_{AC} 、 f_{AC}	P 节点	PQ 节点
	定 P、 V_{AC}	P 节点	$V\theta$ 节点
直流变换器	定 V_{DC}	V 节点	P 节点
	定 V_{SDC}	P 节点	V 节点
	定 P	P 节点	P 节点

变流器控制，主要有主从控制、电压裕度控制和电压下垂控制。若直流配电网采用电压下垂控制，则端口交换功率易随上层电网电压波动，无法实现精准调控，更难以稳定于优化参考点。若采用主从控制或电压裕度控制，根据端口源荷调节能力，可按表 3-4 对直流配电网的节点进行分类，对不同类型节点采用差异化控制模式。

表 3-4 节点类型分类和控制模式

节点类型	端口所含源荷情况	端口功率控制方式	作用	VSC 控制方式	直流变换器控制方式
电压节点	大容量，调节能力强的电源或连接上级高压电网	根据上层电网直流电压稳定的需求提供功率	上层电网平衡节点	定直流电压	定直流电压
主控功率节点	较大容量，具有较强的调节能力的电源	直接控制变流器交换功率	调控直流配电网潮流	定功率	定功率
辅控功率节点	中小容量可控电源、可控负荷	通过下层电网源荷响应间接控制	辅助调控直流配电	定电压	定直流二次侧电压

		端口交换功率	网潮流		
不可控有功功率节点	不可控电源、不可控负荷	根据下层电网直流电压需求提供功率	下层电网平衡节点	定电压	定直流二次侧电压

控制方面，根据系统规模的不同，小系统可采用协调控制器进行一对一协调控制，如图 3-3 所示；多系统可采用分层控制的方法，由主控制器对分层从控制器进行统一管理，如图 3-4 所示。目前通讯方式主要包括有线和无线两种。其中有线包括光纤、网线、485 总线、CAN 总线等，无线包括 2G、3G、4G、5G、LORA、ZIGBEE 等。

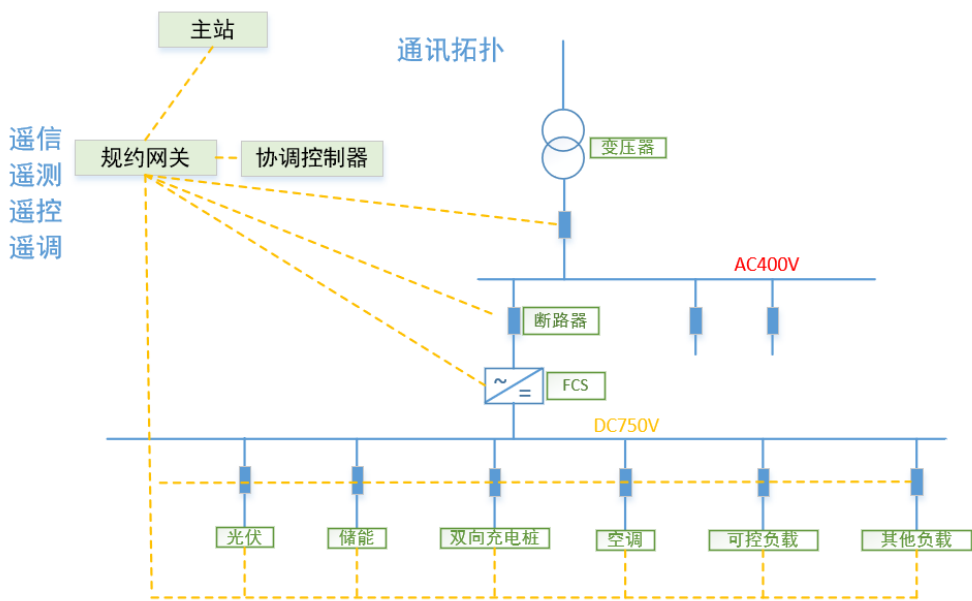


图 3-3 光储直柔系统运行状态-小系统

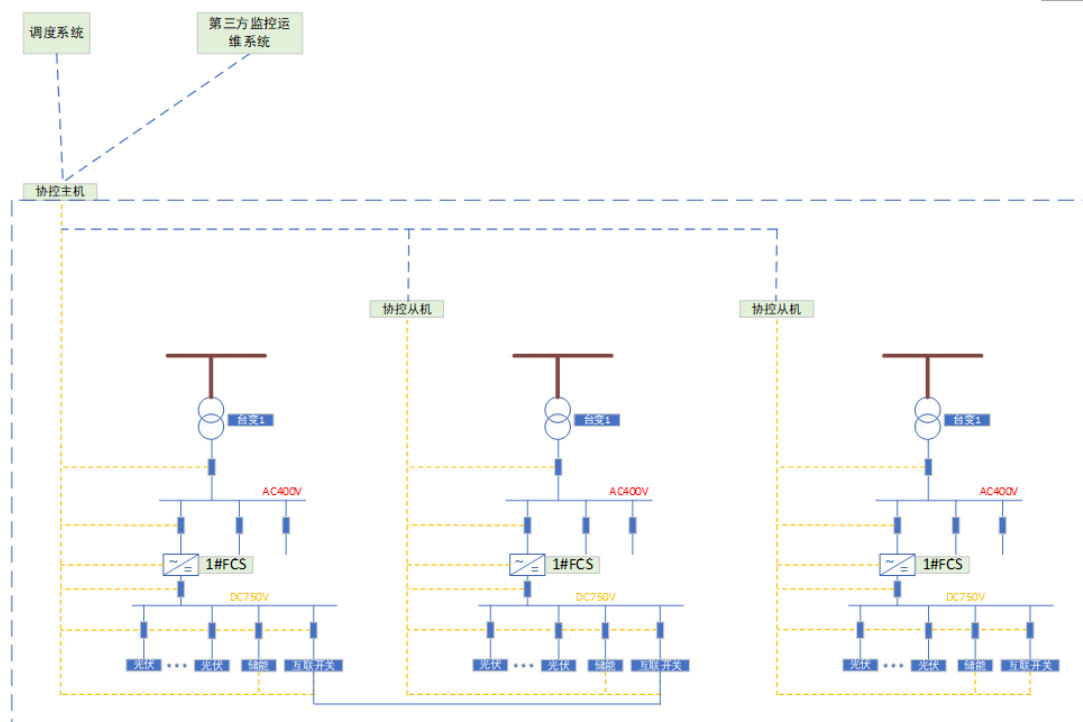


图 3-4 光储直柔系统运行状态-多系统

3.2.2 分层协调控制策略

（1）系统级控制

系统级控制监测各端口投退状态、端口功率控制误差，当系统状态发生较大变化时，更新数据，重新进行优化计算，系统级控制框架如图 3-5 所示。对主控有功功率节点，优化结果的端口功率参考值发送至变流器级控制，直接控制端口功率。对辅控有功功率节点，端口功率参考值发送至源荷设备级控制，通过源荷响应间接控制端口功率。

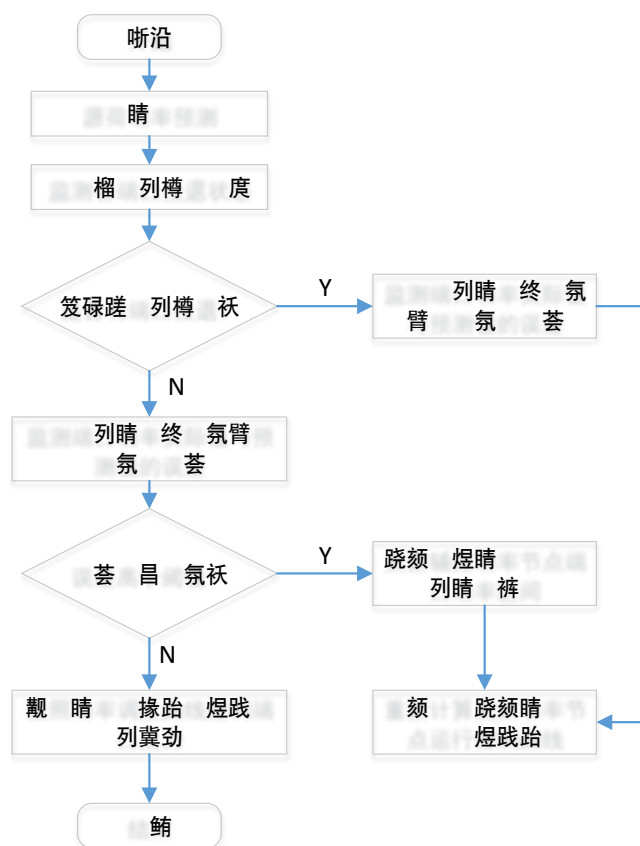


图 3-5 系统级控制框架

(2) 变流器级控制

电压裕度控制无需站间通信，直流电压质量高，端口功率调控能力较强，变流器级控制采用电压裕度控制可避免主从控制依赖通信、下垂控制直流电压质量较差的问题。系统级控制可减轻电压控制节点变流器的调控压力，通信意外缺失时，直流配电网仍可按照当前电压裕度曲线稳定运行。除电压节点外，按功率调节能力由强到弱选取若干个主控有功功率节点配置电压裕度控制，并依据网络具体情况及需求进行排序编号。

(3) 源荷设备级控制

对辅控有功功率节点，端口功率参考值变化或端口内源荷功率波动易使端口功率实测值偏离参考值。依据端口功率控制误差，通过源荷出力响应使端口出力及时跟踪系统级控制所得的优化运行点。依据源荷响应能力及调节代价的高低，对端口所含源荷按自定义优先顺序分级归类。

端口源荷设备投退状态及出力具有不确定性，当系统级控制的端口功率参考值溢出于源荷功率响应区间时，端口功率难以及时跟踪系统级控制的参考值，此时需更新系统级控制的端口功率区间，重新进行优化计算。根据各端口可控

源荷的投退及运行状态，在线更新源、荷功率响应曲线，实现各端口源荷设备依序按比自适应协调出力。将储能的充放电平衡约束、荷电状态约束隐含于可调节功率裕度中，随着直流配电网节点数目及设备数量的增多，采用端口功率误差控制，可减少系统级优化计算的复杂度，提高响应速度。

源荷设备的具体控制详见表 3-5。

表 3-5 源荷设备控制

设备	控制方式
接入直流电网的光伏	最大功率跟踪、定低压侧直流控制、脉冲宽度调制等
风机	定转矩、无功功率、双闭环控制、负序抑制、脉冲宽度调制等
储能	定有功功率控制等
燃气轮机	定转矩控制、励磁控制等

3.2.3 电压带控制策略

分层协调控制策略需要对系统和功率变换装置的状态进行监测，并一定程度上对通信有依赖。考虑到单体建筑内系统规模较小，且对控制可靠性要求较高，因而可以采用基于电压带的控制策略。电压带控制策略将系统运行状态以电压范围进行区分，整体将系统启动后分为运行状态和工作状态，运行状态是系统设定的目标工作区域，允许电压在运行状态上限和下限之间合理波动；工作状态是设备能保持运行的最低要求状态，在工作电压上限和下限之间，设备仍能保持一定程度的运行。超过工作电压上限，将威胁到设备安全；低于工作电压下限，设备将停止运行。根据上述的电压限制值将系统运行区域分为安全防护区、应急响应区、目标工作区、紧急响应区。如图 3-6 所示^{[2][3]}。

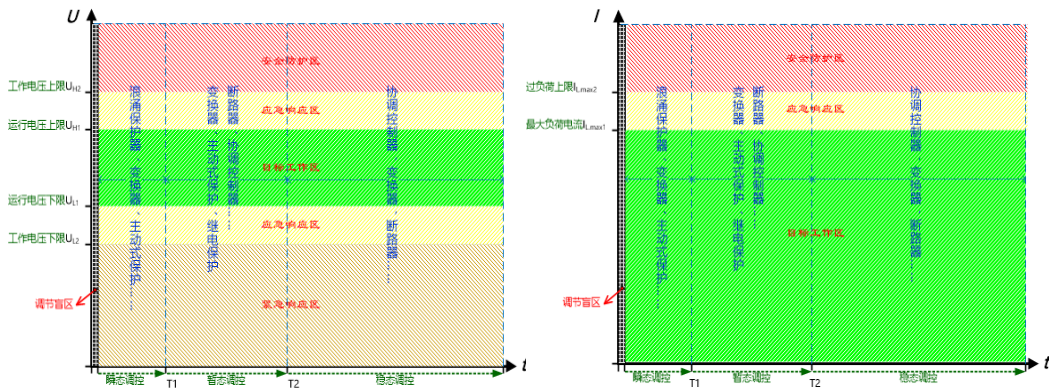


图 3-6 系统级控制框架

瞬态控制和暂态控制，允许电压较大范围波动，目标为使系统运行在安全防护区以下，并满足系统紧急响应需求。稳态控制为系统的最终运行目标，通

过交流侧和直流侧的协同，使系统运行在目标工作区，具体如下：

(1) 交流侧控制目标：

PQ 控制方式：微网需与主电网连接运行于并网状态，电压、频率由大电网提供支撑，微网以恒定的功率输出；

VF 控制方式：微网需与主电网分离运行于离网状态，直流微网反向给交流负荷供电，在这种系统中，没有公网的支撑，微网需要控制电压和频率输出，以满足交流负荷的需求。

(2) 直流侧控制目标：

稳压控制：变换器以设定的输出电压为控制目标，如：储能恒压充电；

MPPT 控制：最大功率点跟踪，实时侦测太阳能板的发电电压，并追踪电压电流值(VI)，使系统以最大功率输出，如：光伏变换器；

恒流控制：变换器以设定的输出电流为控制目标，如：储能恒流充电；

恒功率控制：变换器以设定的功率为控制目标，相当于一个电流源，电压由其他设备建立，自身根据电压调节电流输出，以达到设定的功率输出，如：响应电网调度。

以光伏自发自用模式为例，装置内变流器在直流电压裕度控制下，无需通信，各变流器根据本地电压信号自行切换控制模式，实现装置内变流器间协调控制；当需要实现其他类型运行模式时，可通过协调控制器按照相应的运行模式调控策略对装置进行控制。

并网运行状态下，双向 AC/DC 变换器作为调压单元维持系统功率平衡及直流电压稳定。采用 MPPT 模式控制光伏接口变换器，以最大限度利用太阳能。当系统内部能量供过于求时，储能优先吸收多余的能量。当储能单元容量达到阈值时，它将停止工作，多余的能量送往电网；当能量出现供不应求的情况时，储能优先释放能量联合光伏阵列供应负载工作，若此时还不能满足负载需求，则由电网供应不足的能量。当能量由交流侧向直流侧传输时，双向 AC/DC 变换器工作在整流状态下；相反的，若能量由直流侧反馈给交流侧，则双向 AC/DC 变换器工作在逆变状态下。

当大电网出现故障或计划检修时，直流配电系统转为离网运行。双向 AC/DC 变换器退出直流配电网的运行，会导致直流母线的电压出现波动。当直流电压偏差到一定程度，储能接口变换器切换为定直流电压模式，由储能单元

接管直流电压，维持新的稳定点。当系统内能量供过于求，光伏接口变换器运行于 MPPT 模式，由储能单元吸收多余的能量，若储能的容量达到上限，则光伏接口变换器切换为限功率模式，减少光伏阵列输出的能量；当系统内部能量出现供不应求，则光伏接口变换器工作于最大功率跟踪模式，负载由储能和光伏共同供电，若仍然无法满足负载的需求，则由整流供电，并可适当减少不必要的负载。

夜间模式下运行，光伏阵列不发出功率，双向 AC/DC 变换器工作在定直流母线控制方式（整流模式）给负载供电，同时为储能单元充电。

表 3-6 不同运行模式下的变流器间协调控制策略

系统运行状态	光伏接口变换器	储能接口变换器	双向 AC/DC 变换器
并网运行	MPPT 控制	功率控制	定直流电压控制
离网运行	MPPT 控制/限功率	定直流电压控制	/
夜间运行	/	功率控制	定直流电压控制

当电压达到系统工作电压上限时，光伏弃光以维持电压不超过工作电压上限，当光伏不足时，电压低于系统运行电压下限时，启动整流，维持系统在正常运行区间内运行。在弃光和整流之间，根据系统运行模式和具体情况设置不同的电压梯度值，具体的电压带设定如图 3-7 所示。

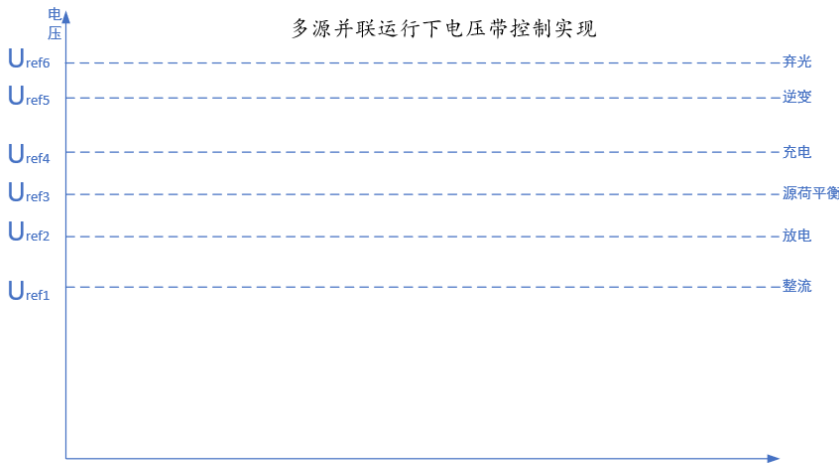


图 3-7 电压带设定示意

3.3 光储直柔系统运行模式

基础的运行模式包括消峰填谷/经济模式、需求响应、离网(主动、被动)以及检修模式等，在实际的系统运行中，一般要求不同运行模式直接可以通过自适应或者系统控制进行切换。

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，属于应急情况，需要储能放电以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。

当主电网计划停电或者微电网需要检修时，可将微电网有计划的主动剥离主电网；当主电网故障时，微电网由于孤岛保护，会被动离网，协调控制器检测到离网指令或者状态后，以保证供电安全以及可靠性的前提下进行调控：

- a) 光伏 MPPT+恒压控制
- b) 储能电压带模式运行
- c) 充电桩充放电控制
- d) 空调功率控制
- e) 可控负载出力控制
- f) 切除非必要负载

主动离网有提前调控的措施，所以微电网一般不会失电；被动离网由于未经过调控，可能出现供小于求的情况，导致微电网由短时停电。

以某光储直柔建筑为例，通过功率曲线说明经济运行情况下的功率调节情况，如图 3-8 所示。

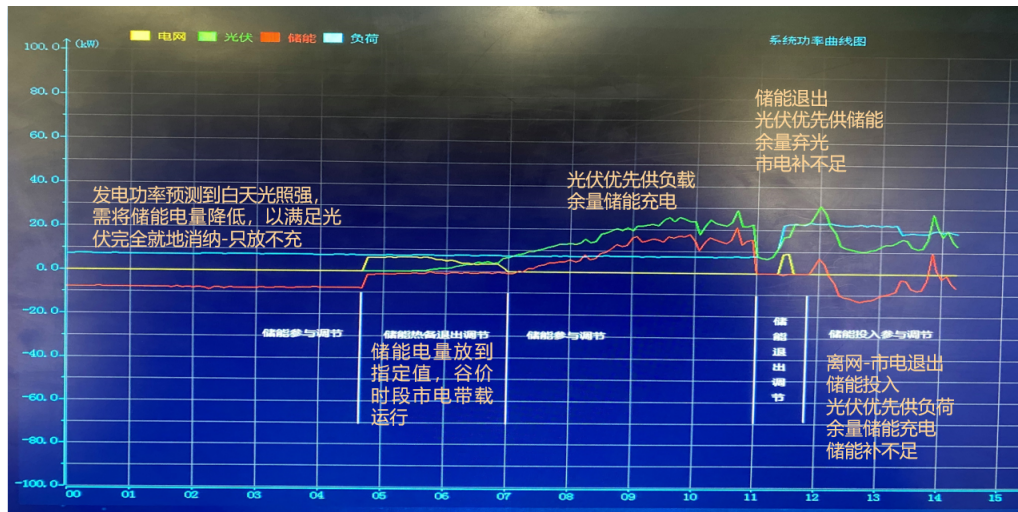


图 3-8 某建筑功率运行曲线

4 建筑光储直柔系统的系统保护与用电安全

4.1 光储直柔系统故障特点及保护要求

直流配电网的主要故障类型可分为绝缘下降、接地、环网、短路等。通常轻微故障得不到及时处理，会逐步积累，最后发展到严重的短路和断线等故障。对于交直流混合供电网络，还可能存在交流窜入直流的故障现象。直流配电网常见故障形式如图 4-1 所示^[4]。

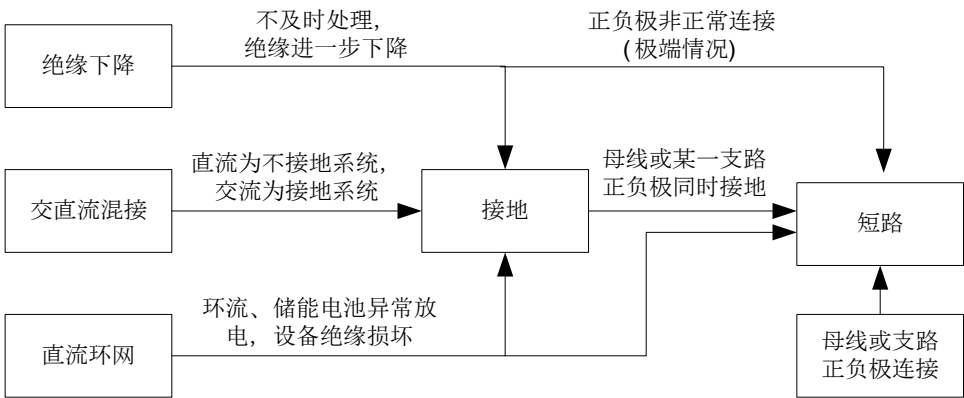


图 4-1 直流配电网常见故障形式

每种故障类型，都有其不同的特征，故障类型及其关键特征如表 4-1 所示。对于直流配电网来说，继电保护判据主要来自于直流电压、直流电流、对地阻抗（本身也基于直流电流、直流电压），相对可利用的判据组合较少，这给直流保护的原理研究带来了一定的限制；但直流配电网中变换器内一般存在较大的直流电容，大量理论分析和基于 MATLAB 或 PSCAD/EMTDC 的仿真已经证明其短路故障电流较大，暂态过程较短，电流突变特征比传统交流短路时更为明显，这也为构建新型保护算法提供了有利的条件。

表 4-1 故障类型及其关键特征

故障类型	关键特征
接地	绝缘阻抗降低（一点接地）、电流通过接地点分流
绝缘降低	绝缘阻抗降低、电流通过对地电阻分流
短路	电流异常上升、电压下降、电流通过短路点分流
交流窜入	出现交流信号、绝缘阻抗降低
直流环网	非正常带电、回路电流异常
断线	电流异常中断，电压消失
过电压	电压异常上升
欠电压	电压异常下降
电弧	明亮的弧光柱和电极斑点

直流配电保护与交流系统相比，存在以下特点：

1) 故障电流上升迅速。当直流线路发生接地故障时, VSC 直流侧并联的滤波电容首先在极短的时间内对故障点放电, 造成线路电流迅速上升, 这对保护监测和隔离装置的速度提出了很高的要求。直流短路故障可能造成网络化直流系统的崩溃且恢复周期长。

2) 影响范围广。直流配电系统中的大部分并网单元都通过换流器接入, 当直流线路上任何一点发生接地故障时, 与之相连的换流器出口电容都会向故障点放电, 造成直流电压的迅速下降, 影响相关设备的使用。

3) 缺乏直流断路设备。与交流相比, 直流电流没有自然过零点, 灭弧困难得多, 消弧需要更大的空间, 控制也更加复杂。目前可商业应用的直流断路器容量有限且价格昂贵。没有低成本可商业应用的大容量直流断路器和缺乏工程实际运行经验是直流配电系统保护设计面临的挑战。

而导致上述问题的关键在于: 用于直流电网的 AC/DC 换流器为电压源型换流器, 直流侧短路相当于对电压源的短路。换流器本身没有任何控制手段, 导致了短路故障对直流系统造成巨大的冲击; 传统 VSC 换流器反并联二极管为短路点提供短路电流, 只能通过跳开交流侧断路器清除短路故障, 加长了故障处理与恢复运行的周期。

直流保护作为电网稳定运行的第一道屏障, 必须达到以下性能要求:

1) 可靠性: 可靠性是对继电保护最根本的要求。继电保护在不需要它动作时可靠不动作, 即不发生误动; 而在规定的保护范围内发生了应该动作的故障时必须可靠动作, 即不拒动。继电保护的误动作和拒动作都会给电力系统带来严重危害。

2) 速动性: 速动性是指继电保护装置应能尽快地切除故障, 以减少设备及用户在大电流、低电压运行的时间, 降低设备的损坏程度, 提高系统并列运行的稳定性。

3) 选择性: 选择性就是指当电力系统中的设备或线路发生短路时, 其继电保护仅将故障的设备或线路从电力系统中切除, 当故障设备或线路的保护或断路器拒动时, 应由相邻设备或线路的保护将故障切除。

4) 灵敏性: 灵敏性是指电气设备或线路在被保护范围内发生短路故障或不正常运行情况时, 保护装置的反应能力。能满足灵敏性要求的继电保护, 在规定的范围内故障时, 不论短路点的位置和短路的类型如何, 以及短路点是否

有过渡电阻，都能正确反应动作。

5) 经济性：低压直流配电中使用的继电保护和高压直流输电不同，必须要充分考虑成本限制，否则直流配电的技术就很难被广为采用，尤其在民用领域。

以上 5 个基本要求中前 4 个是传统继电保护的基本要求，同样适用于直流配电。而“经济性”是中低压直流配电技术推广中必然面临的重要问题。直流配电技术的优越性，最终是需要通过“经济”指标来量化的，也决定着用户最终选择的技术方案。上述 5 个要求是设计、配置和维护直流配电网继电保护的完整依据，又是分析评价继电保护的基础，是相互联系的，但往往又存在着矛盾。因此，在实际工作中，要根据直流配电网的结构和用户的性质，辩证地进行统一^[5]。

4.2 光储直柔系统保护类型

4.2.1 电流保护

4.2.1.1 电流速断

作为线路保护的主保护，用以快速切除金属性近端短路故障。这种保护没有延时性，它通过断路器的脱扣器实现。当通过线路的电流超过整定值时，保护立即出口使脱扣器马上动作，跳开断路器。整定值要比最大负荷冲击电流大，比最大短路电流小。

4.2.1.2 电流上升率保护

作为线路中远端的短路保护，主要用于切除大电流速断保护不能切除的电流较小的中、远端短路故障。

4.2.1.3 定时限过流保护

作为电流上升率保护的后备保护，通常该保护的电流整定值较小，一般按馈线最大负荷考虑，以达到切除远端短路故障的目的，其动作延时也较长，以避免负荷启动的时间。

4.2.2 电压保护

4.2.2.1 低电压保护

其作用和定时限过流保护一样，作为电流上升率保护的后备保护，一般与其它保护形式互相配合，不作为单独的保护使断路器跳闸。当发生故障时，直流输出电压迅速下降很多，当电压低于设定值时保护启动，在一定的延时时间内电压一直低于设定值，则低电压保护发出动作信号。

4.2.2.2 过电压保护

为了保护设备正常运行，以及电缆的绝缘老化问题，运行电压不能超过一定的限值，当电压超过限值后，根据实际情况发出告警或者跳闸指令。

4.2.3 热过负荷保护

其保护的目的是消除热过负荷故障，而非短路故障，其工作原理主要是根据线路的电阻以及流过的电流，计算出发热量。一般热过负荷分两段，当测量的温度超过正常值时先给出报警信号，当温度持续升高则发跳闸指令。

4.2.4 漏电流保护

漏电流保护可以检测供电线路对地绝缘是否发生损坏，及时发出警告，可以预防人员的触电风险，配合绝缘检测装置可以提高绝缘监测的准确性。直流系统常采用 B 型漏保实现 TN 接地方式下的直流漏电流的保护，当系统采用不接地方式时，则考虑通过绝缘监察或数字式保护实现。

4.2.5 逆功率保护

对于一些严禁反向送电的设备，此功能可以有效的控制功率潮流的流向，保证供电网络以及设备的安全稳定运行。直流系统逆功率保护可以通过规定电压电流方向，实现功率潮流方向的识别，再通过保护动作装置实现保护。

4.3 系统保护策略

4.3.1 保护策略概述

上述采用各类隔离装置的保护方案往往配合在一起形成综合保护方案：当故障开始时，先通过电力电子变换器的限流及故障保护功能对故障进行限制，以热磁式保护作为后备保护；也可以以微机保护作为第一道屏障，配合其他后备保护。当故障清除后再进行重合闸，恢复正常运行。具体的保护策略配置如图 4-1 所示。

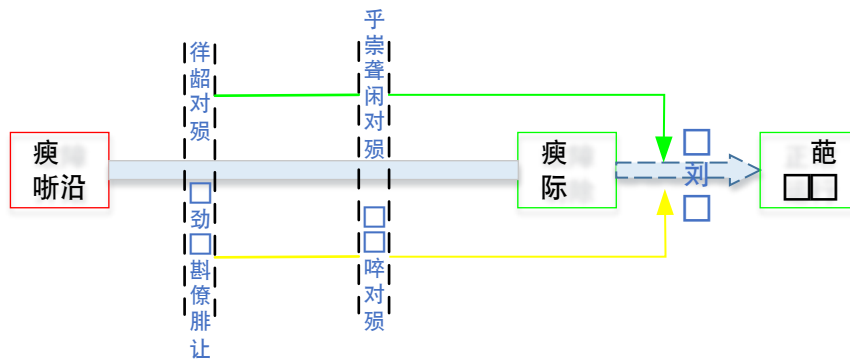


图 4-1 保护配合策略

此外，直流网络保护也可将主保护配置为行波保护和微分欠压保护，同时配置纵联差动保护作为后备保护。三种保护中任一保护动作后，其接下来的动作策略均为直流系统再启动，目的在于尽量减少直流系统的停运次数。在进行系统保护配置时，应重点考虑以下问题：

- (1) 满足直流配电网对快速性、选择性、可靠性和灵敏性要求的保护原理与方案；
- (2) 直流断路器、换流器等设备在故障处理及恢复方面的相互协调问题；
- (3) 故障情况下提升直流配电网健全部分生存能力的方法。

4.3.2 保护配置举例

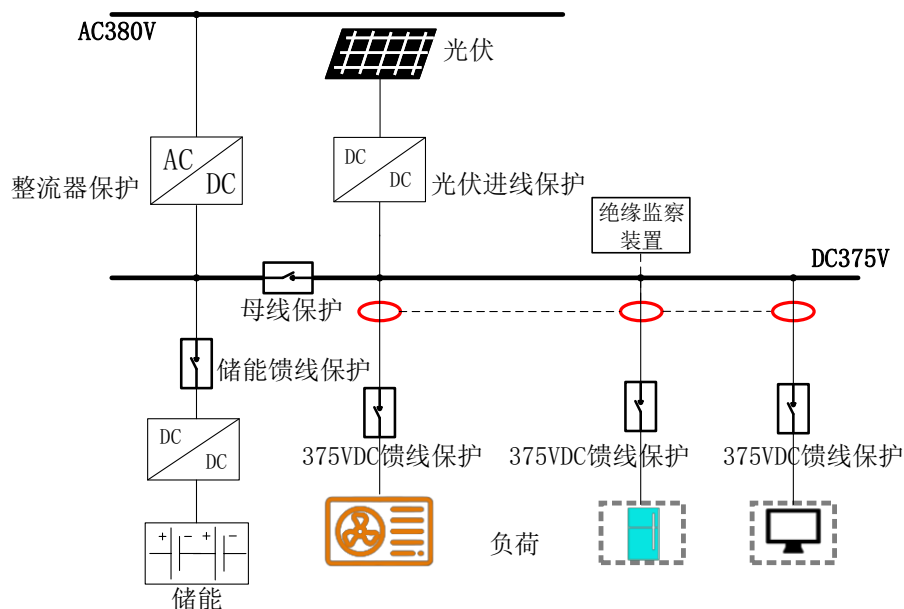


图 4-2 低压直流系统综合保护

如图 4-18 所示为低压直流系统综合保护方案总体示意图，本综合保护方案包括电源保护、母线保护和支路保护，其中电源保护包括整流器保护、储能单元保护、新能源发电保护，实现母线电能馈入的全方位保护；母线保护实现直

流母线的差动、过电压、欠电压、开关量联锁保护；支路保护包括负载短路保护以及支路绝缘下降保护；支路保护包括负载短路保护以及支路绝缘下降保护，从而实现母线电能馈出的全面保护；上述方案实现了低压直流系统的综合保护；

母线保护装置以数字信号处理器（DSP）为核心，融入信号变换、采样、计算、逻辑判断、执行输出及其他通信等辅助功能，可实现对母线电压、各开关量以及各支路电流信号的采集。，当差动保护动作时，母线保护装置切除所有馈入馈出线开关，其余保护则只发报警信号；母线差动保护是将母线上所有的各连接元件的电流互感器按同名相、同极性连接到差动回路，电流互感器的特性与变比均应相同。正常运行时，母线保护装置采集各个支路的电流信号，当电源注入电流与支路馈出电流平衡时，应满足 $\sum I=0$ ；当出现短路故障时，电流出现异常，装置发出跳闸信号将所有支路切除。电压保护采集母线电压，如发生过压或者欠压则发出报警信号。母线保护为后备保护，只有在其他保护失效时母线保护才会动作。

电池组放电控制单元主体结构为智能断路器配合电动操作机构，采用变送器实时检测母线电压、电池电压、电池放电电流的大小及变化情况，当检测到电池放电异常时，控制中心输出跳闸信号给电动操作机构，在 12ms 以内切断放电回路，实现电池组放电故障的快速保护。

支路保护包括负载短路保护以及支路绝缘下降保护，其中负载短路保护采用短路保护装置闭锁实现故障负载的切除，保护动作时间在 1ms 以内；绝缘下降保护采用绝缘电阻监测装置，装置采用高精度漏电流传感器进行支路漏电流检测，根据漏电流检测结果可以进行绝缘下降选线，可实现包括母线在内的最多 32 路不同回路绝缘电阻的检测以及绝缘下降时的报警。

5 建筑光储直柔系统内关键设备选型开发及直流负荷设计

光储直柔系统内的关键设备包括电力电子变换设备、保护测控装置以及直流负荷等，如图 5-1 所示。

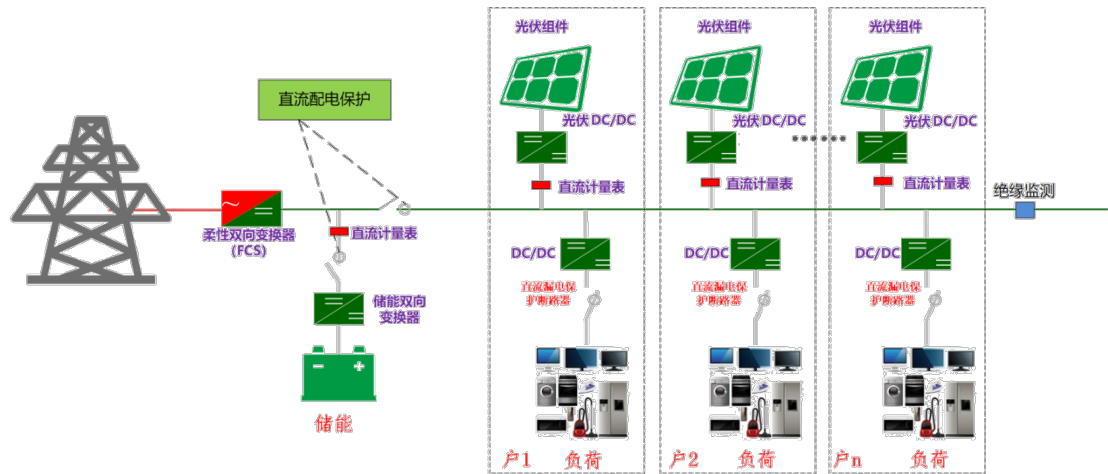


图 5-1 光储直柔系统主要设备示意

5.1 电力电子变换设备

5.1.1 AC/DC 变换装置

5.1.1.1 柔性双向变换器

柔性并网装置通过三相全桥变换器，实现整流与逆变。整流输出经 EMC 滤波器滤波后注入直流母线。逆变输出经滤波器滤波形成正弦波电压，再由三相变压器隔离升压后并入电网发电。通过协调控制可实现包括稳压、PQ 控制和 VF 等运行模式及其切换。双向变流器内部的主电路原理如图 5-2 所示，装置样机如图 5-3 所示。

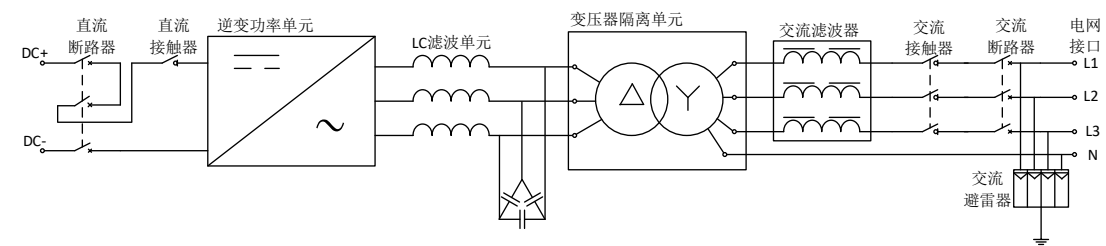


图 5-2 柔性双向变换器原理图



图 5-3 柔性双向变换器样机

装置的关键技术参数如表 5-1 所示。

表 5-1 柔性双向变换器关键参数

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				
1	工作电压范围	DC500V-820V		
2	最大输出直流电流	500A/800A/1000A		
交流侧参数				
1	最大过载率	10%（不小于 1min）	额定功率下的功率因数	>0.99
2	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
3	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				
1	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		
2	交流保护	过压保护、欠压保护、过流保护、短路保护		
3	模块温度保护	具备		

5.1.1.2 整流设备

直流侧和交流侧通过 AC/DC 整流变换器连接，可实现交流侧向直流侧的整流供电，当前的充电机也多采用整流方式进行电池组充电。整流采用维也纳整流变换器，整流器电路结构简单，开关管数量少，同等输出电压情况下，能有效地降低开关管的电压应力，如图 5-4 所示。

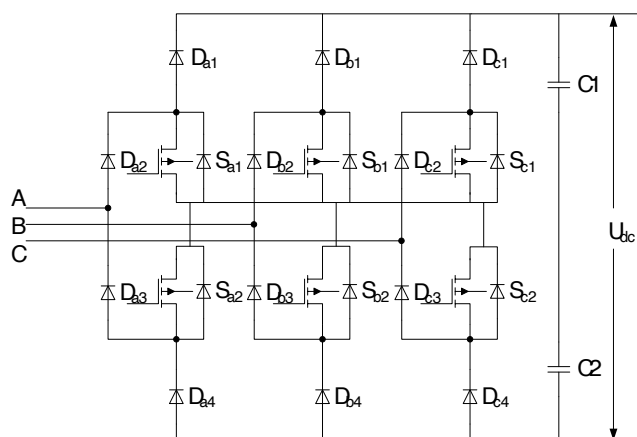


图 5-4 维也纳整流拓扑

当前部分整流装置的关键技术参数如表 5-2 所示。

表 5-2 整流器关键参数

序号	项 目	参数指标			
直流输出					
1	额定输出电压	DC220V	DC375V	DC540V	DC750V
2	额定输出电流	50A	30A	20A	15A
3	输出电压范围	DC198V～242V	DC350V～400V	DC500V～600V	DC720V～780V
4	限流可调范围	10%～110%可调			
5	稳压精度	≤±0.5%			
6	均流不平衡度	≤±5%（额定电压额定负载下）			
7	效率	≥93%			
交流输入					
1	额定输入电压	AC380V			
2	输入电压范围	AC304~437V			
3	输入电流	<40A			
4	输入保护	熔芯			
保护特性					
1	输出过压保护	具有			
2	输出欠压保护	具有			
3	过温保护	具有			
4	输入过压保护	具有			
5	输入欠压保护	具有			
6	输出短路保护	具有			

7	故障隔离功能	具有
通讯和告警		
1	通讯接口	RS485
2	最大并联数量	6 台
3	警报和状态通过 CAN 通讯口上告监控，一个面板 LED 指示，显示屏显示，干接点输出	

5.1.1.3 逆变设备

对于中大功率交流负荷，采用三相全桥型逆变设备，为保证系统运行的安全性，可通过隔离变压器实现负荷与系统的电气隔离，如图 5-5 所示。

对于小功率交流负荷，则采用单相全桥型逆变设备，单相全桥逆变设备的直流侧接直流 220VDC 母线，如图 5-6 所示。

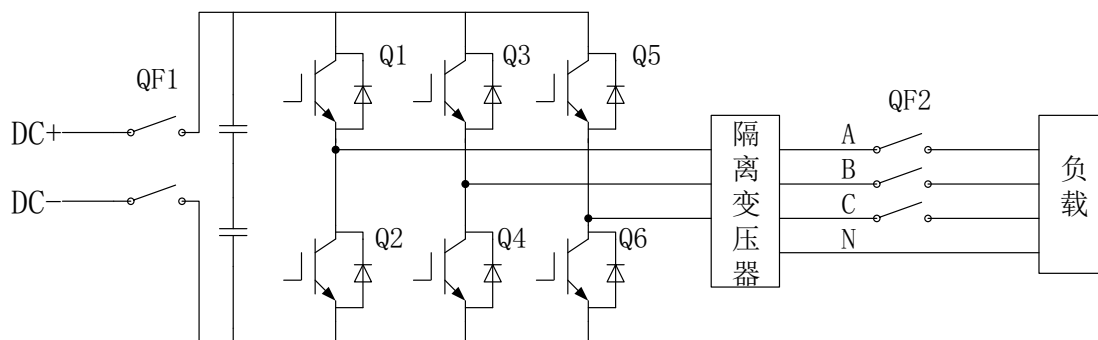


图 5-5 三相逆变拓扑

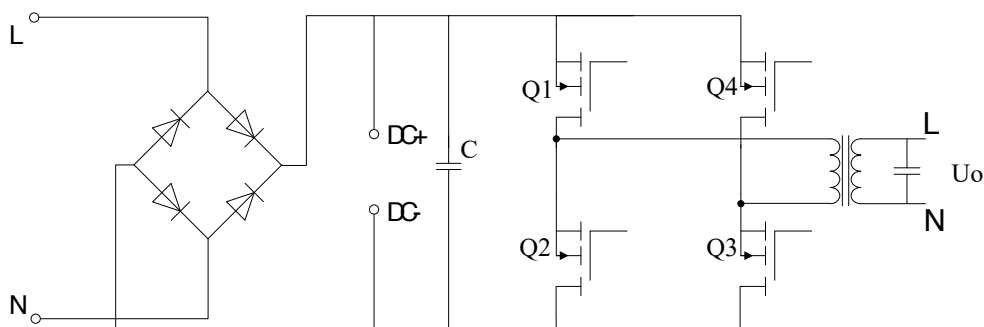


图 5-6 单相拓扑

5.1.2 DC/DC 变换装置

5.1.2.1 光伏 DC/DC

光伏 DC/DC 采用 boost 升压结构，配合 MPPT 实现光伏最大功率点跟踪，如图 5-7 所示。控制器中有三个控制部分，分别为最大功率跟踪部分、电压控制部分和电流控制部分，其中电压控制部分实现输出的精确限压，电流控制部分

实现输出电流的精确限流。图 5-8 所示为电压闭环的控制框图，图 5-9 所示为电流闭环的控制框图，电流控制部分与电压控制部分有着相类似结构，这两个部分是为了实现精确限压或精确限流。当变换器输入功率即光伏电池输出的最大功率无法满足负载需要时，将会出现输出反馈电压小于给定电压并且输出反馈电流小于给定电流，这时两个调节器都会快速的饱和。此时，开关管的 PWM 占空比的大小只取决于 PWM 寄存器输入的占空比，而这个占空比的大小由最大功率跟踪部分决定。最大功率跟踪模块采样光伏电池的输出电压和电流，并根据光伏电池的自身特性调节 PWM 占空比的大小，使得光伏电池工作在最大功率点^[6]。

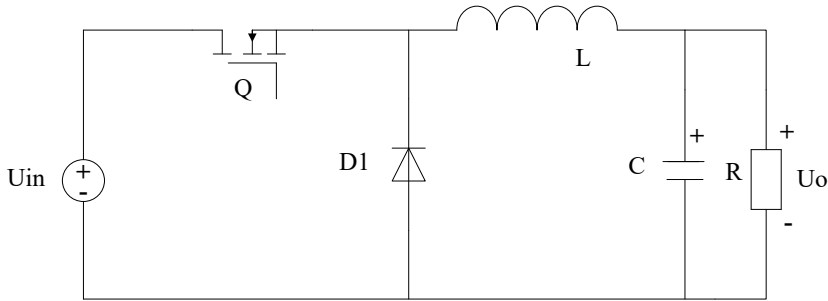


图 5-7 光伏升压拓扑结构

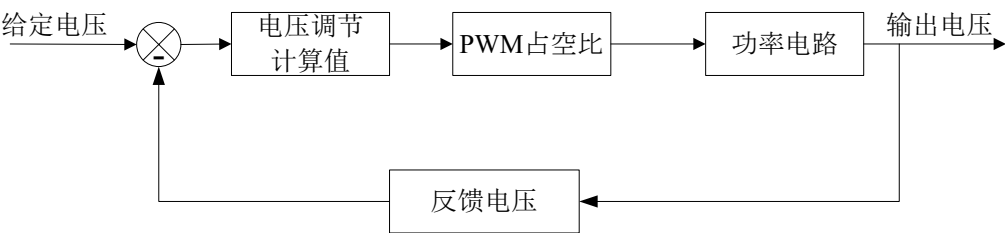


图 5-8 电压闭环的控制框图

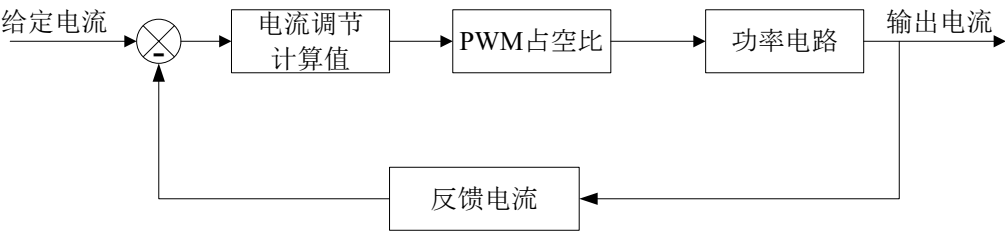


图 5-9 电流闭环的控制框图

不同类型的光伏 DC/DC 装置的关键技术参数如表 5-3 所示。

表 5-3 光伏 DC/DC 参数

序号	项目	适用 DC220V 母线	适用 DC375V 母线	适用 DC540V 母线	适用 DC750V 母线
输入侧参数					
2	额定输入电压	350.0V	300.0V	300	500.0V
3	输入电压范围	250V~420	200V~375V	250V~540V	425V~700V
4	最大电流	15A/50A/ 100A	80A	80A	80A
输出侧参数					
1	额定输出电压	220V	375V	550V	750V
2	输出电压允许范围	220V±10%	375V±10%	550V±10%	750V±10%
3	最大输出电流	16A	54A	36A	27A
4	最大负载功率	3.5kW/11kW/20kW	20kW	20kW	20kW
5	功率方向	单向	单向	单向	单向
7	稳压精度	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$
8	负载调整率	1%	1%	1%	1%
9	电压调整率	1%	1%	1%	1%
其它参数					
1	最大效率	97.50%	97.50%	$\geq 97\%$	97.50%
2	待机损耗	$\leq 30W$	$\leq 30W$	$\leq 30W$	$\leq 30W$
3	绝缘耐压	AC2500V	AC2500V	AC2500V	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	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	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	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	IP21	IP21	IP21	IP21
6	热绝缘等级	H 级	H 级	H 级	H 级

5.1.2.2 储能双向 DC/DC

储能双向变换器分别接于蓄电池组和直流母线之间，可以实现对蓄电池组的充放电管理控制，可采用隔离和非隔离两种方式。

隔离型以推挽移相全桥双向 DC/DC 变换器为例，其内部有高频隔离变压器、隔直电容、谐振电感、滤波电感、滤波电容、MOS 管以及其寄生二极管和寄生电容，高频变压器实现了原副边的电气隔离，同时实现了直流母线和蓄电池组的电气隔离，即直流母线的接地故障不能传递到蓄电池一侧，蓄电池组一侧的接地故障也不能传递到直流母线一侧，如图 5-10 所示。

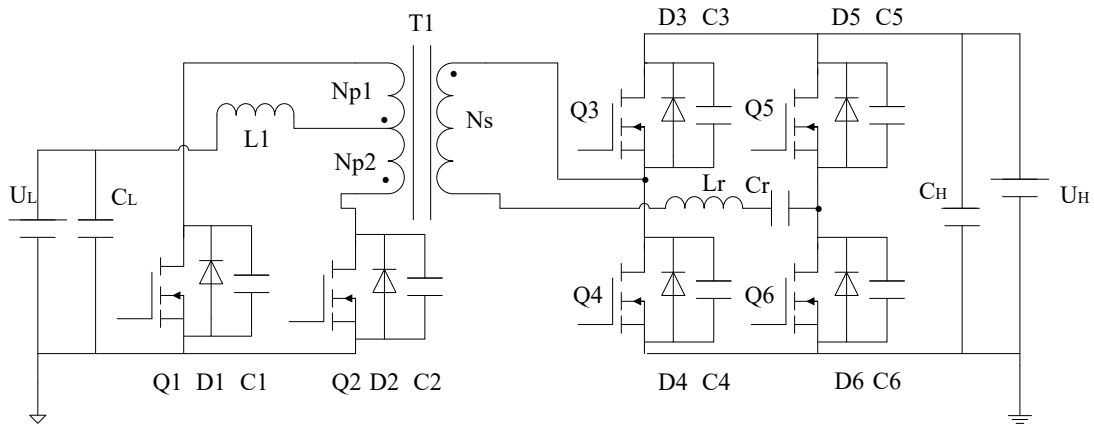


图 5-10 隔离型储能变换器拓扑

非隔离型以交错并联双向 buck-boost 储能变换装置为例，当 Buck 电路工作时，图中功率管 S1、S3 动作，续流二极管 D2、D4 续流，C1 和 C2 为缓冲电容。当 Boost 电路工作时，S2、S4 开关动作，D1、D3 续流，实现双向功率流动。两个模块电路开关器件导通信号错开 180° ，电感总谐波电流的频率提高 1 倍，纹波率大大下降，如图 5-11 所示^{[7][8][9]}。

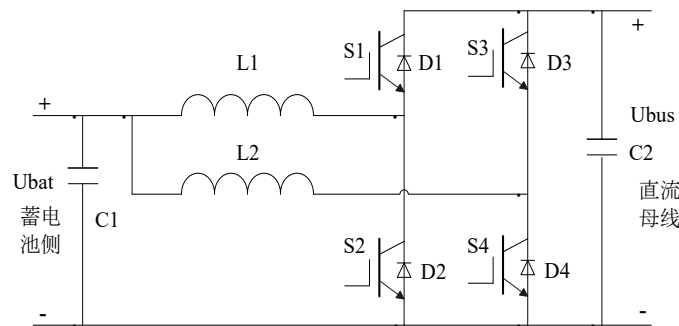


图 5-11 非隔离型储能变换器拓扑

不同类型的储能 DC/DC 装置的关键技术参数如表 5-4 所示。

表 5-4 储能 DC/DC 参数

序号	项目	适用 220V 母线	适用 375V 母线	适用 540V 母线	适用 750V 母线
1	高压侧电压	150V~260V	286V~412V	450V~650V	650V~850V
2	低压侧电压	45V~108V	180V~286V	220V~412V	405V~607.5V
电气特性					
低压侧参数					
1	额定功率	3500W	11000W	20000W	20000W
2	额定电压	72V	220V	375V	500V
3	额定电流	50A	50A	54A	40A

4	最大输出电压	108V	286V	412V	607.5V
5	输入电压范围	180V~260V	180V~300V	220V~412V	405V~607.5V
6	电压纹波	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$
7	稳压精度	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$
高压侧参数					
1	额定功率	3500W	11000W	20000W	20000W
2	额定电压	220V	375V	500V	750V
3	额定电流	16A	30A	40A	27A
4	最大输出电压	230V	400V	600V	800
5	输入电压范围	45V~100V	286V~412V	450V~650V	650V~850V
6	电压纹波	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$
7	稳压精度	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$	$\leq 0.01 \times U_{\text{额定}}$
电气保护特性					
1	高压侧过压保护	300V	420V	650V	850V
2	高压侧欠压保护	140V	300V	450	650V
3	高压侧过流保护	20A	36A	50A	32A
4	低压侧过压保护	150V	420V	700V	850
5	低压侧欠压保护	45V	180V	220V	405V
6	外壳防护等级	IP21	IP21	IP21	IP21
7	热绝缘等级	H 级	H 级	H 级	H 级

5.1.2.3 其他 DC/DC

其他类型的 DC/DC 包括升压型、降压型等实现光储直柔系统中不同电压等级之间的转换，部分产品的技术参数如表 5-5 所示。

表 5-5 其他类型 DC/DC 参数

序号	项 目	参数指标				
直流输出						
1	额定输出功率	7.5kW	11kW	11kW	6kW	7.5kW
2	额定输出电压	DC375V	DC220V	DC220V	DC540V	DC750V
3	额定输出电流	20A	50A	50A	11A	10A
4	输出电压范围	DC350V~400V	DC198V~242V	DC198V~242V	DC500V~600V	DC720V~780V

5	限流可调范围	10%~110%可调				
6	稳压精度	$\leq \pm 0.5\%$				
7	稳流精度	$\leq \pm 1\%$				
8	均流	$\leq \pm 5\%$				
9	效率	$\geq 93\%$				
直流输入(可以来自直流电源或光伏发电)						
1	额定输入电压	DC375V	DC500V	DC750V	DC500V	DC475V
2	输入电压范围	DC300V~425V	DC450V~600V	DC600V~850V	DC600V~650V	DC400V~700V
3	输入电流	$< 30\text{A}$				
4	输入保护	熔芯、断路器				
直流保护						
1	输入/出过压保护	具有				
2	输入/出欠压保护	具有				
3	冲击电流	$1.2I_N(0.5\text{s})$				
4	过温保护	具有				
5	输出短路保护	具有				
6	输出限流功能	具有				
7	故障隔离功能	具有				
通讯和告警						
1	通讯接口	RS485				
2	最大并联数量	6 台				
3	警报和状态通过 RS485 通讯口上告监控，三个面板 LED 指示，显示屏显示					

5.2 保护测控装置

针对光储直柔系统的保护，按照被保护对象的划分，可以把光储直柔系统保护装置分为以下几类^[10]：

1) 母线保护装置：适用保护对象为低压直流母线。保护种类包括差动、过电压、欠电压、开关量联锁等保护。母线保护装置目前多采用微机保护。母线保护装置和绝缘降低与接地保护装置可以在实践中合二为一。

2) 线（支）路保护装置：适用保护对象为各种馈线（支路）、联络线（支路），含储能和电源分支。保护种类包括电流速断、电流上升率、电流增量、过

流、电流积分、逆功率、过电压、欠电压、合闸自检、开关量联锁等保护，根据支路性质选配。值得注意的是：为简化保护配置，低压直流系统中的变换器和开关设备由于本身具有一定的自我保护的能力，不再单独配置保护。

3) 绝缘降低与接地保护装置：使用整个低压直流配电网网络，保护种类有正/负极绝缘降低、正/负极接地、交流窜入等保护。

就保护装置而言，数字式保护装置是目前广为接受的继电保护设备存在形态，它以微型处理器或数字信号处理器（DSP）为核心，融入信号变换、采样、计算、逻辑判断、执行输出及其他通信等辅助功能，实现对电力系统的故障预警及快速隔离功能。考虑到低压直流配电系统的实际施工工况和运行维护水平，宜采用一二次融合方式，但其设计中需要重点解决抗干扰和防雷保护等问题。

5.2.1 母线保护

母线保护装置采集各个支路的电流信号以及断路器状态信号，当电源注入电流（母线保护装置进线侧）与支路馈出电流平衡时，应满足 $\sum I=0$ ；当支路出现短路故障时，电流出现异常，母线保护装置发出跳闸信号将所有支路切除，即所有支路断路器断开；同时母线保护装置采集直流母线电压信号，当发生过压或者欠压，母线保护装置发出报警信号。母线保护为后备保护，只有在其他保护失效时母线保护才会动作。母线差动保护是将母线上所有的各连接元件的电流互感器按同名相、同极性连接到差动回路，电流互感器的特性与变比均应相同。母线保护装置配置示意图如图 5-12 所示。

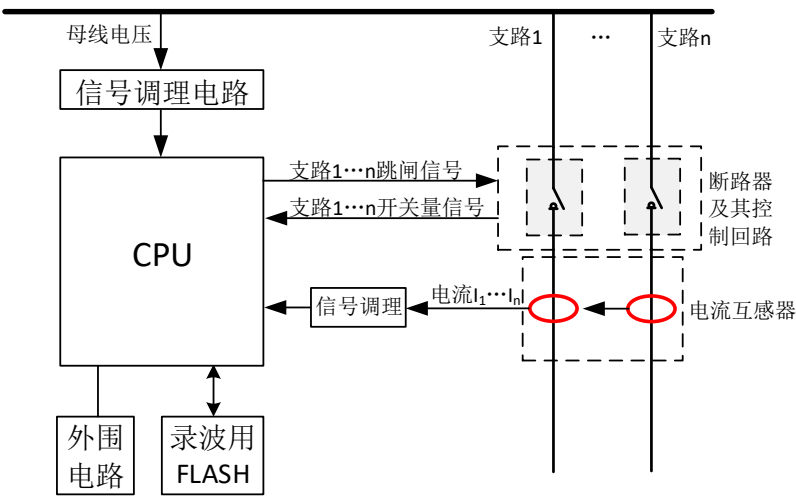


图 5-12 母线保护装置配置示意

直流配电母线保护测控装置具备完善的保护、测量、控制、控制与监视功能，能够在直流系统发生故障和异常时，在最短的时间和最小区域内，自动从系统中切除故障设备，向电力监控警报系统发出信息，提醒电力维护人员及时解决故障。

直流配电母线保护测控装置在有效防止设备损坏的同时，还能降低相邻地区供电受连带故障的几率，避免电力系统因种种原因而产生时间长、面积广的停电事故，有力保障光储直柔系统的安全稳定运行。

主要保护功能：

- 1) 正方向、反方向、不带方向电流速断保护
- 2) 母线电流差动保护
- 3) 正方向、反方向、不带方向低压闭锁过流保护
- 4) 过电压保护
- 5) 低电压保护
- 6) 合闸自检保护
- 7) 开入量联锁保护

5.2.2 交直流线路一体化保护

交直流线路保护一体化装置可实现交流线路保护与直流线路保护于一体，可支持多路交流线路以及直流线路保护，每一路均具备完善的测量、控制与监视功能，为中低压交直流混合配电的保护与控制提供了完整的解决方案，可有力地保障中低压交直流混合配电网的安全稳定运行。

主要功能：

1) 交流侧

频率保护、带方向电流速断保护、带方向电流积分保护、带方向低压闭锁过流保护、带方向过负荷热保护、逆功率保护、过电压保护、低电压保护；

2) 直流侧

母线差动保护、带方向电流速断保护、带方向电流上升率保护、带方向电流增量保护、带方向电流积分保护、带方向低压闭锁过流保护、带方向过负荷热保护、逆功率保护、过电压保护、低电压保护、接地漏电流检测、开入量保护。

5.2.3 支路保护

5.2.3.1 一体化直流配电单元保护

一体化直流配电单元是一类直流配电保护测控装置，主要用于直流进线和直流馈线的各种故障保护跳闸和告警。直流断路器是直流配电系统中重要设备，是故障跳闸和隔离的执行机构，本装置采用直流断路器，通过控制励磁脱扣器使断路器断开和电动操作机构进行故障合闸恢复运行，基于一体化配电单元的直流配电系统，可以达到直流配电保护要求的快速、可靠、灵敏、准确动作要求，实现电流保护、电压保护、接地漏电流保护、过负荷热保护、逆功率保护以及开入量联锁保护等功能。一体化直流配电单元如图 5-13 所示^[11]。



图 5-13 一体化直流配电单元

5.2.3.2 变换器主动式保护

主动保护，即基于电力电子变换器的拓扑结构和控制原理，将保护动作“融入”变换器控制逻辑，基于多重保护策略，有效利用电力电子变换器的隔离单元和电力电子器件来实现直流配电系统中多种故障的自然隔离和严重故障回路的开断，防止轻微故障发展为严重故障，最大限度保障系统正常运行^[12]。

同时，主动保护基于电力电子器件的自保护功能，还可实现过压保护、欠压保护、过流保护、过温保护等功能，无论在分布式发电侧、母线、负载侧发生上述故障时，保护均会优先动作，在 μs 级时间内闭锁电力电子器件，停止功率输出，有效避免故障范围扩大。图 5-14 为主动保护功能图。

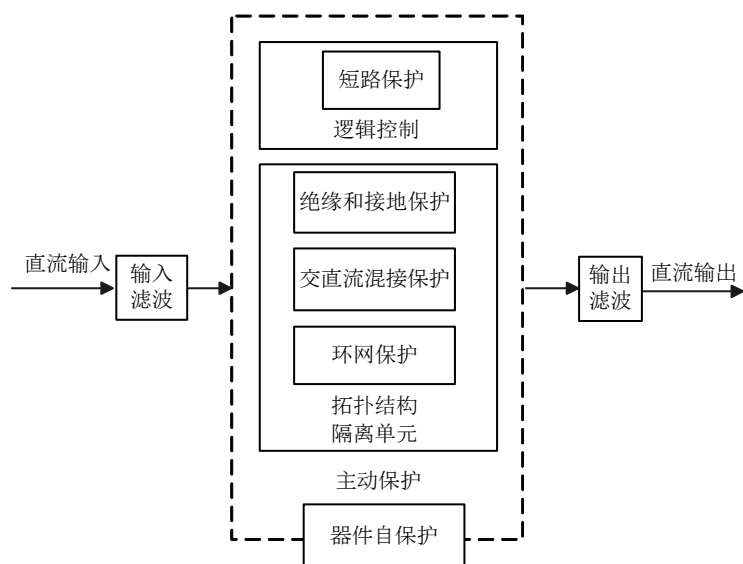


图 5-14 主动保护功能框图

结合前文的故障分析，主动保护可分为主动式短路故障保护、主动式接地故障保护、主动式绝缘下降报警、主动式直流环网保护、主动式交直流混接保护，如表 5-6 所示。

直流配电的基本拓扑结构有基于单母线的配电系统，还有环状、放射状、两端配电等。无论采用哪种结构，都存在 DC/AC、DC/DC 变换器，用来连接分布式发电、储能和多类型负荷。

表 5-6 主动保护的组成

组成部分	实现方式	保护效果
短路故障保护	器件逻辑控制	数百 μs 内切断短路电流
接地故障保护	变换器的隔离单元	主动隔离接地故障，将故障限制在故障支路，系统可正常运行
绝缘下降	绝缘监测	快速报警
环网保护	变换器的稳压功能	允许 I 段正-II 段正、I 段负-II 段负、I 段正负-II 段正负环网运行
交直流混接	变换器隔离单元	主动隔离交流电源，将交流电源限制在故障支路，系统可正常运行

保护装置的基本原理如图 5-15 所示，其内部包括单片机控制电路、故障检测电路和隔离单元，隔离单元又包括 DC/DC 全桥变换器和高频变压器^[13]。

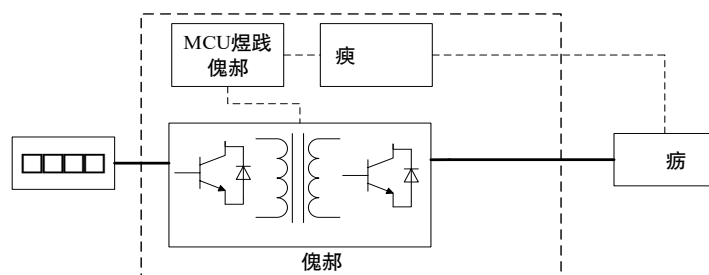


图 5-15 保护装置原理示意图

隔离型变换装置对于不同的接地方式可以采用灵活的配置，比常规变换器具有更好的故障保护能力。通过 PWM 信号控制 DC/DC 全桥变换器中电力电子开关的通断来实现短路保护功能。当直流系统中某条直流馈线发生短路故障，短路保护可以有效防止短路故障传播到直流母线及其他馈线，将故障控制在一定的范围内。根据保护装置在系统内的位置差异，可将保护原理进行合理配置，位于末端支路的保护装置可采用电流变化率保护以实现保护的快速性，变化率定值可以按式（5-1）进行计算。

$$\frac{di}{dt} = \frac{E_0 - i_0 R}{L} \quad (5-1)$$

式中： E_0 为支路正常运行电压； i_0 为支路正常运行时的电流； L 为线路电感。

该方案能准确地检测和定位直流短路故障，并能在电流暂态早期清除故障。然而该方案对于测量采样的时效性要求较高，如果采样出现延迟，可能错过电流瞬时上升阶段，导致误判，保护拒动。为防止此类情况出现，一方面可以提高采样频率，另一方面则可增加电压电流整定值判据，如图 5-16 所示。

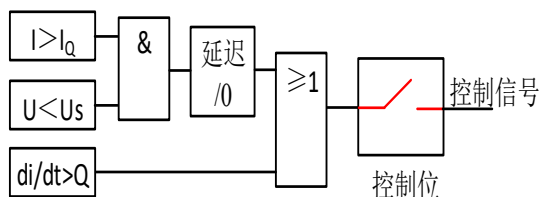


图 5-16 冗余式保护策略

此外，当需要满足选择性时，可选择电流增量保护，对保护整定值和延时整定值进行设定。

5.2.4 绝缘监测及漏电保护

5.2.4.1 绝缘监测

当前的绝缘电阻检测电路主要分为三种：平衡电桥检测法、不平衡电桥检测法以及低频交流检测法。平衡电桥检测法优点是不受接地电容影响，检测速度快；缺点是无法测量正负极平衡接地；不平衡电桥优点是可以检测任何形式的接地，缺点是检测速度相对慢，且检测精度受接地电容影响；低频交流检测法是采用向直流母线注入低频交流信号进而检测低频电流或电压大小的方法来判别直流母线接地电阻。以不平衡电桥法为例，绝缘监测装置定时检测支路对地绝缘电阻和监测接地情况，进行绝缘下降和接地报警，并通过支路对地电压

的波动情况及变化趋势来判断直流系统是否发生非正常的电压连接。不平衡电桥接地监测原理图如图 1 所示。其中 R_+ 、 R_- 分别为支路正、负极对地电阻， R_1 、 R_2 为检测电阻， $R_1 = R_2$ 。

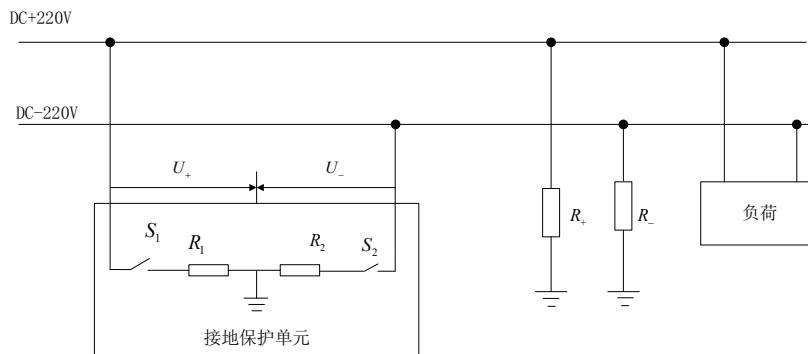


图 5-17 支路的不平衡电桥接地监测原理图

闭合开关 S_1 ，断开开关 S_2 ，设置一定的时间延时，待测量值稳定后再进行测量，支路正、负极对地电压的测量值分别为 U_{1+} 、 U_{1-} ，则：

$$\frac{U_{1+}}{R_1 // R_+} = \frac{U_{1-}}{R_-} \quad (5-2)$$

断开开关 S_1 ，闭合开关 S_2 ，设置一定的时间延时，待测量值稳定后再进行测量，支路正、负极对地电压的测量值分别为 U_{2+} 、 U_{2-} ，则：

$$\frac{U_{2+}}{R_+} = \frac{U_{2-}}{R_2 // R_-} \quad (5-3)$$

联立式(1)和(2)可得：

$$R_+ = \frac{R_1(U_{1-}U_{2+} - U_{1+}U_{2-})}{U_{1+}U_{2-} + U_{1-}U_{2+}} \quad (5-4)$$

$$R_- = \frac{R_1U_{1-}(U_{1-}U_{2+} - U_{1+}U_{2-})}{U_{1+}(U_{1-}U_{2+} + U_{1-}U_{2-})} \quad (5-5)$$

当 R_+ 、 R_- 其中的一个值偏离正常值时，即可判定出相应的绝缘下降的极性以及绝缘下降电阻的大小。

5.2.4.2 直流漏电保护

目前的 RCD 大都以检测交流剩余电流为主，常见的包括 AC 型、A 型、F 型和 B 型，其中 B 型具备相关直流分量检测功能，但是受限于较高的技术门槛和价格因素，在直流系统中应用推广难度较大。因此亟需开发一种适应直流系统的剩余电流保护器。

本项目提出一种直流剩余电流保护技术方案，采用绝缘监测配合漏电保护的方式实现直流漏电保护，绝缘监测装置安装于母线侧，直流剩余断路器安装于各条支路^[14]。

根据上述方案设计研制的装置如图 5-18 所示，其技术参数如表 5-7 所示。

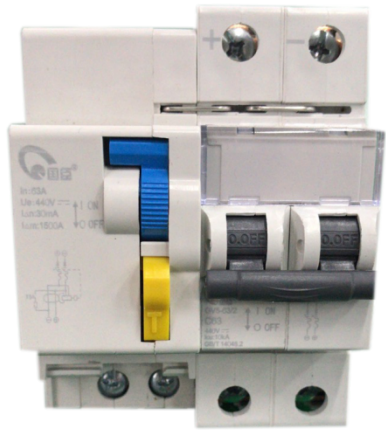


图 5-18 直流剩余电流保护技术方案

表 5-7 直流剩余电流保护技术方案

项 目		参数指标
断路器类型	RCD-401/YA	RCD-402/YA
额定电压	DC400V	
额定电流	6A～63A	
保护剩余电流	30mA	
保护动作	跳闸	告警
保护时间	< 0.1s	

RCD-401/YA 系列断路器：由剩余电流检测驱动部分及断路器本体组成，在剩余电流保护动作时，驱动断路器跳闸，达到隔离故障的目的；

RCD-402/YA 系列断路器：由剩余电流检测驱动部分、辅件及断路器本体组成，在剩余电流保护动作时，驱动辅件动作，输出告警辅助触点，断路器本体依然处于合闸状态。

该直流漏电保护器覆盖传统漏保所有漏电保护类型，如表5-8所示。可实现的漏电流保护范围在30mA～150mA之间，保护时间应<0.1s。

表 5-8 直流漏保保护类型

漏电电流类型	AC 型 	A 型 		B 型 			直流漏保 	
	√	√		√			√	
	×	√		√			√	
	×	√		√			√	
	×	√		√			√	
	×	×		√			√	

5.3 系统监控管理平台

系统主要硬件功能及实现方式如下^{[15][16]}：

(1) 干线监测：通过电力电源监控模块主要监测交流侧、直流侧电压以及交直流母线运行状态，采集到的数据通过485总线传输至通讯管理机；

(2) 变换器监测：主要监测整流模块、光伏变换模块、储能变换模块、DC/DC降压模块等，监测信息通过485总线传输至通讯管理机；

(3) 保护监测：监测一体化配电单元运行状态、主动式保护单元运行状态、交流侧断路器工作状态、直流侧母线绝缘状态等，监测信息通过485总线传输至通讯管理机；

(4) 储能管理系统：储能运行状态监测，并监测每一节电池的工作状态，监测信息通过485总线传输至通讯管理机；

(5) 数据计量：统计种类包括交流侧电量、直流侧电流，其中直流侧电量包括整流电量、光伏发电量、整流放电量、负荷用电量；时间尺度包括实时计量、日电量、周电量、月电量、年电量。

在实现上述硬件功能的基础上，对系统软件功能进行了设计，具体如下：

(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，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 显示：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 遥信：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 遥测：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 遥调：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。

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。

运营管理系统的主界面如图 5-19 所示。左侧第一个框图内是展示电网、光伏、储能和交直流负载的日电量、周电量以及月电量的数据，可以清晰地查询源、储、负荷的能耗情况；第二个框图是年用电量的占比，用饼图显示可以很清晰地看出电网和光伏、储能充放电以及交直流负荷地电量多少对比；第三个

框图是以柱状图的形式展示月电量和年电量的统计数据。右侧第一个框图的拓扑图主要展示网侧、光伏、储能和负载的电力参数，加上流动的动态效果可以观察到能量流动的趋势和整个系统大致的运行情况；右侧第二个框图是功率曲线图，可以观察一段时间内各个节点的功率变化以及母线电压的波动。

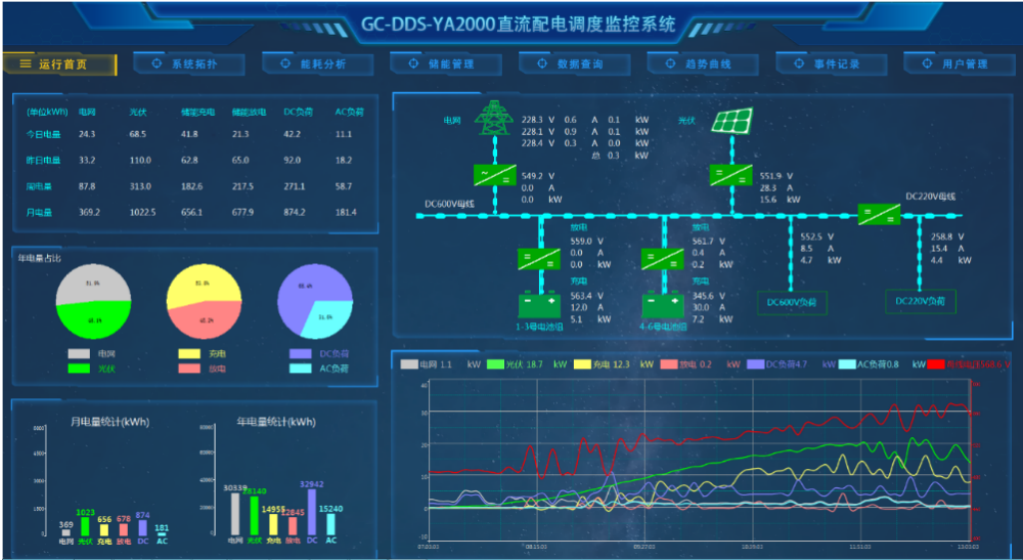


图 5-19 系统主界面

点击进入“系统拓扑”界面，如图 5-20 所示，可以查看整个系统的每个进线及馈线的具体参数，包括每个装置的电压电流等基本参数，每台光伏模块的输出，六台储能变换器的充电和放电数据，开关的分合状态等；



图 5-20 系统拓扑图

点击“能耗分析”，进入能耗分析分图。图 5-21 系统能耗分析图 1 是对日电量、昨日电量、周电量、月电量、年电量以及总电量的对比分析，以柱图和

饼图直观地展示各节点数据对比。图 5-22 能耗分析图 2 是记录光伏的每日每月和每年发电量，方便查询和分析新能源在直流配电中的使用情况。



图 5-21 系统能耗分析图 1

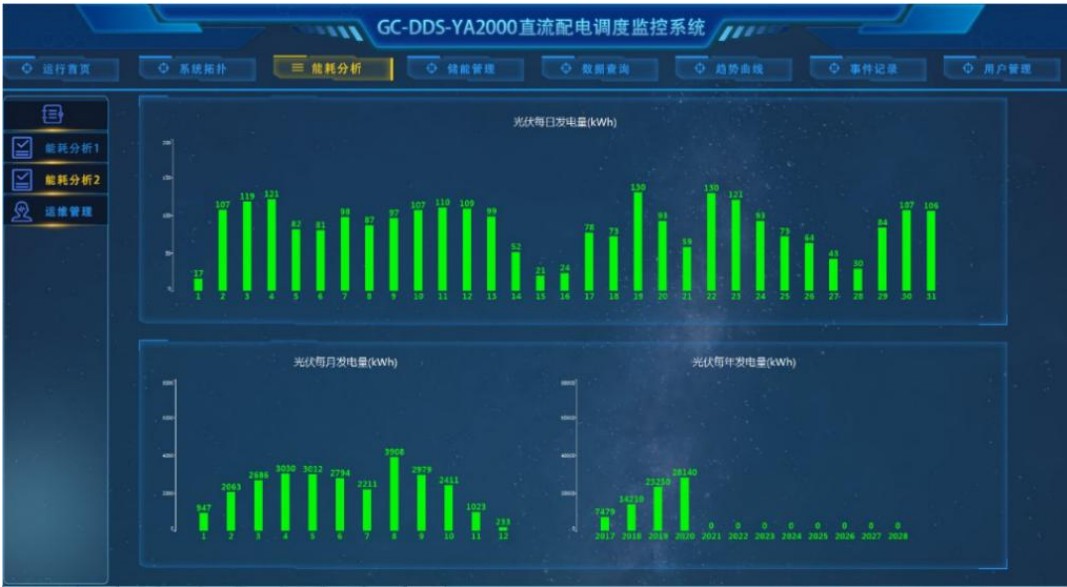


图 5-22 系统能耗分析图 2

点击“储能管理”，进入系统储能变换器管理界面。可以观察储能模块的输入输出以及运行情况，同时对这一路的每一节电池电压和总电压进行监测，分析是否有电池过压或者欠压，影响系统运行。由于六路电池基本类似，就不再切换到其他路介绍。可以点击左侧导航栏的储能电池 2 或者其他的界面查看相应的储能数据。



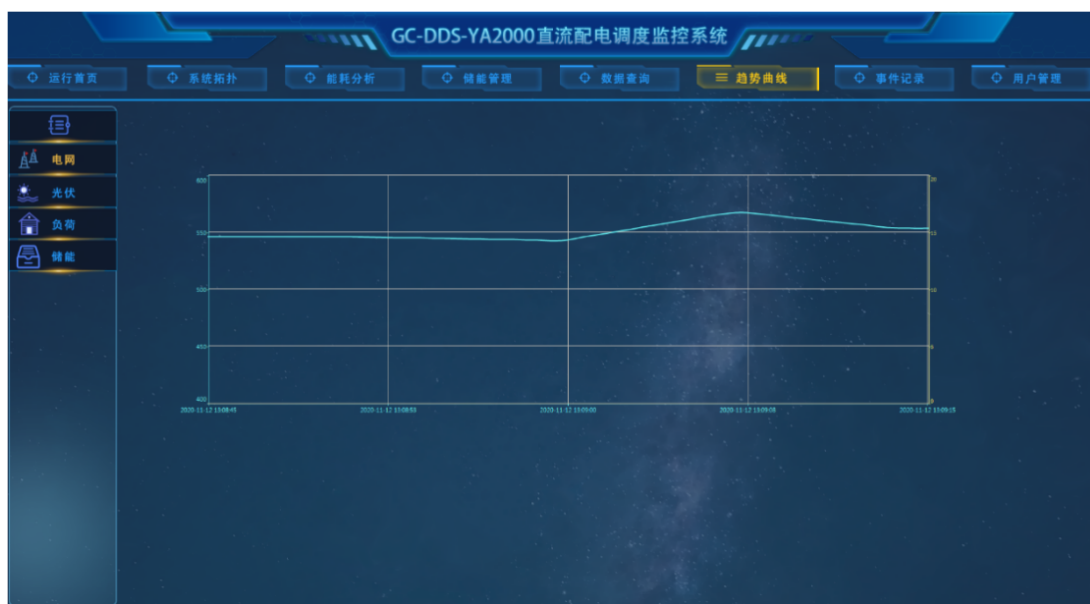
图 5-23 系统储能管理界面

点击“数据查询”，可以查询具体的整流变换器的参数，如图 5-24 所示，包括电压电流温度，以及是否有过压或欠压的情况。点击左侧导航栏还可以查看光伏变换器和直流变换器的数据，DC600V 和 DC220V 的负荷侧的保护模块的参数查询。温度管理页可以查看每个配电柜的温湿度及风机启动情况，电表的界面则是各个交流表和直流表的数据展示，方便对重要电气量进行查询。



图 5-24 数据查询界面

点击“趋势曲线”，如图 5-25 所示，可以查看电网、光伏、储能和负荷的电压及功率曲线，点击左侧导航栏进行切换。



点击“事件记录”，如图 5-26 所示，可以查询实时或者历史的告警记录，点击图中“实时告警”按钮可以切换至历史记录，查询遥信告警，方便管理维护系统运行。



图 5-26 时间记录

5.4 直流负荷

5.4.1 常规负荷及其分类

低压直流系统内涉及到的负荷通常包括工商业负荷以及家用电器。从供电原理上进行分类，可以分为以下几类负荷：

- (1) 整流桥类负荷: AC220V 交流经整流桥整为脉动的直流电, 此类负荷

可采用 DC220 直接供电；

(2) 电阻加热类负荷：交直流通用，但采用直流供电时应注意开断时的电弧问题；

(3) 调速电机类负荷：多采用变频器驱动，存在直流母线，DC220V 可直接通过直流母线给负载供电，对于中央空调，由于常规是三相整流，采用直流供电时对应的电压为 DC600V；

(4) 适配电源类负荷：此类负载多通过适配器或开关电源进行供电，将 AC220V 变换为 DC24V、12V 以及 5V，实际使用的直流电压较低，目前仍利用适配器中的整流桥实现交直流通用，后续可考虑对应相应的直流配电电压等级。

5.4.2 负荷直流化技术分析

交流在经过整流桥后变为直流，整流桥及电流流向如图 5-27 所示：

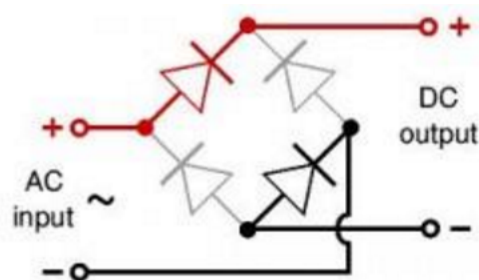


图 5-27 整流桥电路

当输入是交流电时，正半周通过二极管 D_1 和 D_3 与负载形成回路，电阻电压为上正下负；负半周通过二极管 D_2 和 D_4 与负载形成回路，电阻电压同样为上正下负，如图 5-28 所示。

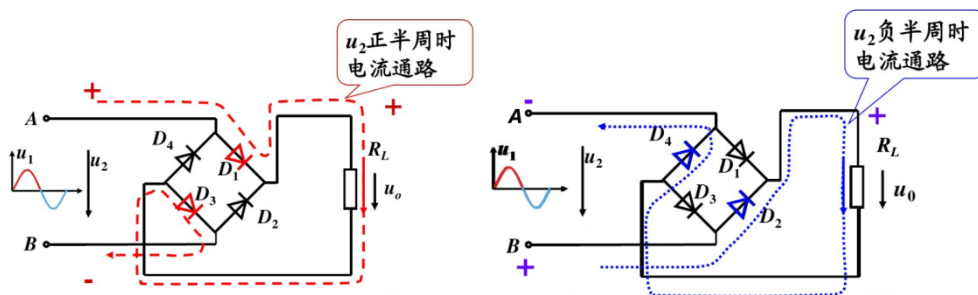


图 5-28 交流输入示意

输入是直流时，只有红色和黑色二极管导通，且此时这两个二极管相当于导线，灰色不导通。等效电路如图 5-29 所示。可见输入无论是交流或者直流，后级的输出总是为直流。

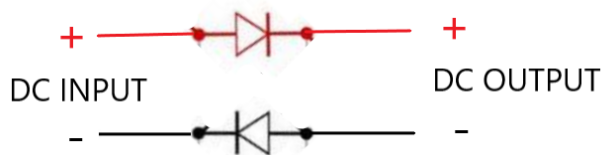


图 5-29 直流输入等效电路图

不同的是，交流输入后相当于将负半周翻转，成为“馒头波”，而直流输入时，二极管成为导线，输出仍为直流，且波形更好，电压值为交流输入的 $\sqrt{2}$ 倍。交流 150V 到 265V 对应的直流范围为 212V 到 375V，可见直流 220V 满足工作区间要求。

对于中央空调的三相整流也是类似，交流电经过三相整流的波形如下所示，可见输出电压 U_o 为脉动直流，在一个交流周期内直流输出电压含有 6 个馒头形纹波，其纹波最高值=539V，纹波最低值=467V，输出直流电压的平均值=515V。如加上滤波电容 C，轻负载（R 值较大）时，直流输出电压可达 539V，如图 5-30 所示。可见用直流 540V 供电合适：

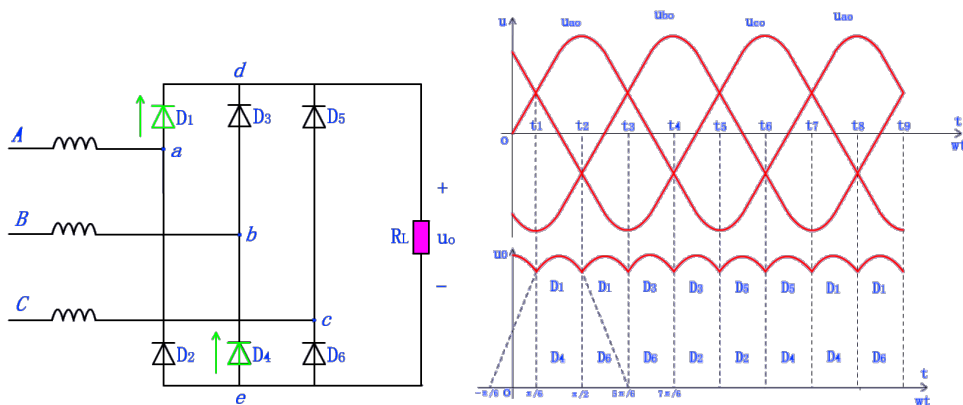


图 5-30 三相不控整流及其输出电压波形

5.4.3 主动灭弧技术

5.4.3.1 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 5-31 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 $R=25\Omega$ ， $L=200\mu\text{H}$ ， $C=940\mu\text{F}$ 。

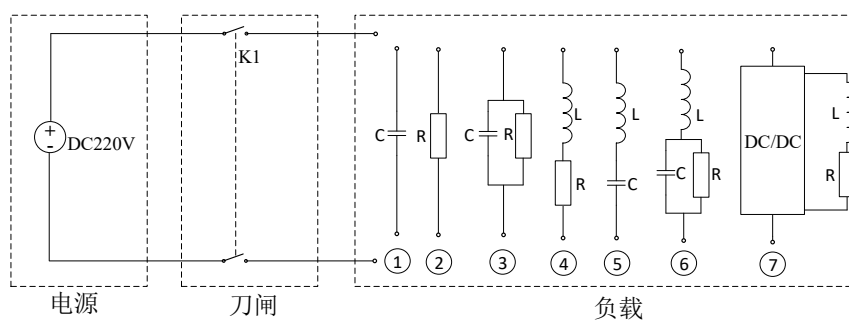


图 5-31 实验原理图

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 5-31 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 I_R ，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 $I = I_C + I_R$ ，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，有轻微的火光，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，有轻微的火光，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 5-32 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 5-32 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 5-9：

表 5-9 实验分组比较表

组合	负载 R=25 Ω , L=200uH, C=940uF	开关开断		开关闭合	
		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 5-9，通过电弧现象的实验，得出以下几点结论^{[17][18]}：

1) 不同的负载条件会影响着电弧现象的发生。电感在电路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。

5.4.3.2 主动灭弧技术开发

当前主流的灭弧方法包括以下种类:

(1) 速拉灭弧法

是开关电器中最基本的灭弧方法。高低压断路器中都装有强力的断路弹簧,目的就是加速触头的分断速度。

(2) 冷却灭弧法

利用介质如油等来降低电弧的温度从而增强去游离来加速电弧的熄灭。

(3) 吹弧灭弧法

利用外力如气流、油流或电磁力来吹动电弧,使电弧拉长,同时也使电弧冷却,电弧中的电场强度降低,复合和扩散增强,加速电弧熄灭。

1) 按吹弧的方向(相对电弧方向)分为纵吹和横吹。

2) 按施加外力的性质来分为气吹、油吹、磁力吹和电动力吹等。

(4) 开关电器中常用的灭弧方法

1) 长弧切短灭弧法:利用金属片(如钢栅片)将长弧切成若干短弧。当外加电压(触头间)小于电弧上的电压降时,电弧不能维持而迅速熄灭。低压断路器和部分刀开关的灭弧罩就是利用这个原理来灭弧的。

2) 粗弧分细灭弧法:将粗弧分成若干平行的细小电弧,增大了接触面,降低电弧的温度,从而使带电质点的复合和扩散得到加强,使电弧加速熄灭。

3) 狭沟灭弧法：陶瓷制成的绝缘灭弧栅使电弧在固体介质所形成的狭沟中燃烧，冷却条件改善，电弧与介质表面接触使带电质点的复合增强，从而加速电弧的熄灭。如有的熔断器在熔管中充填石英砂，就是利用狭沟灭弧原理。

4) 真空灭弧法：将开关触头装在真空容器内，产生的电弧（真空电弧）较小，且在电流第一次过零时就能将电弧熄灭。真空断路器就是利用这种原理来熄灭电弧的。

5) 六氟化硫（SF₆）灭弧法：SF₆ 气体具有优良的绝缘性能和灭弧性能，绝缘强度约为空气的 3 倍，而绝缘强度的恢复速度约比空气快 100 倍，可极大的提高开关的断流容量和减少灭弧所需时间。

上述灭弧方法虽然在一定范围和程度上可以实现电弧灭弧，但用于直流电器时存在体积大、结构复杂等弊端。

从负荷直流化燃弧试验结果来看（后续对直流负荷的实际测试也证明了这一点），并不是所有的直流负荷都会产生电弧，实际上，仅仅只有电阻类或者阻感类负荷才会产生较为严重的电弧问题。且电容和开关电源阻止燃弧的特性较好，考虑到便捷性以及电容的隔直特性，采用并联电容的方式对电阻类或者阻感类负荷进行灭弧设计^{[19][20]}。且考虑到在开关闭合瞬间由于充电导致的微火花问题，采用半导体开关进行闭合操作，实现全程无弧插拔^{[21][22]}。

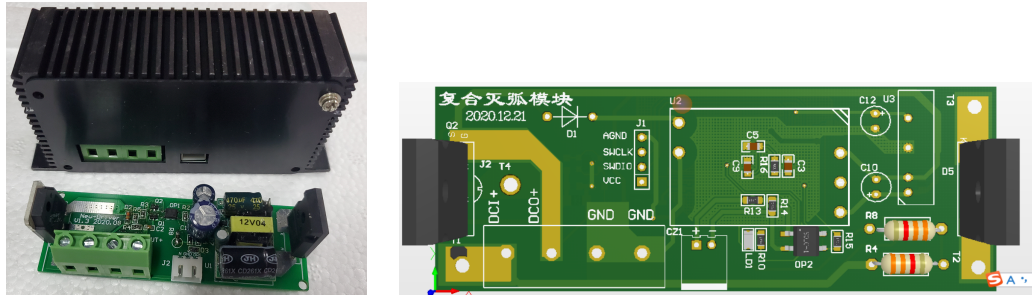


图 5-33 主动灭弧模块

主动灭弧模块的具体参数如表 5-10 所示。

表 5-10 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℃

5.4.4 直流负荷种类

在确认大多数家电可以直流化供电以后，紧接着就是对常规家电的直流供电测试或改造。经分析可以直接直流供电的家电可以从低压到正常电压逐步升高测试电压，部分家电可以交直流通用。获取的直流家电类型如表 5-11 所示。

表 5-11 部分直流家电列表

序号	名称	备注	直流电压范围
1	双开门冰箱	除霜电阻灭弧改造	DC220V-DC300V
2	洗衣机	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC300V
3	电视机	调整前级电路	DC220V-DC300V
4	吊扇	交直流通用	DC220V-DC300V
5	落地风扇	交直流通用	DC220V-DC375V
6	立式空调	交直流通用	DC220V-DC300V
7	壁挂式空调	交直流通用	DC220V-DC300V
8	电饭煲	交直流通用	DC220V-DC300V
9	智能台灯	灭弧改造，更换直流电磁阀	DC220V-DC375V
10	智能感应垃圾桶	灭弧改造，更换直流电磁阀	DC220V-DC260V
11	饮水机	灭弧改造，更换直流电磁阀	DC220V
12	烧水壶	灭弧改造，更换直流电磁阀	DC220V-DC260V
13	小厨宝	交直流通用	DC220V-DC260V
14	商用开水器	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC300V
15	茶台式烧水壶	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC300V
16	油烟机	交直流通用	DC220V-DC375V
17	声光控开关	交直流通用	DC220V-DC375V
18	时控开关	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC375V
19	电脑主机	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC300V
20	电脑主机电源	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC300V
21	投影仪	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC375V
22	扫地机器人	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC300V
23	空气净化器	加热电阻灭弧改造，更换交流接触器	DC220V-DC375V
24	烘干机	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC375V
25	手机充电器	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC375V
26	笔记本电脑	加热电阻灭弧改造	DC220V-DC375V
27	电磁炉	交直流通用	DC220V-DC300V
28	热水器	改造控制电源，电阻灭弧	DC220V-DC300V

6 不同场景下建筑光储直柔系统的方案设计

6.1 商业办公

6.1.1 系统结构选取

拓扑结构方面，光储直柔系统和低压直流配电系统一致，也包括辐射型、环型、多端供电型等类型。对于常规商业办公，考虑到系统经济性和控制保护的复杂程度，多选取辐射型结构^[23]。

接线形式根据需求选择为双极或单极模式，通常，对于容量较小的系统，采用单极接线模式，可提高系统经济性并简化系统的控制和保护，如图 6-1 所示；对与系统容量较大，负荷种类较多的场景，可选择双极配电系统以增加系统配电容量并提供更多电压等级，如图 6-2 所示。

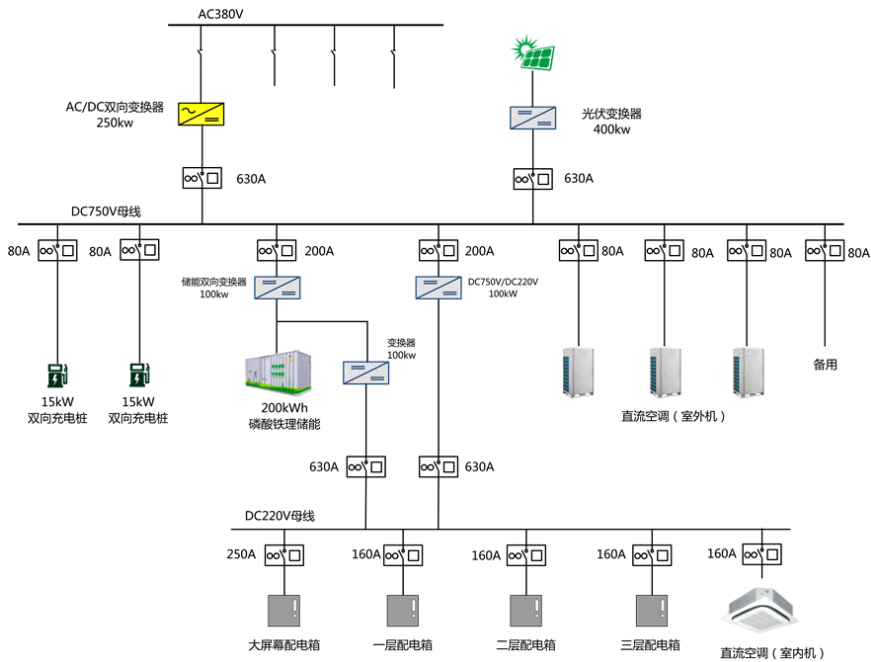


图 6-1 辐射型单极系统

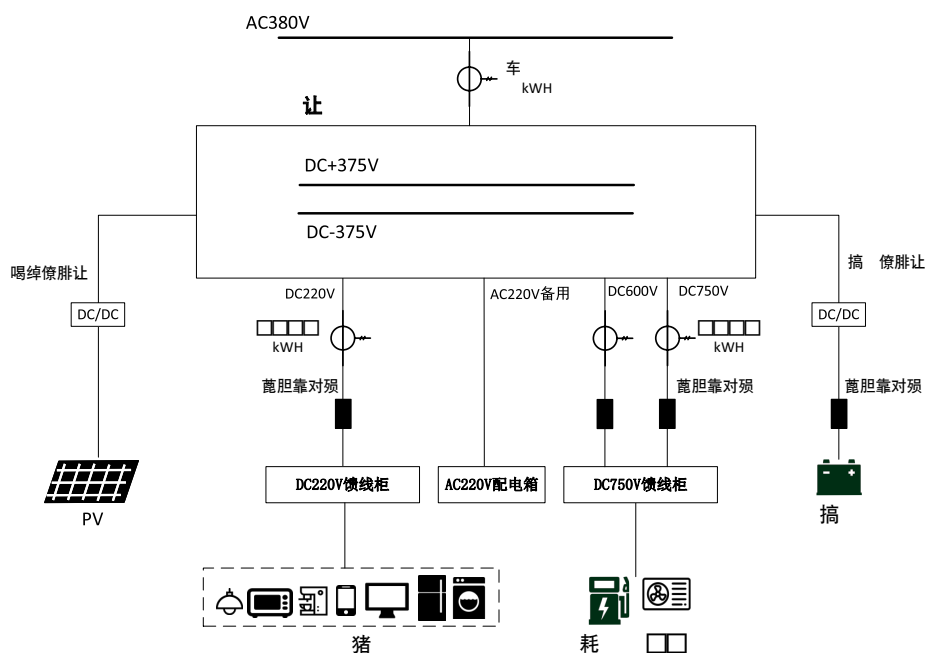


图 6-2 辐射型双极系统

系统接地宜选择为 IT 不接地或高阻接地系统，即电源侧悬浮或高阻接地，设备侧外壳接地。当电源侧采用高阻接地时，需考虑与绝缘电阻检测和剩余电流监测等防护措施的配合。

6.1.2 电压等级选取

楼宇低压直流配电电压的原则选取如下^[24]：

- 1) 兼容目前已有的可用直流替代的交流设备，做到将直流提供给用电设备时，设备能正常工作，且设备内部关键元器件的电压应力、电流应力都不会超出正常使用范围；
- 2) 线路的损耗不能大于现有的交流供电情况；
- 3) 电压的选择兼顾到用电设备的关键元器件的生产制造选型；
- 4) 已商业化的技术能完成该电压等级的直流开断；
- 5) 与储能单元和光伏发电单元能良好匹配。

考虑到电网 AC380V 的整流值为 DC540V，此电压值可以给常用的 AC380V 设备供电，结合 IEC 标准的低压直流电压备选值 DC600V，本系统选择 DC600V 作为系统第一级电压。所带负荷主要是中央空调。

对于低压直流配电系统电压等级的确定应从传输能力、安全性、实用性等多个角度综合考虑。农村直流配电系统的电压等级包括储能电压等级、光伏电压等级、直流负荷电压等级以及村级直流电网电压等级。以实用化为主，力求

结构简单、安全可靠的农村低压直流配电系统，可将光伏、储能电压等级统一，直流负荷、直流电网电压等级统一。

在直流负荷供电电压选取时，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。目前我国市电网居民入户的供电电压有效值为 220V，其峰值为 $220\sqrt{2}$ V，即 310V，供电电压波动范围（-15%~+15%），设计时的耐压值在 350V 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，220V，10A 的额定工况为例，当发热量提高 1.5 倍时，电流升高为 $I = \sqrt{1.5 \times 10^2} = 12.25$ (A)，此时电压可达到的下限为 $U = 220 \times 10 / I = 179.6$ (V)。

3) 考虑直流负荷的工作有效性。180~350V 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 180~350V 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 220V，最终确定的电压等级为 220~350V 之间。

综上，220V 直流是直流负荷和村级直流电网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 220V 也是 GB156、IEC_60938 标准推荐的设备直流电压以及发电厂厂用电的直流电压。

与此同时，鉴于系统与传统大电网之间的连接关系，同步考虑逆变电压，DC750V 进行全桥逆变可以获得 AC380V；DC310V 进行全桥逆变，可以获得 AC220V。此外，在实际运行中，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，直流系统的电压等级并不是严格限制的，而是可以在一定电压带内波动的，在实际应用中应该弱化标称电压的概念。例如，DC220V 系统实际电压可能在 DC200V~DC310V 之间。

6.1.3 关键设备介绍

6.1.3.1 电力电子变换器

考虑到商业办公功率较大（单体 100kW 及以上），电力电子变换装置可采用标准化设计，以标准 4U 抽屉式机箱结构实现变换器的热插拔，方便系统的运行维护及后续的拓展。此外，所有模块均具备过压保护、过流保护、低压保护、过热保护以及故障检测功能。

6.1.3.2 储能及光伏

光伏和储能是系统中的重要单元，利用光伏发电作为系统能源之一可以有效提高系统运行的经济性，而储能单元则具备保持系统稳定、能量备用及提高电能质量和可靠性的作用。通常情况下，光伏发电采用就地消纳原则，按照实际的负荷需求和现场条件确定，通过经济性分析和对负荷实际要求确定储能系统的总容量。

6.1.3.3 保护配置

直流环节配置绝缘监测装置和 750V 直流断路器，宜配置低压直流母线保护。光伏支路、柔性双向变换器支路以及柔性互联装置均具备双向限流功能。

根据国标 GB T13955-2017《剩余电流动作保护装置和运行》中第 4.2.4 条款要求 IT 系统的电气线路或电气设备可以针对外露的可接触不同电位的导电部分保护性安装剩余电流保护装置。其额定剩余动作电流不超过 30mA，动作时间不大于 0.1s；末端保护使用带过流保护的剩余电流动作断路器（RCBO）。

储能系统需配置合理的断路器等保护器件，并与宜配置绝缘监测、剩余电流保护等保护措施。当短路故障时，可通过断路器与储能变换器进行配合保护。

对于重要负荷支路，较大功率时（大于 10kW）可配置直流支路一体化保护，功率较小时，可通过变换器配置支路主动式保护。

6.1.4 系统控制策略

由于没有频率和相位的限制，楼宇低压直流配电系统的控制要点是保持直流母线电压的稳定，因而需要保持供电电源端与负荷端能量平衡。电压调整控制和能量管理是楼宇直流系统控制的 2 个关键点。

直流系统根据运行目标的差异会采用不同的控制策略，本系统内的电源包括光伏、交流电网及储能单元 3 个部分，从保证高质量和连续的供电以及实现

分布式电源与储能之间的相互配合和充分利用的角度出发，本系统的运行模式见表 6-1。

表 6-1 楼宇直流系统运行模式

光伏状态	楼宇直流运行模式	储能单元状态	PV-BOOST
PV>负荷	光伏给负荷供电同时给 储能单元充电	充电	MPPT 跟踪
PV<负荷	光伏和储能单元给负荷 供电	放电	MPPT 跟踪
PV 故障	储能单元给负荷供电	放电	停机

只有当光伏、储能同时无法满足系统负荷需求时，才投入大电网，从而极大的提高了系统运行的经济性。系统通过对直流电压的监测来判断系统当前状态，并进行合理切换，运行结果表明此种控制策略可以实现对光伏的充分利用及对电压的有效控制。

6.2 居民住宅

6.2.1 系统结构选取

结构选取方面，居民住宅一般配电容量较小，多采用单电压等级或不超过 2 个电压等级，拓扑结构一般为单极辐射型。当多个住宅形成统一系统时，可通过台区间的柔性互联形成双端或多端连接的拓扑结构，如图 6-3 所示。台区互联装置参考 5.1.1.1 节中的设备介绍，此处不再赘述。

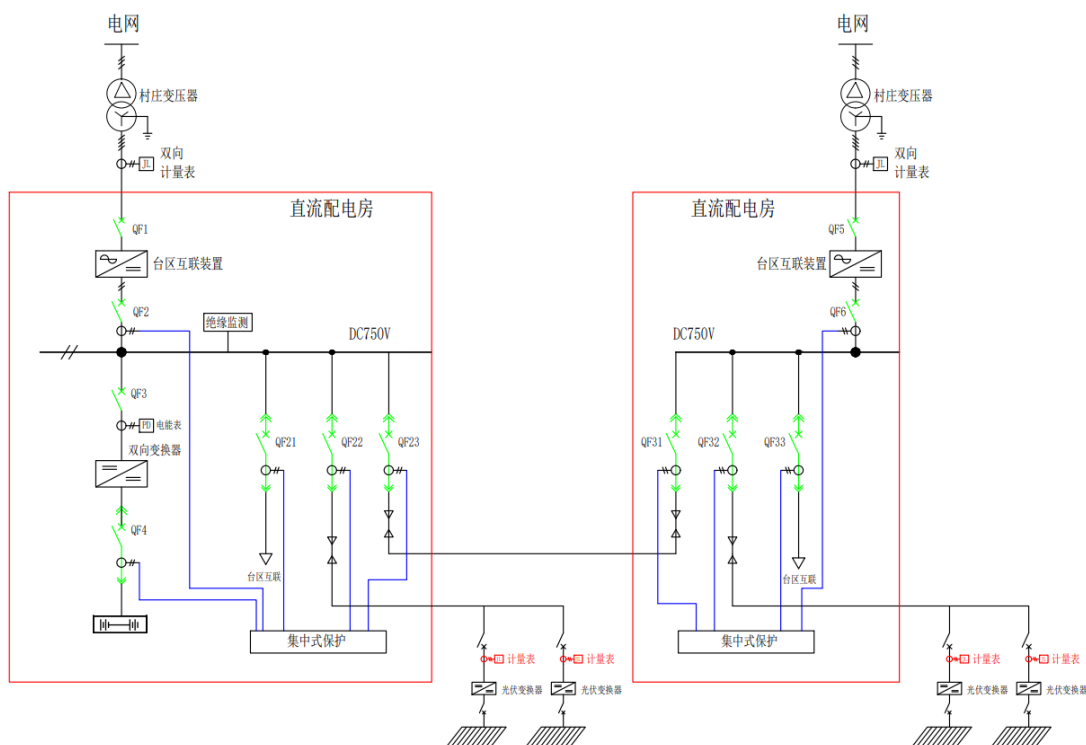


图 6-3 分散式台区互联拓扑

接地方式方面，与建筑类似，宜选择为 IT 不接地或高阻接地系统，即电源侧悬浮或高阻接地，设备侧外壳接地。配置漏电保护装置。

6.2.2 电压等级选取

可参照 6.1.2 节中关于电压等级的选取原则，配电系统电压选择 DC750V，居民用电电压选择 DC220V。

6.2.3 核心装置介绍

6.2.3.1 电力电子变换装置

针对住宅场景，可采用分体式或壁挂式光伏电力电子变换装置。本项目中针对于独立住宅或规模较小的住宅互联系统，可采用配用电一体式 5kW 直来电装置，光伏发电经升压后直接输出直流负荷使用的电压等级，5kW 直来电装置的技术参数如表 6-2 所示^[25]。

表 6-2 5kW 直来电装置技术参数表

序号	项目	参数
1	额定功率	5kW
2	光伏额定输入电压	180V
3	光伏输入电压范围	150~240V

4	额定输出电压	DC250V
5	额定输出电流	20A
6	通讯接口	RS485
7	通讯协议	Modbus 协议
8	使用环境温度	-25° C~+50° C
9	使用环境湿度	0~95%，无凝霜

针对于台区互联或多住宅互联系统，可采用 10kW 配电式直来电装置，光伏发电经升压后汇入 DC750V 直流母线，再经降压后供直流负荷使用，10kW 直来电装置的技术参数如表 6-3 所示。

表 6-3 10kW 直来电装置技术参数表

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
7	通讯协议	Modbus 协议
8	使用环境温度	-25° C~+50°C
9	使用环境湿度	0~95%，无凝霜

降压变换器及储能变换器等详见 5.1.2 节中关于 DC/DC 变换器的介绍。

6.2.3.2 储能及光伏

通常情况下，光伏发电采用就地消纳原则，按照实际的负荷需求和现场条件确定，储能单元可根据需求进行选配，也可采用集中式储能的方式，并通过台区之间的互联实现储能共享。

6.2.3.3 系统保护

在直流配网侧进行保护配置，具体如下：

(1) 电网进线、储能回路及其它重要出线装设保护装置。直流环节配置绝缘监测装置和 750V 直流断路器并配置绝缘监测，宜配置低压直流母线保护。光伏支路、柔性双向变换器支路以及柔性互联装置均具备双向限流功能。

(2) 保护配置应充分考虑并网变换器控制灵活多变及非线性工作特点，为提高保护性能，可以与并网变换器控制进行配合。

(3) 用户端配置直流漏电保护装置，负荷进行无弧化处理。

6.3 工业场景

6.2.1 系统结构选取

结构选取方面，考虑到工业现场的实际情况，一般工业生产现场的拓扑结构为单极辐射型，如图 6-4 所示。对于数据中心等可靠性要求更高的领域，可以考虑环形或多端型网架结构。

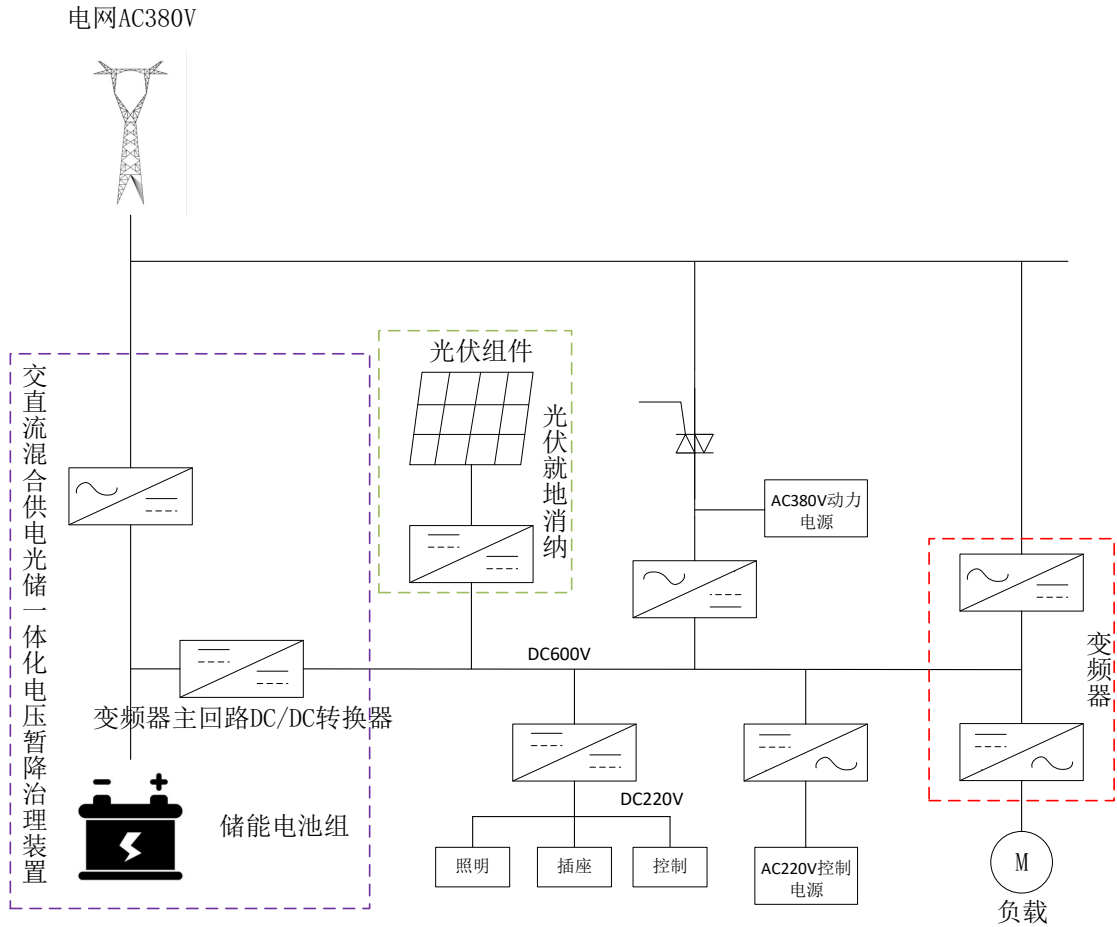


图 6-4 工业拓扑

接地方式方面，考虑到变频器的接地保护特性和系统供电可靠性需求，选择为 IT 不接地方式，即直流电源侧悬浮，设备侧外壳接地。

6.2.2 电压等级选取

考虑到交流变频器的特性，AC380V 经整流后约为 513V~532V，故主供电电压选择 DC600V 以匹配变频器需求，部分仪表及插座等用电电压选择 DC220V。

6.2.3 核心装置介绍

6.2.3.1 电力电子变换器

工业现场除电压等级外，变换器与建筑领域类似，可参照 6.1.3.1 节中关于变换器的配置介绍。

6.2.3.2 储能及光伏

对于工业光储直柔建筑，光伏发电采用就地消纳原则，按照实际的负荷需求和现场条件确定；由于工业负荷的电压敏感性，如十几毫秒的电压暂降就可能造成变频器或继电器等设备停机，储能配置时要综合控制策略考虑，满足电源切换时敏感负荷的不间断运行需求。

6.2.3.3 系统保护

除断路器和熔芯外，对储能等重要负荷可配置一体化保护，直流母线配置绝缘监察，用电端配置直流漏电保护。

6.4 方案设计建议

6.4.1 拓扑结构

各类拓扑结构的特点如表 6-4 所示。

表 6-4 拓扑结构特点对比

类别	优点	缺点
放射式结构	1、拓扑结构简单，经济性高； 2、单向供电，潮流路径相对确定，对保护控制要求不高； 3、系统运行操作简便。	1、近电源端发生故障，会导致系统大面积停电，系统可靠性较低
双端或多端结构	1、便于光伏、风机等分布式电源并网； 2、系统故障时，能够实现负荷转供，可靠性较高；	1、双端供电，结构较复杂，对保护控制功能要求较高； 2、建设成本较高
环式结构	1、便于光伏、风机等分布式电源并网； 2、系统合环时，实现故障条件下无缝转供，可靠性高；	1、结构复杂，对保护控制功能要求高； 2、建设成本高

6.4.2 接地方式

不同接地方式的特点如表 6-5 所示^[26]。

表 6-5 不同接地方式的特点

接地方式	安全性评估	安全性保障（依重要性排序）	应用难度
TT 接地	接地故障电流相对较小，有利于开断并保证线路安全，但故障识别和选线困难	①直流剩余电流检测装置； ②直流剩余电流分级辨识和选线保护。	对直流 RCD 依赖最大，应用难度最大
IT 接地	单点故障时仍具有较高安全性，两点故障危险性较高，对断路器开断电压要求较高	①绝缘监测装置和 750V 直流断路器； ②故障定位和分区选线； ③直流剩余电流检测装置。	应用难度最小
TN 接地	接地故障电流及对线路威胁较大，故障特征明显，易于识别和分级选线保护	①直流断路器寿命和可靠性； ②直流剩余电流检测装置。	对直流 RCD 有一定依赖，断路器短期面临成本压力，应用难度中等

6.4.3 接线方式

不同接线方式的特点如表 6-6 所示。

表 6-6 不同接线方式的特点

接线方式	优势	缺点
单极性	1、结构接单，投资成本低	1、对绝缘水平要求高； 2、同等电压等级下容量较小，适用于低压直流配电。
真双极	1、运行方式灵活，输送容量大； 2、在直流侧故障或检修时只影响故障极，对另一极没有影响。	1、投资成本高； 2、保护控制较伪双极接线要复杂。
伪双极	1、相比于真双极系统，结构较为简单，投资较少	1、可靠性比真双极系统要低，只能对称方式下运行

6.4.4 容量配置

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 6-7 所示。

表 6-7 工业拓扑

系统商业模式	容量配置类型		
	光伏	储能	电网接口变换器
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
全部上网	满足空间约束和经济性约束，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
自发自用，余电上网	满足空间约束和经济性约束，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

综上，对于建筑、住宅、工业现场等不同场景，推荐的拓扑结构及接线形式如表 6-8 所示。

表 6-8 工业拓扑

场景	常用拓扑	主接线形式	其他关注点
建筑直流	辐射型	IT 不接地或高阻接地系统，可采用单极或真双极结构。	经济性及电压等级
居民住宅	辐射型	IT 不接地或高阻接地系统，多采用单极	经济性及电压等级
工业直流	推荐辐射型以及两端供电型	宜采用单极悬浮系统以提高可靠性	交直流混合供电情况下，故障时交流侧接地方式对直流侧的影响。
数据中心直流	环形或多端型	单极性悬浮系统	系统运行效率及运行安全性

7 总结与展望

光储直柔概念的提出赋予了建筑“柔性”的特点，为适应不同的应用场景提供了可能性，因此亟需构建适应不同应用场景的建筑光储直柔理论体系，并形成统一的工程技术规范和标准。

(1) 光储直柔系统目前亟需相关标准和规范，为系统的建设、运行提供指导和依据。

首先，从系统建设层面考虑，光储直柔系统的建设是一项系统工程，其规划设计、配电设备、电气设备、物理接口、运行监控等方面没有相应的标准，需要根据实际逐步推进。其次，从系统实际运行的角度来看，各建设单位在进行系统运维时，需要相关的规范来明确实际的配电环境下需要哪些措施来确保光储直柔系统的安全稳定运行。因而目前应在系统研究的基础上，抓紧制定相关的标准和规范来指导实践工作。

(2) 需要从系统的角度考虑新能源、直流负荷以及直流配电网合理布局、有序发展。

长远来看，对新能源的利用会逐步增多，因而直流配电有其固有优势；就负荷而言，其总体的直流化趋势不会改变，少部分交流负荷的存在，不影响整个系统的直流配电属性。目前影响直流配电的主要是电力电子器件的高成本以及现有的交流配电网主体架构，电力电子器件成本会随着技术的推进和市场规模的扩大而逐步降低，直流配电网则需根据实际的需求合理布局、稳步推进。

(3) 直流配电系统的控制保护目前仍处于实践和探索阶段，仍具有很大的研究空间。

直流配电系统的保护技术还有很大的研究空间，主要包括以下几个方面：1) 低成本、大容量、可商业应用的直流断路器技术。2) 故障电流限流装置与小容量直流断路器配合保护技术。3) 具有故障电流限制或切断能力的换流器。4) 快速的故障检测及实时通信技术。采用具有故障限流能力的换流器和限流装置的发展给直流配电系统的保护设计提供了新思路，低成本、大容量的直流断路器未来的商用或限流装置与小容量断路器的配合使用是直流配电系统保护配置

的两个方向。另外，与交流系统相比，直流配电系统多变流器互联的协调优化控制更为复杂，通过调整控制策略或增加设备可以解决其自身的问题。

参考文献:

- [1] 李津, 曹晓波, 李忠, 严建海, 刘向东. 低压直流系统潮流协调控制器及其应用[J]. 电工电气, 2020(04):44-47.
- [2] 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.
- [3] 严建海, 张保, 邹学毅, 仝浩, 刘向东, 余学文, 王强, 刘嘉杰, 苏国庆, 赵振昊, 李忠, 陈文波. 一种集成有分布式新能源发电的供电系统[P]. 江苏省: CN213753996U, 2021-07-20.
- [4] 吴鸣, 刘海涛, 陈文波, 苏剑, 季宇, 孙丽敬, 王丽. 中低压直流配电系统的主动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(04):891-899. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.04.001.
- [5] Zhong Li, Yuming Zhao , Jianhai Yan, et.al. Research and Practice of Relay Protection in LVDC Distribution Network. IEEE, ICDCM2019 Conference , Jun, 2019.
- [6] 陈文波. 具有精确限压限流及最大功率点跟踪的变换器的控制方法[P]. 江苏省: CN102843035B, 2014-10-22.
- [7] 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.
- [8] 陈文波, 邹学毅, 张保. 一种应用于直流微电网的直流双向变换装置[P]. 江苏省: CN209217956U, 2019-08-06.
- [9] 陈文波, 邹学毅, 张保. 一种直流双向变换装置对蓄电池充放电的控制方法[P]. 江苏省: CN109193842A, 2019-01-11.
- [10] 李忠, 余学文, 吴鸣, 陈文波, 刘向东, 仝浩, 李永恒. 低压直流配电网继电保护研究与实践[J]. 供用电, 2018, 35(08):40-44+60. DOI:10.19421/j.cnki.1006-6357.2018.08.007.
- [11] 陈文波, 李忠, 仝浩, 邹学毅, 刘向东, 余学文. 一种抽屉式中低压直流配电保护装置[P]. 江苏: CN207053168U, 2018-02-27.

- [12]Zou Xueyi, CHEN Wenbo, Zhu Xuezhong, et. al. Research and application of active protection technology in LVDC system. CIRED2019.
- [13]陈文波. 一种用于直流配电的主动式短路保护设备[P]. 江苏: CN203415947U, 2014-01-29.
- [14]刘向东, 陈文波, 李忠, 张保, 邹学毅, 严建海, 余学文, 仝浩, 梅中华, 朱礼建. 一种直流漏电保护方法[P]. 江苏省: CN111487560A, 2020-08-04.
- [15]刘向东, 王强, 王菲菲, 严建海. 交直流混合配电系统的运行管理系统设计[J]. 电工技术, 2021(16):140-142+154. DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2021.16.049.
- [16]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. DOI:10.14022/j.issn1674-6236.2020.13.039.
- [17]Xiangdong Liu, Wei Zhang, Jianhai Yan, et. al. Research on electric arc and practice in building LVDC distribution system. IEEE, ICDCM 2019 Confenrece , Jun, 2019.
- [18]王新想, 严建海, 王静, 熊天龙, 李浩. 直流系统中直流电弧的研究与实践[J]. 河南科技, 2020(19):132-134.
- [19]张保, 严建海, 邹学毅, 仝浩, 刘向东, 余学文, 苏国庆, 赵振昊, 李忠, 陈文波. 一种直流系统柔性安全供电装置[P]. 江苏省: CN212751794U, 2021-03-19.
- [20]张保, 严建海, 李忠, 陈文波, 邹学毅, 仝浩, 刘向东, 余学文, 王强, 刘嘉杰, 梅中华, 朱礼建. 一种直流过零主动灭弧装置及灭弧方法[P]. 江苏省: CN111463044A, 2020-07-28.
- [21]张保, 严建海, 邹学毅, 仝浩, 刘向东, 余学文, 苏国庆, 赵振昊, 李忠, 陈文波. 一种直流系统柔性安全供电方法[P]. 江苏省: CN111952955A, 2020-11-17.
- [22]张保, 严建海, 李忠, 陈文波, 邹学毅, 仝浩, 刘向东, 余学文, 王强, 刘嘉杰, 梅中华, 朱礼建. 一种直流过零主动灭弧装置[P]. 江苏省: CN211788720U, 2020-10-27.
- [23]Bao Zhang, Yutong Li, Jianhai Yan, et. al. Demonstration application of LVDC distribution system in building. IEEE, ICDCM2019 Confenrec e , Jun, 2019.

- [24]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. DOI:10.19421/j.cnki.1006-6357.2018.06.005.
- [25]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. DOI:10.19421/j.cnki.1006-6357.2021.01.003.
- [26]T/CABEE 030—2022, 民用建筑直流配电设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
-