中国光储直柔建筑战略发展路径研究

子课题 5：建筑电器直流化技术及接口标准(设备)

国创能源互联网创新中心（广东）有限公司

2022.9.25

目录

一、建筑电器直流化研究 1
1.1 建筑电器的分类分析 1
1.2 建筑电器直流化可行性分析 2
1.3 建筑电器直流化性能与经济性分析 4
1.4 建筑电器直流化发展路径 4
1.5 建筑电器直流化专项—适配器化 6
1.6 建筑电器直流化专项—本质安全 6
二、建筑电器直流通用接口研究 8
2.1 电气接口应用现状分析 8
2.2 直流接口电压等级设计及产业可行性分析 8
2.3 直流接口形式通用化设计建议 9
三、建筑电器调压调功柔度设计研究 10
3.1 建筑负荷的需求侧响应与柔度 10
3.2 建筑电器调压调功可行性研究 11
3.3 建筑电器调压调功实现方法和适用范围 12
四、 总结 12

双碳驱动绿色经济转型及高清洁电力占比的新型电力系统构建，正深刻改变用能习惯。建筑作为分布式光伏的主战场之一，同时是终端电器最大的应用场景。光伏等新能源的间歇性和波动性，导致建筑能源稳定运行与高效消纳困难，成为未来发展的巨大挑战。电力电子与信息电子的发展，带来电产业的巨大变化，为建筑电器的直流化奠定了基础。特别是光伏等新能源以及储能都呈现出低压直流特性，进一步助推直流替代交流，使其成为电生态的发展趋势。

建筑电器直流化后可以更好的实现源荷直流直驱，高效稳定消纳，此外可提高本质安全用电水平，实现柔性用能，提高建筑供用电系统的环境友好性。建筑电器直流化目前还面临供电直流电压等级、接入接口不匹配、直流化产业化等问题。

建筑电器直流化技术及接口标准(设备)课题主要针对发展光储直柔建筑的直流化和接口的关键技术体系进行全面分析，系统建立建筑电器直流化的关键技术框架，对接入方式、接口标准，需求侧响应模式等进行研究。

一、建筑电器直流化研究

1.1 建筑电器的分类分析

建筑内的电气设备按应用功能目前主要包括照明、空调、电梯、风扇、净化器、电暖器、洗衣机、水泵、风机、办公设备（台式电脑、一体化电脑、打印机、投影机、电视机、显示屏、音响）、厨房用具（油烟机、电磁炉、电饭煲、微波炉、冰箱、饮水机）、信息类电子产品电源及适配器等。

按照电气机理进行建筑电器分类可分为电-动、电-光、电-热、电-影、电-声、电-源（开关电源），进一步总结归纳为如下三大类：

电-动类：主要包括了空调压缩机及风机、循环水泵、电梯拖拽电机。

电-热类：包括了感应加热和电阻加热、微波加热。

电-源类：开关电源类，目前广泛应用，包括电-光/影/声转换（LED 照明、液晶电视显示屏、音响），以及信息电子产品的电源适配器。

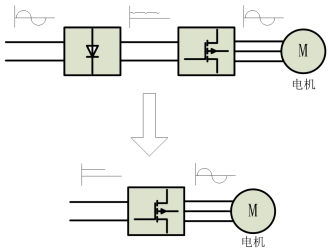

图 1.1 电—动类

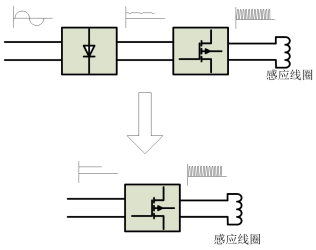

图 1.2 电—热类

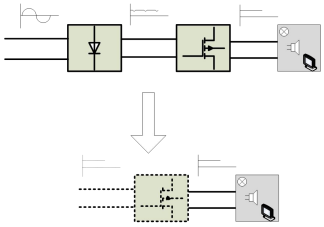

图 1.3 电—源类

按照用电特性进行建筑电器分类：Ⅰ型-基础型、Ⅱ-环境型、Ⅲ-功能型、Ⅳ-舒适型。四级分类法为供需平衡的负荷控制调节提供基础依据。按照负荷可调节潜力的优先级进行控制：舒适型 > 功能型 > 环境型，基础型设备为系统保障监测传感正常运行，非调节负荷。

基础型：人不能在此环境中活动，基本的感知监测存在；

环境型：人可以在此环境中活动，基本的照明通风等可运行；

功能型：人能够在此环境中进行工作生活，能够保证所需要负荷的正常运转；

舒适型：人能够舒适的在此环境中工作生活，可根据自身需求进行任意调节；

1.2 建筑电器直流化可行性分析

1.2.1 直流电特性

交流电是直流电的一种形式，交流电压的大小和方向随着时间发生周期性变化，有过零点，呈现电磁场特性；直流电是稳定的，直流电压随着时间的推移它的大小和方向都未发生改变，没有过零点，呈现稳定电场特性。直流电压只有额定值；而交流电压有峰峰值和有效值，有效值是通过能量产生热效应等效直流电压得出来的电压值，并非物理界存在的。

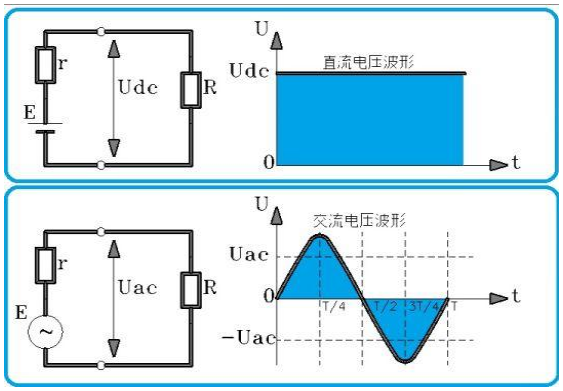

图 1.4 交流电与直流电

交流电和直流电本身的差异，呈现在直流化设计标准上主要有：

① 过零点特性差异，直流和交流在电弧的监测技术和安全等级评价存在差异，将在保护部件如断路器、熔断器、继电器等方面存在阈值和测试差异。

② 频率特性差异，在对人体触电效应上呈现明显不同，在产品设计安全电压要求、漏电保护要求等方面阈值和评价方法差异。

③ 由于交流电能有效值及峰峰值和直流电压值在等效效应上的关系，对于产品设计要求的电气间隙、爬电距离的阈值，以及绝缘耐压和电缆线的阈值和评价方法不同。

1.2.2 应用特性

大部分交流电器是将交流整流为直流，内部本身已经是直流供电，电器从交流供电到直流供电应用上来主要有：

① 功能上是没有变化的，在性能上是会有差异，体现在标准上主要有：能效评价等不适用。

② 产品接口特性会有差异，体现在标准上主要有：电压等级、接地方式等不适用。

③ 保护的形式和保护器件会有差异，体现在标准上主要有：保护器件、保护阈值等不适用。

④ 产品安全特性会有差异，体现在标准上主要有：以低电压供电的直流电器其仅满足低电压相关安全要求即可。

1.2.3 效应特性

原有交流供电系统采用变压器变压为线性系统，而直流采用电力电子变换器转换为离散系统。供电系统的特性差异会在效应特性上带来以下影响：

① 原有交流电网系统大天线效应和现有直流系统具有明显差异，在标准方面主要是电能质量、EMC 测试等不适用。

② 原有交流系统中频率特性体现功率，电压体现系统暂态稳定特性，而直流系统中电压是唯一标识量，而电力电子化的直流系统对电压波动幅度范围具有很强耐受范围，体现在标准上是电压偏差范围和电能质量标准不适用。

③ 原有交流系统呈现感性特性，电力电子化的直流系统呈现容性，体现在标准上的对设备接入及拔出有差异，对相应接口特性提出要求，接口的形式和评测方法不适用，感性系统与容性系统的接入接出接口特性差异巨大，还需要进一步加强研究。

1.3 建筑电器直流化性能与经济性分析

大多数建筑电器是将交流整流为直流，内部本身已经是直流供电。

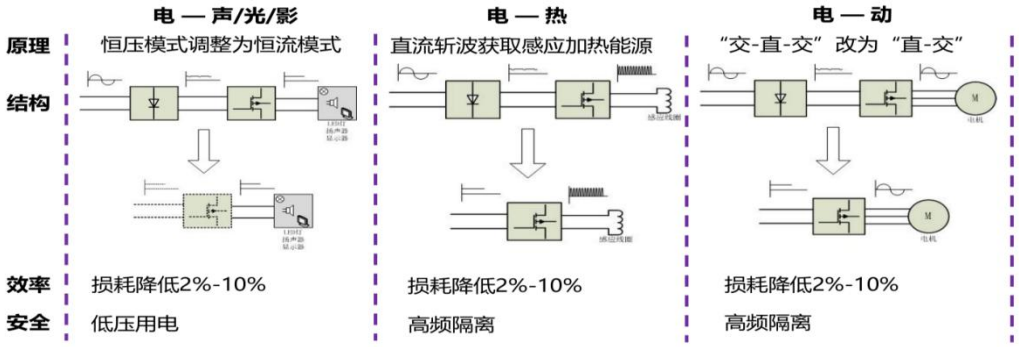

图 1.5 电器直流化性能分析

绝大多数建筑电器直流化后成本将降低，损耗减少，效率提高。建筑电器从电梯、空调和风机水泵，到照明、冰箱、炊具和各类小家电，直流化最终都可以降低生产成本，提高产品性能，并且通过减少电能变换环节来减少损耗，缩短能源流的路径，提高能源流的路径效率。

1.4 建筑电器直流化发展路径

通过建筑电器分类分析，结合应用场景，顺理总结建筑电器直流化需要考虑的关键技术方向和重难点问题，以及建筑电器直流化设计评价指标，形成建

筑电器直流化接口设计导则和建筑电器直流系统响应机制，并搭建原型验证系统，制定可批量化推广应用的建筑电器直流化技术及接口标准。

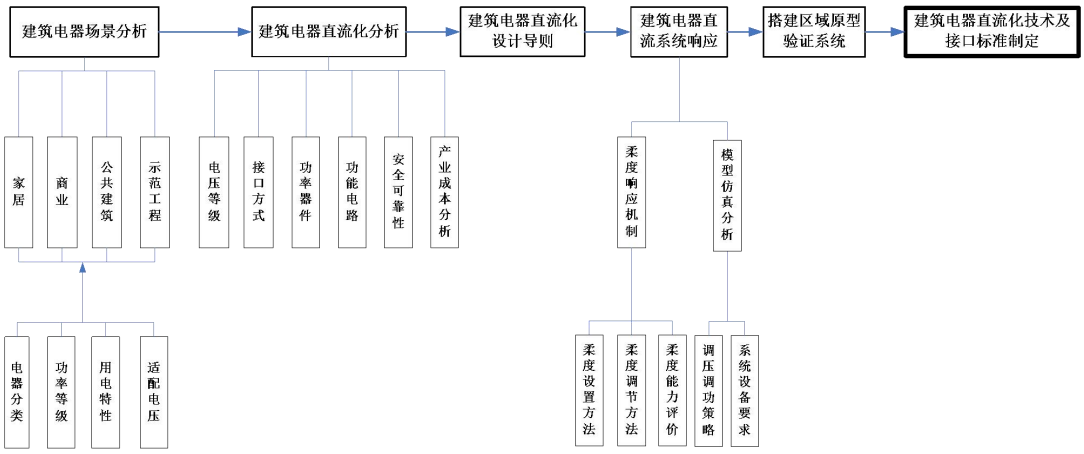

图 1.6 建筑电器直流化技术及接口标准技术路线

建筑电器直流化需要走过交流-交直流混合-全直流的长征，强强联合，科学有序协同推进：

① 建筑电器中空调通风系统、新风系统和照明系统的设备可以率先实现直流化。建筑环境系统中的空调主机、水泵、风机等设备以及照明系统一般是集中设计、集中建设、集中运行管理，产业化应用推广开销小，实效高。国家已开展了多年的建筑节能专项行动，推动了风机、水泵等设备变频化。变频器本身是交-直-交系统，内部转换环节是直流，为实现风机、水泵等电动设备直流化准备了良好的产业技术基础。

② 以应用场景为对象，科学有序的组织技术、资本和企业开展本质安全、接口技术攻关和示范到试点，并总结迭代实现建筑直流电器及供用电系统的升级与逐步推广；

③ 紧跟国家双碳及新型电力系统构建契机，联合电力及能源伙伴，在新建的园区、社区、场站、场馆、乡村及校园进行全直流化的规划、设计、建设和运营，带动建筑电器直流化；

④ 以海岛、边境小镇为先行对象，更好发挥零碳直流价值优势，建设光储直柔海岛和小镇，发展建筑直流电器；并带动直流船舶，光储直柔海洋牧场等能凸显直流价值的场景应用；

⑤ 开展广泛的国内外跨专业和行业交流与合作，以场景应用数据为基础，总体规划先形成指引和导则，再逐步制定实用的建筑直流电器标准；建设建筑直流电器的实证基地，并已实际应用为目标，训练和培养直流电器研发队伍；

1.5 建筑电器直流化专项—适配器化

回顾传统电器发展的历程，其经历功能化（基本功能需求的实现） — 精细化（高效、智能发展的需求） — 适配化（通用兼容的需求） — 直流化（安全、节能的内生发展诉求，目前各类型电器正内部直流化趋势，呈现泛直流化现象），科学有序的实现交直流切换是一场长征。

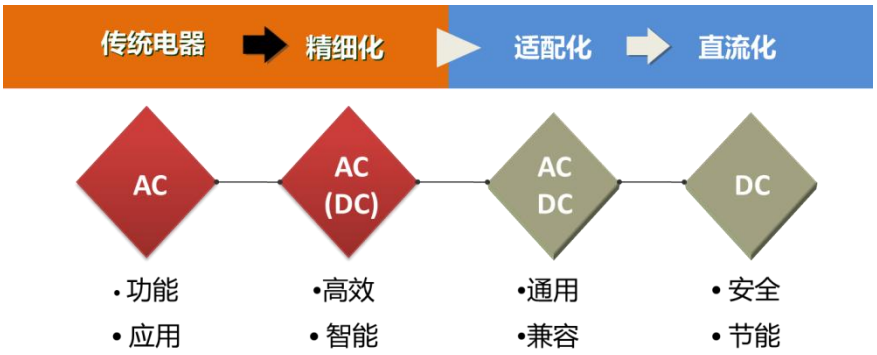

图 1.7 传统电器发展历程

储用一体适配是电器设备自身通过增加通用储电模块的方式，实现电器设备的峰值补偿和用电分布式存储，针对一些电器可实现无尾移动化，便于电器设备的使用。

1.6 建筑电器直流化专项—本质安全

建筑电气化应用的普及，以及人民生活品质不断提高，对安全用电的诉求不断增强。首先，交流 AC220V 和 AC380V 最早为电动设备的旋转电机准备的，而随着电子化信息电子化和高能效装置的出现，这么高的电压已经不太适合。其次，由于历史原因和使用习惯，当年为功率设备准备的电压等级已经不适用于近用户侧的人机交互终端和电子化的生态。所以，我们需要建立一个本质安全的电生态环境，为实现近用户侧人身本质安全准备了机会，交流到直流的切换将完成这个使命。

根据对人居工作环境和用电行为特性的分析研究，提出直流建筑分区供电方案，将建筑的人频繁活动区设计为用电的低压安全区，将功率用电与人机交互分离，提高人居工作环境安全等级。根据应用场景和功率来确定电压制式，以高压追求效率，低压保障安全为目标。

图 1.8 建筑内电器区域分布

电力电子器件构成的直流系统为离散系统，有别与通过变压器隔离构建的线性的交流系统，原有交流接地保护的要求和故障穿越及隔离能力对直流不适用。从文献调研和典型电信行业、船舶行业直流系统应用情况来看，浮地的 IT 接地方式更适合于直流系统，而不是交流系统采用的 TN 接地方式。

低压安全是直流应用的一大亮点，而安全电压的评价是其中重要的环节，而目前家电安全标准 GB 4706.1 中的安全特低电压适用交流，不适用直流。项目组对各个标准体系中的安全电压进行溯源和研究，对人体安全电压标准的最早出处是 IEC/TS 60479 和 IEC/TS 61201，该标准给出了直流电、交流电作用于人体时产生的电击效应曲线，如图所示（图中各曲线直流用于电流通路为“纵向向上”，以下简称参考通路；交流用于电流通路为“从左手到双脚”）。图中区域 III 与区域 IV 的分界线为室颤曲线，即通过人体能引起心室纤维性颤动(电击事故中最主要的致命原因)的最小电流值，很明显的产生相同生理效应需要的直流电流比交流电流大。

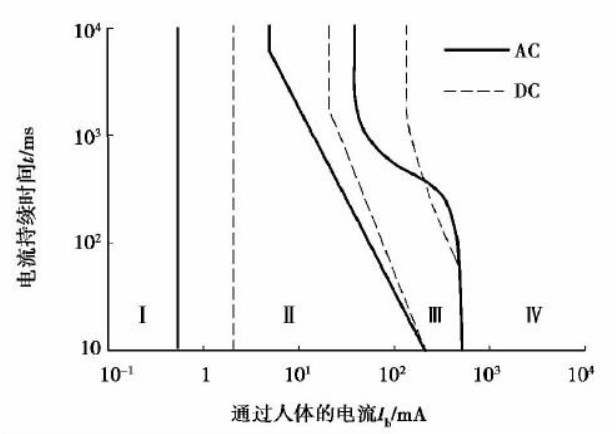

图 1.9 不同电流形式的时间/电流效应

从室颤曲线的最小值可看出，直流电的室颤阈值约为 120mA，交流电的室颤阈值约为 40mA，交流电更容易引发心室纤维性颤动，而直流电更具安全性。

二、建筑电器直流通用接口研究

2.1 电气接口应用现状分析

纵观世界各国的家用插头插座，其型式尺寸多种多样，插销形状不一，有圆型、有扁型、有矩型、有扁型和圆型混合型等。反观 USB Type-c 接口发展，不但对传统的手机、平板、可穿戴设备等便携类设备支持，也使得对笔记本电脑、显示器、电动工具及电动自行车等场景应用拓展。其扩展通用易用性，减少混乱，甚至减少更多的浪费。再看电动汽车的发展，车-桩连接的直流插头插座亦应用协议供用电实现了产业化通用、兼容。其他诸如数据中心、船舶岸电等场景，已形成标准化通用化接口，但仅围绕行业做以应用，未考虑跨行业融合，形成产业集约化发展。

2.2 直流接口电压等级设计及产业可行性分析

插头插座作为电器设备对外连接的统一接口，变革意义重大。在直流供用电系统下，直流插头插座应该是一种具有更精确指定的属性的创新，而不是交流插头插座的升级。直流电器设备将走向两个分支：其一，走向功率型直流电器设备，实现高压（800VDC/400VDC）用电高效。传统 220VAC 变频用电设备，

内生直流 311VDC（不控整流下直流母线电压）或 380VDC（全控整流下直流母线电压），追求效率提升，减小电路回路电流，统一为 400VDC；传统 380VAC 变频用电设备，内生直流 537V（不控整流下直流母线电压）或 650VDC（全控整流下直流母线电压）及 560-750VDC（光伏直流直驱下新能源直流电器直流母线电压），统一为 750VDC；再一，结合电动汽车产业用直流 800VDC 用电电压等级，促进直流新产业下电机、电容、功率半导体器件等供应链共用，最终实现统一为 800VDC。实现电器设备节能及光伏等新能源直流直驱高效；另一，走向安全型直流电器设备，实现低压（48VDC）用电本质安全。传统空调内机、冰箱、风扇、电视、电脑等电器设备功率较低使用频繁，追求安全质变，避免触电风险。对于低压安全直流电器产业，实现“认证、检测、监管”的标准和要求全降下来，减少产业附加开支。民用建筑内功率型电器设备与人机交互型电器设备分离，高效性与安全性各有侧重，直流插头插座需要有其直流化的“显色度”。

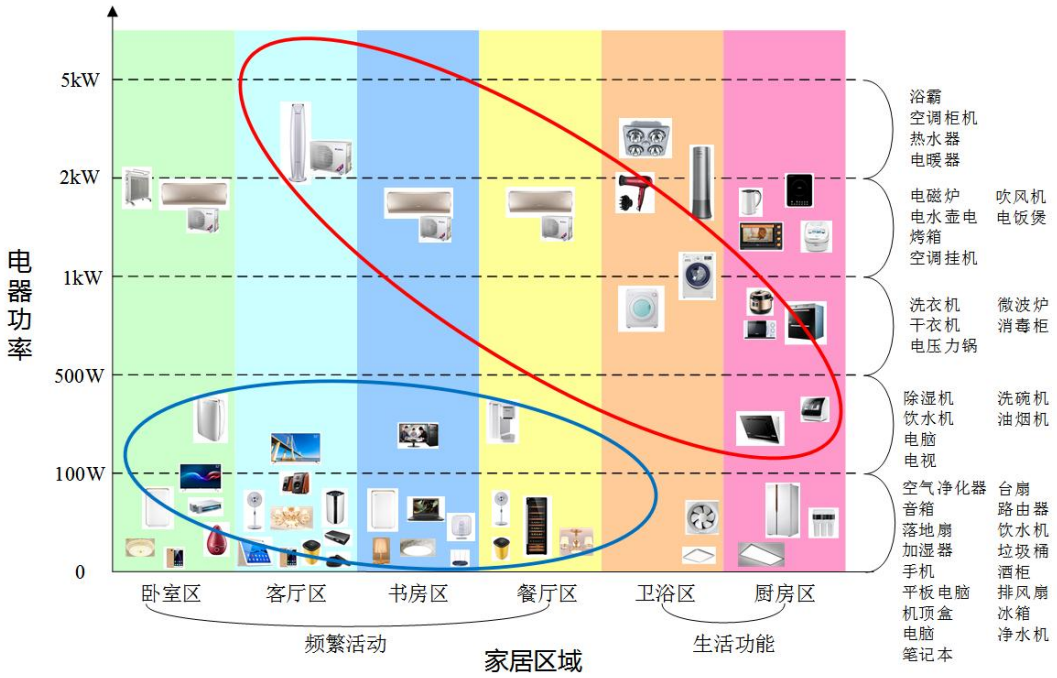

图 2.1 电器功率等级和区域划分

2.3 直流接口形式通用化设计建议

按设备功率等级而不是品类进行设计的直流插头插座，形成多行业、跨国家适用产品，从不同功率和电压等级形成通用化设计规范：

48VDC/16A 低压直流插头插座，实现差异化、小型化、通用化，解决 60%或更高比例的低压直流电器的应用问题。建筑电器从交流到直流的变革，实现低压 48VDC 家用电器（如空调内机、冰箱、洗衣机）插头插座与信息电子终端（如手机、笔记本电脑、显示器）接口统一；进一步的，最终考虑实现电的两个分支——信息电子和电力电子的接口再统一。48V 接口在提供电源的同时也是设备之间信息交互的接口，在接口处实现建筑直流电器交互协议的统一。以大幅提高电产业通用化、标准化水平，提高产业集约化成本；

800DC/400VDC 固定式连接方式，实现简洁、安全、通用，解决使用周期内无需插头插座插拔的 36%的高压直流电器的应用问题。或形成建筑电器设备安装、维护要求，规范化、专业化高压电器的安装、维护；

400DC 高压插头插座，研究无线供用电技术、协议供用电技术、灭弧技术等，解决使用周期内需插头插座插拔的 4%的高压直流电器的应用问题。无线接口与有线插头插座应用协同分工，协议供用电实现电能的数字化封装，插销材料的抑弧及直流供用电系统的在线式绝缘监测与电弧监测，避免插拔带来的拉弧的问题，消除安全隐患。

三、建筑电器调压调功柔度设计研究

3.1 建筑负荷的需求侧响应与柔度

随着终端用户用能类型逐渐丰富，负荷柔性控制呈现多时空尺度下耦合的趋势；同时，需求响应与可再生能源技术、储能技术、电器直流化技术、电动汽车充放电技术等的结合，使得用能具有多重效益和灵活性。一方面可以实现负荷的削峰填谷，有利于多能源系统的运行；另一方面还可以保证绿色能源，符合国家提出的能源结构向绿色低碳转型的战略目标。

以实际的 DC400V 系统为例，搭建整个区域直流系统，直流负荷设备带有 DC/DC 功率适配模块，通过检测直流母线ΔU 的波动，调节负荷功率的大小，实现柔度调节，减少对电网的冲击。

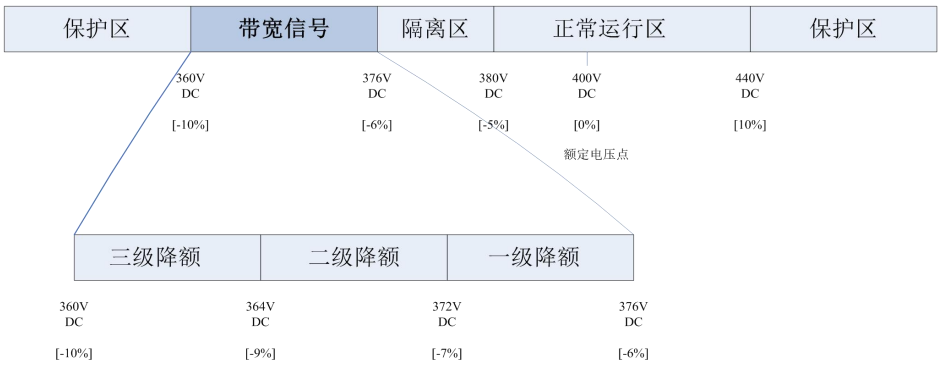

图 3.1 负荷ΔU 响应区间设计

3.2 建筑电器调压调功可行性研究

光储直柔建筑的母线以直流电压为基础，整体呈现出电压源的特性；直流电压的波动代表了能量的流动路径和大小；同时，伴随全新的电态势感知能力，可以实现对直流母线电压的精确检测；因此，负荷可以根据检测直流母线电压的波动情况，对应进行不同策略的功率调节，保证系统快速恢复平衡。

当前直流母线网主要是由电压源型变换器串并联组成的电容性的网，如同水网和湖泊，表象的瞬时电压值如同水位值一样，是由注入直流母线网络的功率总额总量决定的。注入的功率多，耗散的功率少，则瞬时电压值升，反之则降。电压源型变换器如并网侧 AC/DC 工作时，通过开关管向母线注入功率，并监测母线电压变化，不断调整注入功率大小，反复闭环控制，直到输出目标电压。而母线电压的变化不止受该变换器注入功率的影响，还受储能 DC/DC、负荷 DC/AC 等注入功率和耗散功率联合影响。当直流母线电网功率供需一直失衡时，并网侧 AC/DC 设定的目标电压将无法建立，直流母线网将解列。

开放的直流母线网上多变流器并联运行时，现主要攻关下垂控制算法来实现无主从的直流母线并网稳定运行。封闭的直流母线系统，如光储空系统尚采用主从控制来实现。主从控制的直流母线系统无法实现开放的并网连接和即插即用。

要实现△U 调压调功，以电压变化传递功率信号，完成柔度响应运行，如上要实现柔度调度控制依然可以通过指令控制并网侧 AC/DC 加大功率注入就可抬升直流母线电压，通过并网侧 AC/DC 减少功率注入，甚至反向抽取功率并网，就可以降低母线电压。这样也可以实现柔度响应运行。

3.3 建筑电器调压调功实现方法和适用范围

经对负荷类型进行总体分析，直流电器设备应与建筑主直流母线采用直接连接方式，通过内置的 DC/DC 变换器实现即插即用功能，并由设备生产商提供，不作为“光储直柔”建筑室内配电网的一部分。

以空调为例，当母线电压变化的量和时间满足响应条件时，如果空调外机监测确认母线电压降低时，空调外机根据母线电压变化的量减少自身运行功率；如果空调外机监测母线电压上升时，空调外机根据母线电压变化的量增加自身运行功率；如果母线电压超出空调的上下极限值将停止运行。

以灯为例，当母线电压变化的量在灯可接受的电压范围内时，灯按照自身的恒定功率输出运行；如果母线电压降低超出灯的可工作电压范围时，灯将降低输出功率；如果母线电压超出灯的可工作电压范围时将停止运行。

四、总结

建筑电器直流化发展首要解决“源-储-网-荷”一体化协同发展问题。直流电器的发展仅技术层面就不仅仅是电器设备单方面的直流化,还需要有直流电网和清洁的可再生能源直流源。其次是解决产品化问题。直流电器设备从实验室技术样机可行到产品化、产业化所面临的技术难度是完全不同的。产品化需要综合考虑不同应用场景、环境极限工况、客户应用需求等诸多因素，解决产品化的可靠性问题。最后是产品供应链的可靠性问题。电器设备的直流化还涉及到下游的各种部件、阀件、控制器，甚至是更底层的材料等。因此，直流电器设备的产品化，还需要解决整个直流电器设备供应链的直流化与可靠性问题。

随着建筑电器电子化和智能化的发展，直流供电是必然的发展趋势。从电梯、空调和风机水泵，到照明、冰箱、炊具和各类小家电，直流化最终都可以降低生产成本，提高产品性能，并且通过减少电量变换环节来减少损耗。只有积极地从接口、标准、调控方式等各方面引导建筑电器的直流化，主动地发展直流产品，而不是维持传统，守旧、消极地等待市场需求的变化，才能保持我国在建筑电器领域目前的领先状态，也才能进一步由家电大国发展到家电强国。