

面向交直流混联配电网稳定运行的交直流空调负荷差异化建模与协同控制

陈伦澍¹², 杨少华¹², 惠红勋^{12*}, 陈烨³, 冯威⁴

(1. 珠海澳大科技研究院, 广东 珠海 519031; 2. 智慧城市物联网全国重点实验室, 澳门 氹仔 999078; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 210000; 4. 中国科学院深圳先进技术研究院碳中和技术研究所, 广东 深圳 518055)

摘要: 老旧城区交直流混联配电网因分布式可再生能源出力的随机波动, 易引发交流侧频率越限, 亟需挖掘本地交直流灵活负荷资源以抑制频率波动。考虑到配电网中的空调负荷占比显著, 提出一种交直流空调差异化建模与协同控制方法。首先, 从控制量、动态响应与调节容量三个维度构建交直流空调差异化模型, 交流空调以温度设定值为控制量, 实现热舒适性约束下功率柔性调节; 直流空调在温度调节的同时引入功率直接控制, 实现快速、精确的功率调节。其次, 针对分布式可再生能源接入带来的功率缺额场景, 设计“交流空调优先, 直流空调补偿”的分层协同控制机制, 交流空调通过温度设定值偏移策略提供功率支撑; 直流空调采用功率缺额均分策略在交流空调支撑不足时快速精准补偿。最后, 基于澳门真实配电网拓扑与空调数据, 利用实时数字仿真系统(RTDS)开展硬件在环实测, 证实所提交直流空调协同控制策略可有效抑制频率波动, 提升配电网稳定性。

关键词: 交直流混联配电网; 频率波动; 直流空调; 交直流空调协同控制; RTDS 硬件在环

中图分类号:

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.××××××××

0 引言

高密度老旧城区(如澳门花地玛堂区、广州荔湾区等)因受限于密集的建筑布局, 配电设备改造所需的物理空间严重不足^[1]。在老旧城区的公共管网中, 电缆管沟和线路廊道已接近饱和状态, 而建筑内部的配电房、电缆竖井及桥架空间也难以进一步扩展^[2]。这种空间上的限制显著制约了配电网的扩容潜力^[3]。传统的配网扩容方法, 如新建并行馈线、增设配电房或扩容主干电缆, 均需新增敷设通道或扩大设备安装空间^[4]。然而, 在建筑密集、地下综合管线高度饱和的城区环境中, 这些措施几乎无法实施^[5]。与此同时, 全国电力需求持续攀升, 配电网运行裕度不断压缩, 其供需矛盾日益凸显^[6]。2025年7月, 全国最大电力负荷连续四次刷新历史纪录, 攀升至15.08亿千瓦, 凸显了极端气候条件下用电需求突发性激增的特征^[7]。由于配电设施无法同步升级, 高密度老旧城区的配电设备被迫长期处于高负荷运行状态。配电设备安全承

载阈值与实际运行负荷之间的安全裕度持续收窄, 使得配电网的稳定运行面临挑战^[8]。

交直流混联配电网技术为解决上述空间约束瓶颈提供了一种有效的配电网扩容途径。该技术通过对既有交流线路实施“交改直”改造, 无需额外开辟新的电缆通道或新增配电房, 可在不增加物理空间占用的情况下实现约50%的容量提升^[9]。推广新型交直流混联配电技术对澳门等老旧城区改造意义重大^[10], 该技术可在同等建设条件下显著提升配电网供电能力^[11]。相较传统交流配电网, 交直流混联配电网因其灵活接入多种能源与负荷的能力, 能更好地适应可再生能源接入及分布式电源发展需求^[12]。因此, 交直流混联配电网在接入光伏等直流电源及直流负荷方面, 具备更高效率与灵活性。

然而, 光伏等分布式可再生能源发电出力呈现显著的间歇性与波动性特征^[13]。大规模接入可再生能源会加剧发电侧的功率波动, 其高渗透率更会降低配电网的频率调节能力, 削弱系统转动惯量, 影响交直流混联配电网的稳定运行^[14]。其中, 交直流混联配电网的交流侧频率波动问题在可再生能源出力波动场景下最为突出^[15]。传统的发电侧调节资源逐渐难以抑制这种快速且随机的频率波动, 亟需挖掘负荷侧资源以抑制此类频率波动, 保障系统稳定运行。

需求响应在抑制交直流混联配电网频率波动方面发挥着重要的作用^[16]。需求响应能够依托

收稿日期: yyyy-mm-dd; 修回日期: yyyy-mm-dd

在线出版日期:

基金项目: 安徽省智慧配电网运行与控制重点实验室开放课题资助(SYS-KFKT-202509); 澳门特别行政区科学技术发展基金资助(0050/2025/AIJ, 0089/2026/RIB1)

Project supported by the Open Project of Anhui Provincial Key Laboratory of Smart Distribution Grid Operation and Control (SYS-KFKT-202509) and the Science and Technology Development Fund, Macau SAR (0050/2025/AIJ, 0089/2026/RIB1)

物联网的通信与控制技术,聚合用户侧灵活负荷资源(如空调、电动汽车等),实现对电网频率波动的快速抑制与精准调节^[17]。在澳门等高密度城市中,大型商业和公共建筑的空调系统在总负荷中占比高。这些空调设备拥有较大的功率基数,并具备显著的调节潜力,是参与需求响应,抑制配电网频率波动的理想调节资源^[18]。根据澳门人口统计数据显示^[19],截至2025年末,澳门共有207,800户住户。按照每户拥有1~3台变频空调估算,空调负荷总调节容量可达约600兆瓦。结合澳门电力运营数据^[20],2025年澳门的电力峰值负荷为1126.2兆瓦,空调负荷占峰值负荷比例可达53.2%,充分凸显了空调负荷作为需求侧资源在电网调节中的关键角色。然而,当前变频空调基本采用交流供电,随着直流电网的推广与应用,直流负荷呈现快速增长与规模化发展趋势。现有空调参与需求响应的建模方法、控制策略及交互机制,也需随之进行适应性优化与系统性调整,以匹配直流电网的运行特性与调度需求。一方面,现有空调研究大多基于房间热平衡关系以及温度设定值调整机制,运用比例-积分(PI)温度控制方法实现对室内温度的闭环控制,进而借助设定温度偏移改变压缩机频率,实现功率调节的链式效应,间接参与频率调节^[21]。但此类模型主要聚焦于温度间接功率调节,对于温度设定值变动与输入功率之间的动态映射,多采用经验参数或静态功率曲线进行表征,难以精准量化其可调节功率容量^[22]。同时,由于设备异质性的影响,不同机型的温度-功率响应特性存在显著差异,这进一步加大了大规模空调群聚合控制的难度。因此,空调参与需求响应的控制模式亟需从传统的温度-功率间接调节转向功率直接调节。另一方面,现有的空调研究缺乏对传统温度-功率间接调节与改进型功率直接调节的空调特性差异展开系统化对比分析,这不利于在交直流混联配电网调度场景下充分发挥这两类空调各自的优势。综上所述,当前空调参与配电网需求响应仍存在显著局限性,亟需在统一的热过程框架下深入分析温度-功率间接调节与功率直接调节两类空调的工作特性,建立可对比的动态响应模型。

目前,交直流混联配电网的发展尚处初期阶段,其运行控制正朝拓扑结构复杂化、换流技术多元化及应用场景多样化发展,亟需与之匹配的先进控制手段^[23]。为了提升空调参与交直流混联配电网的互动能力,格力公司提出的“光伏-储能-空调”系统,创新采用直流电直驱架构,通过省去交直流转换环节显著提升能效^[24]。直流空调作为其核心载体具备两大核心属性:一是可直接消纳光伏

直流电实现就地高效用能^[25];二是依托先进控制系统具备毫秒级功率直控能力,可实时响应电网功率调节指令^[26]。这为直流空调实现功率直接调控并参与电网频率调节提供了具体的技术路径。现有研究从电气侧验证了直流空调及相关柔性负荷在电压与功率信号驱动下的快速调节潜力^[27]。在这些研究中,直流空调多被等效为连续可调功率元件,但现有直流空调研究未在房间热动态模型框架内,明确刻画直流空调与交流空调的差异化动态响应特性^[28]。为此,直流空调在交直流混联配电网中的功率直接调节动态响应特性与控制效果仍需深入建模分析,其参与系统频率调节的量化机制亦尚待系统验证。因此,在统一热过程框架下开展交直流空调差异化建模及其协同控制研究具有重要理论价值与工程实践意义。

为充分挖掘交直流混联配电网中直流空调与交流空调负荷参与需求响应的潜力,本文提出了一种面向交直流混联配电网稳定运行的交直流空调负荷差异化建模与协同控制方法。具体而言,本文的创新点主要如下:

1. 在统一房间热动态模型下构建交流空调温度-功率间接调节与直流空调功率直接调节的差异化动态模型,定量刻画两类空调在最大爬坡率、调节容量与温度偏差方面的差异,为交直流空调参与频率调节提供精细化建模基础;
2. 提出交直流空调分层协同控制策略,根据系统频率偏差与功率缺额,分别利用交流空调的温度偏移控制与直流空调的功率直控能力,实现功率缺额快速补偿与频率协同抑制,从而提高交直流混联配电网的整体频率稳定水平;
3. 基于实时数字仿真系统(RTDS)构建交直流混联配电网硬件在环仿真平台,将所建立的交直流空调差异化模型及协同控制策略嵌入实际控制器,验证所提方法的有效性与工程可行性。

1 交直流混联配电网架构与建模基础

本章从系统层面出发,分析交直流混联配电网典型架构及运行特性并建立功率供需平衡模型。

1.1 交直流混联配电网典型架构

本研究构建的交直流混联配电网架构见附录A图A1,该架构以多种能源供应及交直流负荷协同控制为核心,充分考虑了高密度城区的供用电需求。在能源供应层面,火力发电站作为传统基础电源,通过高压输电线路接入区域变电站,为交流侧负荷(如既有交流空调)提供持续稳定的电能支撑,构成系统功率平衡的基础保障;直流电能供应则通

过分布式光伏发电经汇流箱汇集直流电后接入直流配电网。此类分布式光伏就近接入居民住宅,通过直流配电网直接为直流空调供电,既减少了交直流转换环节的能量损耗,有效提升光伏绿电的就地消纳效率。但也因其出力的间歇性特征,对配电网的功率平衡构成扰动。

在负荷层面,该架构实现交直流负荷的差异化接入。交流空调经交流配电柜及线路接入交流母线,通过动态调整设定温度来改变压缩机的工作状态以调整用电功率。直流空调直接连接直流母线,依托直流直驱技术省去交直流转换环节,同时具备功率直接控制功能。两类负荷共同构成配电网的核心可调负荷集群。

在调控层面则通过数据采集与监视控制系统(SCADA)实时采集电网电压、电流、频率等运行状态参数,负荷管理中心基于 SCADA 数据精准捕捉频率偏差等关键指标,对交直流空调集群实施动态协同调度。当光伏出力骤变导致功率供需失衡时,电网管理者可通过负荷管理中心快速调控交流空调负荷与直流空调负荷,通过改变负荷运行状态为电网提供功率支撑,实现负荷侧与发电侧的动态匹配,从而保障系统频率稳定运行。

1.2 配电网功率供需平衡模型

根据国家标准 GB/T 15945-2008《电能质量 电力系统频率偏差》规定^[29],中国电力系统标称频率为 50 Hz,正常运行条件下频率偏差 $\Delta f_{\text{sys}}(t)$ 限制为 $\pm 0.2\text{Hz}$,即配电网的频率 $f_{\text{sys}}(t)$ 应满足如下约束:

$$49.8\text{Hz} \leq f_{\text{sys}}(t) \leq 50.2\text{Hz}. \quad (1)$$

当配电网由于光伏出力波动导致发电侧有功功率波动时,配电网频率调节将会出现有功支撑能力不足的情况。此时配电网最低点频率 f_{NADIR} 可能会超出安全运行范围。为保障配电网频率运行于安全区间,配电网发电侧输出功率与负荷侧有功功率需处于动态平衡状态。维持配电网频率稳定所要求的功率供需平衡可表述如下:

$$P_{\text{GEN}}(t) = P_{\text{LOAD}}(t), \quad (2)$$

式中, $P_{\text{GEN}}(t)$ 为 t 时刻电网中的发电侧总功率, $P_{\text{LOAD}}(t)$ 为 t 时刻负荷侧总功率。发电侧的总功率 $P_{\text{GEN}}(t)$ 和负荷侧的总功率 $P_{\text{LOAD}}(t)$ 可进一步表示为:

$$\begin{cases} P_{\text{GEN}}(t) = \sum_{i=1}^I P_{\text{PV}}^i(t) + \sum_{i=1}^I P_{\text{THE}}^i(t), \\ P_{\text{LOAD}}(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{\text{IAC}}^{\text{AC},ij}(t) + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K P_{\text{IAC}}^{\text{DC},ik}(t) + \sum_{i=1}^I P_{\text{FIX}}^i(t), \end{cases}$$

(3)

式中, $\sum_{i=1}^I P_{\text{PV}}^i(t)$ 为光伏发电总功率, $\sum_{i=1}^I P_{\text{THE}}^i(t)$ 为火力发电总功率; $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{\text{IAC}}^{\text{AC},ij}(t)$ 为交流空调负荷总功率; $\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K P_{\text{IAC}}^{\text{DC},ik}(t)$ 为直流空调负荷总功率; $\sum_{i=1}^I P_{\text{FIX}}^i(t)$ 为其他不参与控制的负荷总功率; i 表示配电网中的节点序号, $i \in [1, 2, \dots, I]$, I 表示节点总数; j 表示节点中的交流空调序号, $j \in [1, 2, \dots, J]$, J 表示交流空调总数; k 表示节点中的直流空调序号, $k \in [1, 2, \dots, K]$, K 表示直流空调总数; ij 和 ik 分别表示节点 i 中第 j 台交流空调和第 k 台直流空调。

为量化配电网供需失衡的程度,本文定义配电网功率偏差 $P_{\text{DIS}}(t)$,其表达式可参见附录 B。本文第 3 节将在此基础上,设计交直流空调协同控制策略。

2 交流空调与直流空调差异化建模

空调模型由房间热动态模型与空调功率模型两大核心模型构成。如图 1 所示,交流空调与直流空调存在共性,均需对热传递过程与功率转换特性进行精准刻画;然而,在控制量特性、动态响应机理及调节容量三个维度,交流空调与直流空调呈现出显著差异。首先,在控制量层面,在常规运行工况下,直流空调同样具备与交流空调等效的温度调节功能。在空调参与需求响应场景下,交流空调以室内温度为控制目标,通过调节设定温度间接实现功率控制;直流空调则以输入功率作为控制目标,实现快速功率调节。其次,在动态响应层面,交流空调受限于房间热动态及温度控制滞后特性,将呈现缓慢渐进式调节特性;直流空调基于功率直控架构,具备显著更快的控制响应速度。最后,在调节容量方面,交流空调受用户舒适性约束,其可调功率受限;直流空调可在额定功率范围内实现连续调节,调节裕度明显更大。为了量化交流空调与直流空调的模型差异,本文定义最大爬坡率 r_{max}^{il} 、调节容量 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{il}$ 与温度偏差 T_{reg}^{il} 等量化指标,对应指标公式可参见附录 C。其中 l 表示节点中的交流空调与直流空调的序号, $l \in [1, 2, \dots, J] \cup [1, 2, \dots, K]$; il 表示节点 i 中第 l 台空调。基于上述差异化特征,本节分别构建交流空调与直流空调的数学模型,为协同控制策略奠定建模基础。

2.1 房间热动态模型

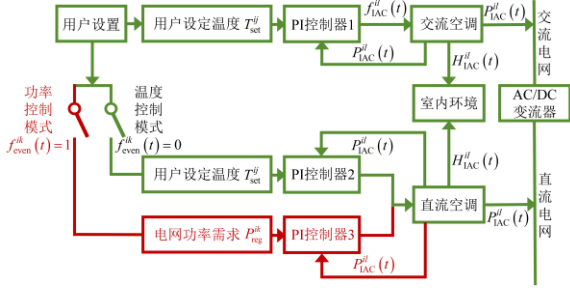


图1 交流空调与直流空调的模型构建及控制机制

Fig.1 Modeling and control mechanisms for AC and DC air conditioners

房间热动态模型是基于热力学定律建立的热平衡方程，用于描述室内温度随时间的变化规律^{错误!未找到引用源。}。该模型是分析空调负荷热交换过程的基础，对模型公式可参见附录 D.1。

2.2 压缩机频率与空调功率的动态响应关系建模

空调的运行功率 $P_{IAC}^{ij}(t)$ ，包括交流空调功率 $P_{IAC}^{AC,ij}(t)$ 和直流空调功率 $P_{IAC}^{DC,ik}(t)$ ，均受压缩机的频率影响^{错误!未找到引用源。}，其动态响应模型可参见附录 D.2。

2.3 交流空调建模

交流空调的核心特征是以温度设定值为调节变量，其机理是基于房间热动态变化间接实现功率调节。通过 PI 温度控制器实时跟踪室内温度与设定温度的偏差，根据室内实际温度 $T_a^{ij}(t)$ 与设定温度 $T_{set}^{AC,ij}(t)$ 的差值及积分量动态调整压缩机频率，确保室内温度稳定在舒适范围。交流空调的压缩机频率变化 $\Delta f_{IAC}^{AC,ij}(t)$ 与 $T_{set}^{AC,ij}(t)$ 的关系可以表示为 [30]：

$$\Delta f_{IAC}^{AC,ij}(t) = \alpha_e^{ij} (T_a^{ij}(t) - T_{set}^{AC,ij}(t)) + \beta_e^{ij} \int (T_a^{ij}(t) - T_{set}^{AC,ij}(t)) dt, \quad (4)$$

式中， α_e^{ij} 和 β_e^{ij} 是交流空调 PI 温度控制器的系数。

2.4 直流空调建模

直流空调通过直流母线直接接入交直流混联配电网，突破传统空调依赖交流供电的局限，实现与光伏直流输电的高效适配^[31]。其在保留原有温度控制功能的同时，兼具功率直接控制能力，可根据负荷管理中心下发的功率指令值 $P_{reg}^{ik}(t)$ 实时动态调整运行功率，从而快速响应光伏波动与系统频率偏差。直流空调在温度控制模式下（即 $f_{even}^{ik}(t)=0$ ）压缩机频率变化 $\Delta f_{IAC}^{DC,ik}(t)$ 与空调的设定温度 $T_{set}^{DC,ik}(t)$ 相关。其模型的数学表达式与交流空调一致，可以表示为：

$$\Delta f_{IAC}^{DC,ik}(t) = \alpha_e^{ik} (T_a^{ik}(t) - T_{set}^{DC,ik}(t)) + \beta_e^{ik} \int (T_a^{ik}(t) - T_{set}^{DC,ik}(t)) dt. \quad (5)$$

直流空调在功率控制模式下（即 $f_{even}^{ik}(t)=1$ ）的控

制机制是基于 PI 功率控制器，实时跟踪功率指令值 $P_{reg}^{ik}(t)$ 与空调实际运行功率 $P_{IAC}^{DC,ik}(t)$ 的偏差。通过动态调整压缩机频率 $\Delta f_{IAC}^{DC,ik}(t)$ 实现功率的快速、精准调节，从而直接响应电网功率缺额需求。该过程的数学表达式可以表示为：

$$\Delta f_{IAC}^{DC,ik}(t) = \alpha_a^{ik} (P_{reg}^{ik}(t) - P_{IAC}^{DC,ik}(t)) + \beta_a^{ik} \int (P_{reg}^{ik}(t) - P_{IAC}^{DC,ik}(t)) dt, \quad (6)$$

式中， α_a^{ik} 和 β_a^{ik} 是直流空调在功率控制时 PI 控制器的系数。

3 交流空调与直流空调协同控制方法

本节分别设计适配交直流空调特性的控制策略与协同控制方法以实现参与频率波动抑制。

3.1 交流空调控制

本研究中交流空调在参与需求响应过程中，通过将设定温度 $T_{set}^{AC,ij}(t)$ 提升一定值，使调整后的室内温度维持在舒适范围内^[32]。参与需求响应调整后空调新设定温度满足如下公式：

$$T_{set,new}^{AC,ij}(t) = T_{set,ori}^{AC,ij}(t) + T_{set}^{AC,ij}(t), \quad (7)$$

式中， $T_{set}^{AC,ij}(t)$ 为空调参与需求响应温度提升值； $T_{set,new}^{AC,ij}(t)$ 为参与需求响应后空调的温度设定值。该方法能够确保空调参与需求响应后的室内温度仍处于设计标准舒适范围。该策略无需对空调本体硬件进行改造，工程实施便捷，用户改造成本小，能在保障房间热舒适性的同时为电网提供柔性调节能力^{错误!未找到引用源。}。

3.2 直流空调控制

本研究中直流空调采用功率缺额均分控制策略，精准地为配电网提供功率支撑。当负荷管理中心确定需由直流空调集群响应的功率缺额 $P_{DC,adj}(t)$ 后，每台直流空调根据集群总调节容量按比例承担调节功率，确保功率缺额均匀分配。单台直流空调参与需求响应的功率调整可表示为：

$$P_{DC,new}^{ik}(t) = P_{DC,ori}^{ik}(t) + \frac{P_{avareg}^{ik}(t)}{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K P_{avareg}^{ik}(t)} P_{DC,adj}(t), \quad (8)$$

式中， $P_{DC,ori}^{ik}(t)$ 为直流空调初始功率设定值； $P_{DC,new}^{ik}(t)$ 为参与需求响应后直流空调的功率设定值； $P_{avareg}^{ik}(t)$ 表示单台直流空调在 t 时刻可用于参与群体调节的功率值，该值受空调设备运行环境温度与功率响应特性约束限制。

3.3 交流空调与直流空调协同控制

本研究重点关注因光伏出力波动导致的配电网功率缺额进而引发的频率波动问题，其中 ε_1 和 ε_2 表分别表示配电网运行的功率安全裕度上下限，其定义详见附录 B。如图 2 所示，本研究中的

交直流空调协同控制的核心逻辑是当负荷管理中心通过 SCADA 系统监测到电网功率出现缺额时,依托交直流空调的差异化调节特性实现协同响应,在保障热舒适性的同时平抑功率失衡。其协同过程以交流空调优先调节,直流空调动态补偿为原则,通过量化评估与精准分配实现负荷侧与电网的动态匹配。当 $P_{\text{Dis}}(t) < \varepsilon_1$ 时,负荷管理中心基于房间热动态模型与交流空调模型评估交流空调集群的可调节功率容量,通过温度偏移实现负荷平缓削减,此时交流空调总功率调节量可表示为:

$$P_{\text{AC,adj}}(t) = \sum_{i,j} (P_{\text{AC,new}}^{ij}(t) - P_{\text{AC,ori}}^{ij}(t)), \quad (9)$$

式中, $P_{\text{AC,ori}}^{ij}(t)$ 和 $P_{\text{AC,new}}^{ij}(t)$ 分别为空调 ij 需求响应前、后的运行功率。若交流空调的可调节功率容量足以覆盖功率缺额,即

$$\varepsilon_1 \leq P_{\text{Dis}}(t) - P_{\text{AC,adj}}(t) \leq \varepsilon_2, \quad (10)$$

则负荷管理中心仅通过交流空调的温度偏移策略完成控制,利用房间热惯性实现负荷柔性调节,同时保障房间的热舒适性。若交流空调集群的可调节功率容量不足,即

$$P_{\text{Dis}}(t) - P_{\text{AC,adj}}(t) \leq \varepsilon_1, \quad (11)$$

则启用直流空调的功率缺额均分策略进行补偿。该状态下电网的剩余功率缺额表示为:

$$P_{\text{DC,adj}}(t) = P_{\text{Dis}}(t) - P_{\text{AC,adj}}(t). \quad (12)$$

此时负荷管理中心向直流空调集群下发控制指令,每台直流空调承担的功率调节量按公式(8)计算并分配。

4 算例分析

为了验证所提出的直流空调模型准确性及交直流空调协同控制方法的有效性,本章基于 RTDS 构建交直流混联配电网硬件在环实验平台,结合澳门城区配电网实际拓扑与空调设备参数开展实验验证。

4.1 实验设置

本研究构建的交直流混联配电网的硬件在环实验平台见附录 E 图 E1。RTDS 硬件在环实验平台构建可参见附录 E.1。交流空调与直流空调的实验设置可参见附录 E.2。本研究中所配置的空调集群参数详见附录 F 表 F1 所示,空调的模型参数如附录 F 表 F2 所示。交流空调集群(共计 113,200 台)代表了现有的空调设备,实验中空调集群的运行功率设置为 140.368 MW;直流空调集群(共计 29,600 台)作为新增的可控资源,实验中空调集群的运行功率设置为 36.704 MW。该配置精确反映高密度城区的空调负荷特性,并为光伏故障等功

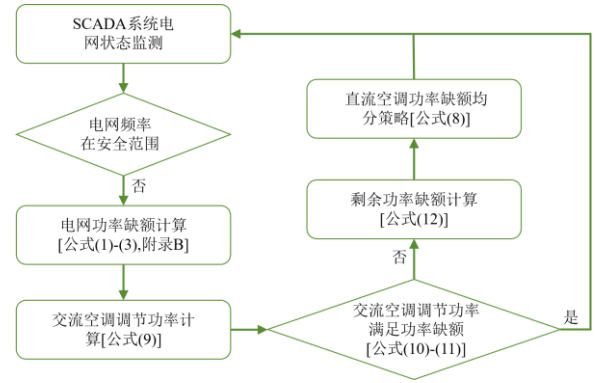


图2 交流空调与直流空调协同控制方法

Fig.2 Coordinated control of AC and DC air conditioners

率缺额情景下的协同控制效果评估提供数据支撑。同时,本实验基于国家标准 GB 50189《公共建筑节能设计标准》^[33]中夏季室内设计温度要求,考虑到用户舒适需求,设定交流空调初始温度设定值 $T_{\text{set,ori}}^{\text{AC},ij}(t)$ 在 $23^{\circ}\text{C} \sim 26^{\circ}\text{C}$ 区间内随机分布,设定空调参与需求响应温度提升值 $T_{\text{set}}^{\text{AC},ij} \in [1, 3]^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 直流空调模型验证

本文基于真实运行数据对所提出的直流空调模型进行验证。如图3所示,本实验采集了格力分体变频热泵型落地式房间空调在 10:30 至 16:30 期间的运行数据,涵盖 1 kW 至 2 kW 宽范围功率调节过程以及功率上调和下调工况,时间分辨率为 1 分钟。通过对比模型输出与实测数据,系统分析了模型参数压缩机动态响应时间常数 T_c 对功率轨迹拟合效果的影响。

实验结果显示,时间常数 T_c 的取值对模型精度具有显著影响。当时间常数 T_c 取不同数值时,模型的拟合精度存在显著差异。如图 4(a)~(d) 所示,当时间常数 $T_c = 30$ 时,模型响应滞后现象较为明显,尤其在功率爬升与下降阶段出现跟踪偏差和超调振荡。随着 T_c 时间常数逐渐减小,模型输出曲线与真实数据的契合度先逐步提升,而后趋于稳定。通过参数优化,确定时间常数 $T_c = 5$ 时,模型的动态特性达到最优,模型功率曲线与实测数据高度相符。此时,模型对真实空调运行特性的描述最为精准,不仅在功率上调阶段能够快速响应且无明显超调,在功率下调阶段也可平稳跟踪实际功率变化,有效验证了所提出的直流空调模型的准确性与可靠性。

4.3 交流空调与直流空调的控制策略实验效果分析

为验证本文所提出的交流空调温度偏移控制策略以及直流空调功率缺额均分控制策略的有效

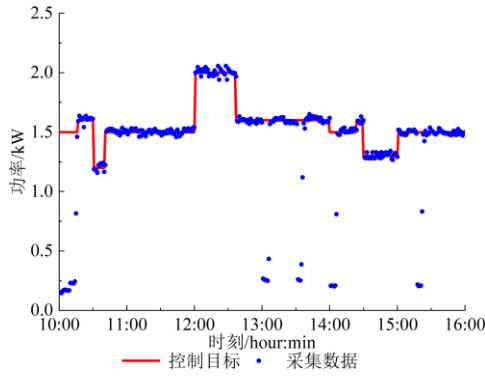


图3 直流空调实际运行数据采集

Fig.3 DC Air Conditioner Operating Data

性,本研究在相同的初始运行功率(1.64 kW)条件下开展了对比实验。实验过程中,控制电脑上位机软件在空调运行至1分钟时向其下达控制指令,实验结果如图5(a)~(b)所示。

在控制量特性方面,直流空调通过功率直控方式,可在指令下发后快速完成功率下调过程。根据附录C计算得,其主要功率下调过程响应终止时间 $t_{\text{stop}}^{\text{II}}$ 为20 s,最大爬坡率 $r_{\text{max}}^{\text{II}}$ 为0.13 kW/s,调节容量 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{\text{II}}$ 为0.64 kW,温度偏差 $T_{\text{reg}}^{\text{II}}$ 为2.36 °C。由此可见,直流空调在该工况下表现出较大的 $r_{\text{max}}^{\text{II}}$ 与 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{\text{II}}$,能够在较短时间内提供明确的功率下调支撑,但其 $T_{\text{reg}}^{\text{II}}$ 相对较大,室温扰动更为显著。相比之下,交流空调采用温度偏移控制策略,分别进行了三组不同调节幅度的实验:设定温度从23 °C提升至24 °C、25 °C和26 °C。根据附录C计算得,响应终止时间 $t_{\text{stop}}^{\text{I}}$ 皆为900 s;最大爬坡率 $r_{\text{max}}^{\text{I}}$ 分别为0.01 kW/s、0.02 kW/s、0.03 kW/s;调节容量 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{\text{I}}$ 分别为0.17 kW、0.34 kW和0.51 kW;温度偏差 $T_{\text{reg}}^{\text{I}}$ 分别为0.52 °C、1.04 °C和1.54 °C。与直流空调相比,交流空调的 $r_{\text{max}}^{\text{I}}$ 较小且 $t_{\text{stop}}^{\text{I}}$ 较长,反映其功率调节受热惯性与温控环节影响,呈现功率渐近收敛的特征;同时其 $T_{\text{reg}}^{\text{I}}$ 更小,体现出对舒适性的扰动更弱。从调节容量 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{\text{I}}$ 来看,单台直流空调可在额定范围内连续调节,实现更大的瞬时调节裕度;而交流空调的调节容量受热舒适性边界限制,削减能力随设定温度提升有限增长。

为了进一步分析交直流空调在群体尺度下的整体调节能力,在上述单台设备功率与温度响应特性分析的基础上,本研究对1000台交直流空调集群进行功率响应实验,评估其聚合调节性能。图5(c)展示了该集群的功率响应过程。交流空调初始设定温度在23 °C~26 °C间随机分布,参与需求响应时温度设定值随机提升1 °C~3 °C;直流空调初始运行功率分布于0.3~3.1 kW,交流空调分布于0.2~2.5 kW,以反映群体设备的自然差异

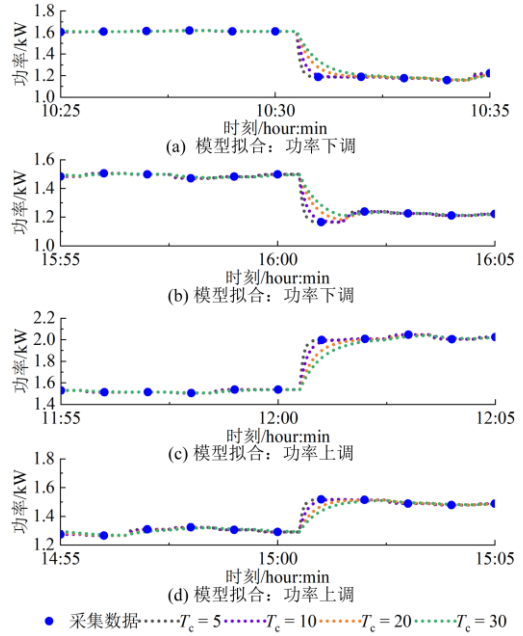


图4 直流空调模型参数调试与功率拟合效果分析

Fig.4 The results of the proposed DC air conditioner model parameter adjustment and power fitting

性与运行异质性。实验设置空调集群运行功率需从1.24 MW降低至0.5 MW,以验证在聚合层面能否实现相同功率削减目标。实验结果表明,直流空调集群在接收到功率阶跃指令后,能够快速将总功率降至目标值,完全实现预设削减目标,指令响应完成率达100%。根据附录C计算得,集群响应终止时间 $t_{\text{stop}}^{\text{IK}}$ 为41 s,最大爬坡率 $r_{\text{max}}^{\text{IK}}$ 为148.5 kW/s,调节容量 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{\text{IK}}$ 为0.74 MW。这表明直流集群具有更强的瞬时下调速度(即较大 $r_{\text{max}}^{\text{IK}}$),且其 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{\text{IK}}$ 与目标削减量一致,能够在聚合层面实现快速、可验证的功率削减。相比之下,交流空调集群采用温度偏移控制策略后,总功率由1.24 MW下降并逐步趋于收敛,最终降至0.93 MW,仅完成目标调节量的约41.89%。同样代入附录C指标定义可得,集群响应终止时间 $t_{\text{stop}}^{\text{IU}}$ 为900 s,最大爬坡率 $r_{\text{max}}^{\text{IU}}$ 为15.9 kW/s,调节容量 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{\text{IU}}$ 为0.31 MW。由此可见,交流集群的 $r_{\text{max}}^{\text{IU}}$ 明显小于直流集群,体现其功率变化更为平滑;同时 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{\text{IU}}$ 明显小于目标削减量,说明在该实验工况与舒适性约束下,仅依靠温度偏移难以完成同等削减任务,其总体过程呈现渐进收敛的特征。

结合直流空调与交流空调集群的 r_{max} 与 $\mathcal{R}_{\text{reg}}$ 的对比可进一步表明,直流空调在系统频率突变时可提供快速、精确的瞬时功率支撑,更适用于对功率缺额的快速、精确补偿。而交流空调通过温度偏移策略在保障热舒适性的前提下实现平滑削峰,更适用于在舒适性约束下提供平滑削峰与持续柔性支

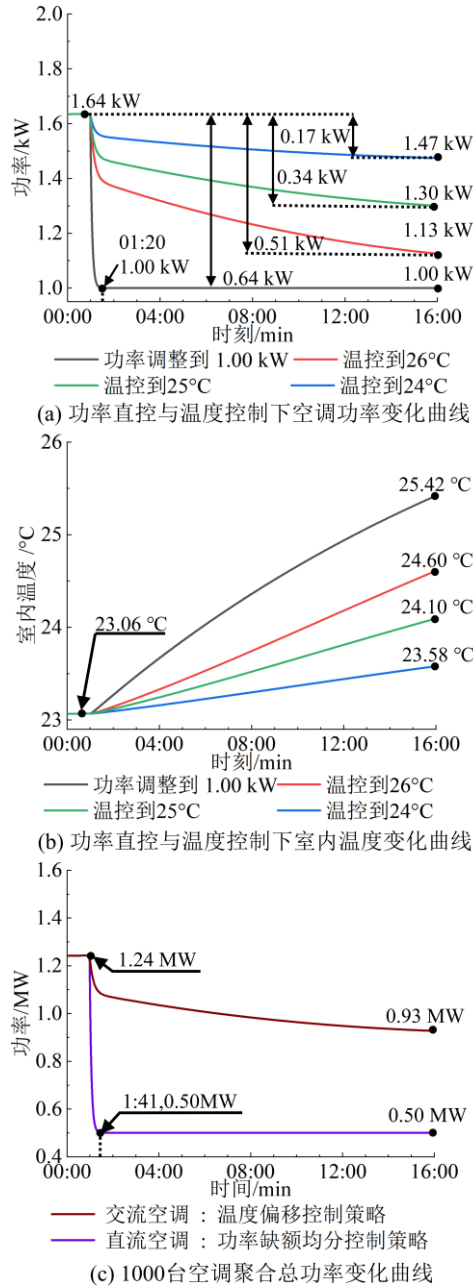


图5 交流空调及直流空调控制策略效果分析

Fig. 5 The results of control strategy for AC and DC air conditioners

撑。两类负荷在响应速度与舒适性层面形成显著互补,定量验证了交直流空调在不同时间尺度下的分层调节特性,为后续协同控制策略设计提供了实验依据。

4.4 交流空调与直流空调的协同控制效果实验分析

为进一步分析交流空调与直流空调在交直流混联配电网中的协同控制参与配电网频率波动抑制效果,本文在RTDS平台构建的交直流混联配电网模型并模拟光伏故障导致配电网频率波动的场

表1 交流空调与直流空调不同控制策略方案设计

Table 1 Different control strategies for AC and DC air conditioners

方案	交流空调	直流空调
方案0	未参与调节	未参与调节
方案1	通过温度偏移控制参与调节	未参与调节
方案2	通过与直流空调协同控制参与调节	通过与交流空调协同控制参与调节

景。为便于对比分析不同控制策略的效果,本实验设计了方案0、方案1、方案2三组不同控制策略对照实验组,如表1所示。如图6(a)所示,本实验模拟了因光伏故障导致电网出现64.18 MW功率缺额的情况,即 P_{Dis} 为-64.18 MW,设置系统允许的功率运行裕度 ε_1 为-1 MW及 ε_2 为1 MW。根据上述4.3实验分析,运行功率为36.704 MW的直流空调集群在功率直控模式下具备约36.704 MW的瞬时可调能力,能够实现全功率削减;而运行功率为140.368 MW的交流空调集群基于温度偏移控制可提供约58.80 MW的柔性削减容量。两类空调的可调节能力合计约95.5 MW,足以覆盖设定的64.18 MW功率缺额。如图6(c)所示,方案0中电网初始频率维持在50.03 Hz。在光伏故障瞬间,系统功率供需失衡,电网频率快速跌落,最低点频率 f_{NADIR} 为49.48 Hz,配电网频率偏差超出安全运行区域(49.8 Hz-50.2 Hz),此时系统频率无法自行恢复到安全运行区域。

如图6(b)所示,方案1中,交流空调通过温度偏移控制策略参与响应。根据附录F表F1和表F2的实验设置,同时受实际响应过程中温度约束影响,交流空调在该场景下仅能提供35.18 MW的功率下调支撑。如图6(c)所示,此时配电网稳态频率为49.62 Hz。相较于方案0,方案1中配电网的最低点频率 f_{NADIR} 抬升了0.14 Hz,最大频率偏差降低了约25.45%。该实验结果表明纯交流空调具有一定频率波动抑制能力,但由于交流空调的功率调节是通过温度间接控制,其响应速度和调节精度有限,仍无法使电网频率恢复至安全范围内。

在此基础上,方案2中的直流空调依据所提功率缺额均分控制策略,响应方案1中电网的功率缺额。如图6(b)所示,当电网出现功率缺额时,直流空调集群响应交流空调未完成的功率缺额,为电网提供29 MW的功率下调支撑。如图6(c)所示,方案2中电网频率在故障后短时间内迅速回升并逐渐稳定,显著抑制了交直流混联配电网的频率波动。与方案1相比,方案2中的最低点频率 f_{NADIR}

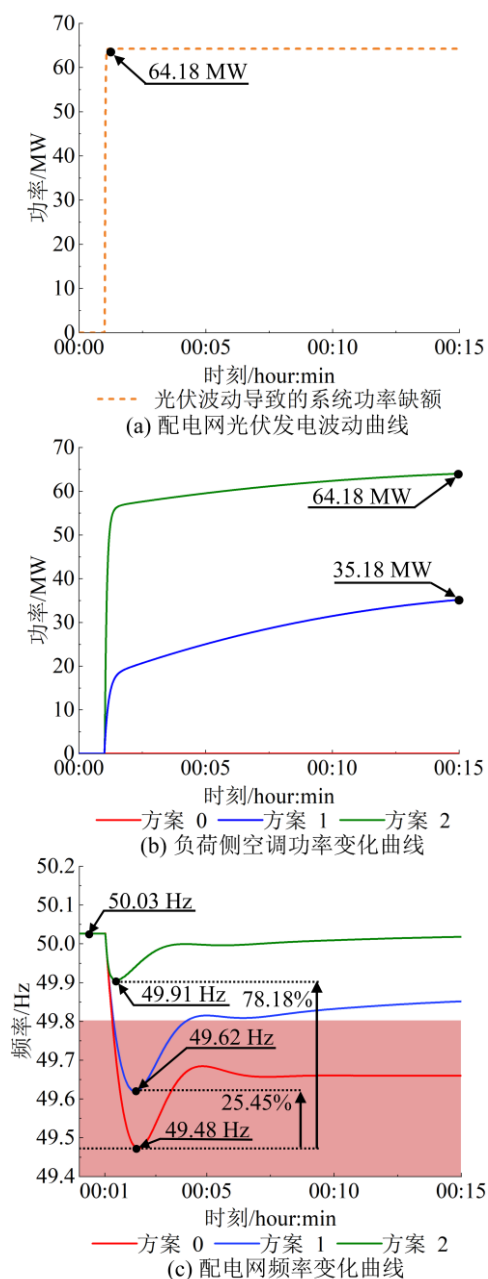


图6 交流空调与直流空调的协同控制效果分析

Fig. 6 The results of cooperative control method of AC and DC air conditioners

显著抬升,最低点频率 f_{NADIR} 抬升了 0.29 Hz;与方案 0 中相比,最低点频率 f_{NADIR} 抬升了 0.43 Hz,最大频率偏差降低了约 78.18%。实验结果表明交流空调的柔性调节与直流空调的快速响应形成了互补,使频率在快速跌落阶段得到及时制动,并能在之后平稳收敛。

5 结论

针对交改直构建的交直流混联配电网中直流空调建模缺失以及交直流空调尚缺乏协同控制机制的问题,本文提出面向稳定运行的交直流空调负荷差异化建模与协同控制方法。通过构建交直流空

调差异化模型体系,并提出“交流优先、直流补偿”的交直流空调分层协同控制策略,实现空调跨时间尺度的协同响应。所提方法通过 RTDS 交直流混联配电网与空调硬件在环实验平台,结合澳门真实配电网拓扑及空调运行数据进行实验验证。结果表明,所构建直流空调模型能够准确拟合实测功率轨迹,所提协同控制方法可显著抑制光伏波动引起的频率波动;相较于无空调参与需求响应场景,最低点频率抬升 0.43 Hz,最大频率偏差改善 78.18%,有效提升了交直流混联配电网的频率稳定性与运行安全裕度。

本研究所提方法显著增强了交直流混联配电网对可再生能源出力波动性的适应能力,为配电网稳定运行提供有力保障,具有重要工程应用价值。未来工作将考虑引入更为精细的热—电映射模型,进一步提升空调负荷的精细化建模水平,并在模型泛化能力与应用场景扩展等方面开展深入研究。

致 谢

本研究中实验数据的测量记录工作是在珠海格力电器股份有限公司任鹏、郑友林、赵俊杰等工作人员的大力支持下完成的,在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 孙鹏伟,谢惠藩,郭铸,等.柔性直流带城市电网孤网运行场景风险分析[J].电力自动化设备,2025,45(10):22-29.
SUN Pengwei, XIE Huifan, GUO Zhu, et al. Risk analysis of islanded network operation scenario for urban power grid supported by VSC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(10): 22-29.
- [2] 吉悦阳,李鹏,冀浩然,等.基于改进 Sen 变压器的配电网柔性互联运行特性分析[J].电力系统自动化,2026,50(01):20-28.
JI Yueyang, LI Peng, JI Haoran, et al. Analysis on Flexible Interconnection Operation Characteristics of Distribution Network Based on Modified Sen Transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2026, 50(01): 20-28.
- [3] 吴熙,王银花,司金冬,等.基于拓扑-功率传输关系的柔性互联选址定容[J].电力系统自动化,2025,49(23):48-56.
WU Xi, WANG Yinhua, SI Jindong, et al. Siting and Sizing for Flexible Interconnection Based on Relationship Between Topology and Power Transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(23): 48-56.
- [4] 陈逸飞,郑子萱,肖先勇,等.数据-物理混合驱动的配电网运行韧性评估方法与提升策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(10):13-22.
CHEN Yifei, ZHENG Zixuan, XIAO Xianyong, et al. A data-physical hybrid-driven method for evaluating and enhancing the operational resilience of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(10): 13-22.

- [5] 朱沿任,石庆鑫,苗谊凡,等.基于随机源——荷场景集的多区域电力系统可用输电能力评估[J].智慧电力,2025,53(07):36-44.
ZHU Yanren, SHI Qingxin, MIAO Yifan, et al. Available Transfer Capability Assessment for Multi-area Power Systems Based on Stochastic Source-Load Scenario Setst[J]. Smart Power, 2025, 53(07): 36-44.
- [6] 张勇军,成润婷,史训涛,等.市场环境分布式智能电网关键技术与机制研究综述[J].电力自动化设备,2025,45(06):1-14
.ZHANG Yongjun, CHENG Runtong, SHI Xuntao, et al. Review of research on key technologies and mechanisms for distributed smart grid in market environment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(06): 1-14.
- [7] 人民日报.迎峰度夏全国电力负荷创新高 [EB/OL].
https://paper.people.com.cn/rmrbhwb/pc/content/202507/08/content_30085549.html, [2025-08-11]
- [8] 吉兴全,张丽泓,刘琪,等.电压与容量约束下柔性互联配电网安全裕度评估与优化提升[J].电力系统自动化,2025,49(13):52-60.
JI Xingquan, ZHANG Lihong, LIU Qi, et al. Evaluation and Optimization Improvement for Safety Margin in Flexibly Interconnected Distribution Network Under Voltage and Capacity Constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(13): 52-60.
- [9] Larruskain D M, Zamora I, Abarrategui O, et al. Conversion of AC distribution lines into DC lines to upgrade transmission capacity[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81:1341-1348. DOI:10.1016/j.epsr.2011.01.020.
- [10] 宋永华, 张洪财, 陈戈. 智慧城市能源系统迈向碳中和的典型路径研究——以澳门特别行政区为例[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1650-1663.
SONG Yonghua, ZHANG Hongcai, CHEN Ge. Typical Pathway to Carbon Neutrality for Urban Smart Energy Systems—Case Study of Macao Special Administrative Region[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1650-1663
- [11] Zhang, L., Liang, J., Tang, W., Li, G., Cai, Y., & Sheng, W. Converting AC distribution lines to DC to increase transfer capacities and DG penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(2): 1477-1487.
- [12] 马文忠,朱英杰,王玉生,等.交直流混合微电网双向接口变换器自适应控制策略[J].电力自动化设备,2025,45(11):130-136.
MA Wenzhong, ZHU Yingjie, WANG Yusheng, et al. Adaptive control strategy for bidirectional interface converter in AC/DC hybrid microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(11): 130-136.
- [13] 李晓露,王嘉信,柳劲松,等.考虑多重不确定性的虚拟电厂多主体协同交易优化策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(21):133-145.
LI Xiaolu, WANG Jiaxin, LIU Jinsong, et al. Multi-stakeholder collaborative trading optimization strategy for virtual power plants considering multiple uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(21): 133-145.
- [14] 王文坚,陈飞雄,林世琦.新型电力系统下调频容量需求计算与储-荷调频方法研究综述[J].智慧电力,2025,53(12):1-12.DOI:10.20204/j.sp.2025.12001.
WANG Wenjian, CHEN Feixiong, LIN Shiqi. A Review of Frequency Regulation Capacity Demand Calculation and Energy Storage-Load Frequency Regulation Methods in New-type Power Systems[J]. Smart Power, 2025, 53(12): 1-12. DOI:10.20204/j.sp.2025.12001.
- [15] 李婷,胥威汀,刘向龙,等.含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2019,47(12):177-187.
LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy, 2019, 47(12): 177-187.
- [16] 吉兴全,李元芳,叶平峰,等.源-网-荷-储与低碳-经济双重协同的电力系统规划[J].电力自动化设备,2025,45(09):174-182.
JI Xingquan, LI Yuanfang, YE Pingfeng, et al. Power system planning based on double synergy of source-network-load-storage and low carbon-economy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(09): 174-182.
- [17] 刘效辰,刘晓华,张涛,等.建筑区域广义储能资源的刻画与设计方法[J].中国电机工程学报,2024,44(06):2171-2185.
LIU Xiaocheng, LIU Xiaohua, ZHANG Tao, et al. Characterization and Design Method of Generalized Energy Storage Resources in or Around Buildings [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(06): 2171-2185.
- [18] 吴桐,惠红勋,张洪财.商业建筑空调系统参与城市电网负荷调控综述[J].中国电力,2023,56(07):1-11.
WU Tong, HUI Hongxun, ZHANG Hongcai. Review of Commercial Air Conditioners for Participating in Urban Grid Regulation [J]. Electric Power, 2023, 56(07): 1-11.
- [19] 澳门统计暨普查局.人口及住户 [EB/OL].
<https://www.dsec.gov.mo/zh-CN/Statistic?id=1>, [2026-08-17].
- [20] 澳门电力股份有限公司.营运 [EB/OL].
<https://www.cem-macau.com/zh/about-cem/company-profile/operation/>, [2026-08-17].
- [21] Hui H, Ding Y, Zheng M. Equivalent modeling of inverter air conditioners for providing frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(2): 1413-1423.
- [22] Zhou T, Chen H, Zhang N, et al. An analogue on/off state-switching control method suitable for inverter-based air conditioner load cluster participating in demand response[J]. Applied Energy, 2024, 363: 123096.
- [23] 李周,王宇涵,顾伟,等.直流电网及其运行控制策略发展趋势[J].电力系统自动化,2024,48(24):1-21.
LI Zhou, WANG Yuhuan, GU Wei, et al. Development Trend of DC Power Grid and Its Operation Control Strategies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 1-21.
- [24] 董明珠,空调光储直流化关键技术研究及应用[Z].广东省,珠海格力电器股份有限公司,2018-05-05.
- [25] Ye A, Zhao Z, Liu S, et al. Flexible energy utilization potential of demand response oriented photovoltaic direct-driven air-conditioning system with energy storage[J]. Energy and Buildings, 2024, 323: 114818.

- [26] Ren P, Chen L, Hui H. Power-controllable variable refrigerant flow system with flexibility value for demand response[J]. *Energy*, 2024, 313: 133820.
- [27] 袁金荣,赵志刚,惠红勋,等.基于直流母线电压的光储直柔系统柔性负荷功率调节实证研究[J].*广东电力*,2025,38(09):15-22.
YUAN Jinrong, ZHAO Zhigang, HUI Hongxun, et al. Empirical Study of Flexible Load Power Regulation Based on Dc Bus Voltage in Photovoltaic Energy Storage Direct Flexible Systems [J]. *Guangdong Electric Power*, 2025, 38(09): 15-22.
- [28] 任鹏,赵志刚,高洪超,等.基于功率直控的源储荷协同微电网的弱连接调控技术[J].*中国电力*,2025,58(4):13-20.
REN Peng, ZHAO Zhigang, GAO Hongchao, et al. Weak Connection Regulation Technology for Source-Storage-Load Collaborative Microgrids Based on Direct Power Control [J]. *Electric Power*, 2025, 58(4):13-20.
- [29] GB/T 15945—2008 电能质量 电力系统频率偏差[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [30] Hui H, Song Y. Equivalence of Inverter Air Conditioners as Virtual Synchronous Generators for Enhancing Power System Inertia and Frequency Stability[J]. *Energy Use*, 2025, 1(1): 100009-1-100009-9.
- [31] 康靖,陈泉,李雨桐.基于建筑直流配电母线电压的多联机空调柔性运行机制研究与实践[J].*暖通空调*,2023,53(S2):39-43.
- KANG Jing, CHEN Quan, LI Yutong. Research and Practice on Flexible Operation Mechanism for Multi-split Air Conditioning Systems Based on DC Bus Voltage in Buildings [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2023, 53(S2): 39-43.
- [32] 张振威,惠红勋,胡厚鹏,宋永华.面向城市“微气候-能耗”恶性循环的建筑群梯级能效优化方法研究[J/OL].*中国电机工程学报*,2026-01-02.
ZHANG Zhenwei, HUI Hongxun, HU Houpeng, and SONG Yonghua. Hierarchical Energy Efficiency Optimization of Urban Building Clusters Under the "Microclimate - Energy Consumption" Vicious Cycle[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2026-01-02.
- [33] GB 50189—2015 公共建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

作者简介:

陈伦澍(1996—),男,博士研究生,研究方向为电力需求侧资源控制(E-mail: chen.lunshu@connect.um.edu.mo);

杨少华(1994—),男,澳门大学博士后,博士,研究方向为信息物理系统与规模化需求侧资源调控(E-mail: shaohuayang2022@gmail.com);

惠红勋(1992—),男,通信作者,助理教授,博士生导师,博士,研究方向为灵活负荷资源的建模、控制、优化和市场策略等(E-mail: hongxunhui@um.edu.mo)。

Differentiated Modeling and Cooperative Control of AC and DC Air Conditioner Loads for Stable Operation of AC/DC Hybrid Distribution Networks

Lunshu CHEN¹², Shaohua YANG¹², Hongxun HUI^{12*}, Ye CHEN³, Wei FENG⁴

(1. Zhuhai UM Science & Technology Research Institute, Zhuhai, 519031, China; 2. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, Macao, 999078, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Nanjing, 210000, China; 4. Institute of Technology for Carbon Neutrality, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, 518055, China.)

Abstract: In AC/DC hybrid distribution networks (DNs) of aging urban areas, the stochastic output of distributed renewable energy sources renders the system susceptible to AC-side frequency limit violations, which calls for exploiting local AC and DC flexible load resources to suppress frequency fluctuations. Considering the significant share of air conditioner loads in DN, this study proposes a differentiated modeling and cooperative control method for AC and DC air conditioners. First, differentiated models are established from three dimensions: control variables, dynamic response, and regulation capacity. For AC air conditioners, the indoor temperature setpoint is adopted as the control variable to achieve flexible power regulation under thermal comfort constraints. For DC air conditioners, in addition to temperature regulation, direct power control is introduced to achieve fast and accurately tracked power adjustment. Second, for power deficit scenarios caused by fluctuations of distributed renewable generation, a hierarchical “AC-priority, DC-compensation” cooperative control mechanism is designed. AC air conditioners provide power support through a temperature setpoint offset strategy, while DC air conditioners share the remaining power deficit to deliver rapid and precise compensation when AC support is insufficient. Finally, based on the actual topology and air-conditioner data of a Macao DN, hardware-in-the-loop experiments are carried out on a real-time digital simulator (RTDS). The results verify that the proposed cooperative control strategy for AC/DC air conditioners can effectively suppress frequency fluctuations and enhance the stability of AC/DC hybrid DN.

Key words: Hybrid AC/DC distribution network; Frequency fluctuation; DC air conditioner; AC and DC air conditioner cooperative control; RTDS hardware-in-the-loop

附录 A:

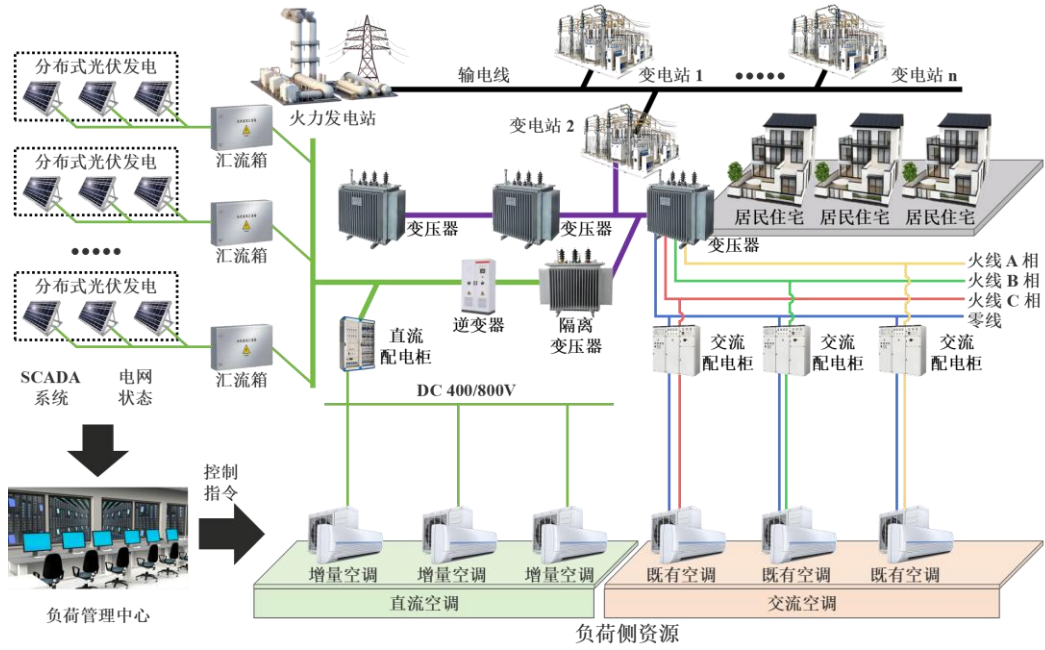


图 A1 含交流空调与直流空调的交直流混联配电网架构

Fig.A1 A hybrid AC/DC distribution network architecture with AC and DC air conditioners

附录 B:

配电网功率偏差 $P_{\text{Dis}}(t)$ 表示如下:

$$P_{\text{Dis}}(t) = P_{\text{GEN}}(t) - P_{\text{LOAD}}(t). \quad (\text{B1})$$

通常配电网具有一定的运行安全裕度，能够允许功率偏差在特定范围内波动，具体表示如下:

$$\varepsilon_1 \leq P_{\text{Dis}}(t) \leq \varepsilon_2, \quad (\text{B2})$$

式中， ε_1 表示配电网运行的功率安全裕度下限， $\varepsilon_1 < 0$ ； ε_2 表示配电网运行的功率安全裕度上限， $\varepsilon_2 > 0$ 。当配电网发电侧出现功率缺额时，则表示如下:

$$P_{\text{Dis}}(t) < \varepsilon_1, \quad (\text{B3})$$

此时负荷管理中心需要通过减少负荷使用量来恢复动态平衡。当电网发电侧出现功率过剩时，则表示如下:

$$P_{\text{Dis}}(t) > \varepsilon_2, \quad (\text{B4})$$

此时负荷管理中心需要增加负荷使用以维持动态平衡。

附录 C:

为对交直流空调在调度周期内的功率调节过程开展统一量化评估，本文定义最大爬坡率 $r_{\text{max}}^{\text{il}}$ 、调节容量 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{\text{il}}$ 与温度偏差 $T_{\text{reg}}^{\text{il}}$ 这三类指标。设空调设备在调度周期 T_{sch} 内的控制指令下发时刻为 t_0 ，采样周期 Δt 为 1 秒，选取单次调度周期 T_{sch} 为 900 秒（15 分钟），则该周期内的空调功率采样时刻集合可以表示如下:

$$\mathcal{T} = \{t_0, t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, \dots, t_0 + T_{\text{sch}}\Delta t\}. \quad (\text{C1})$$

考虑设备功率边界与热舒适性边界约束，定义响应终止时间表示如下:

$$t_{\text{stop}}^{\text{il}} = \min\{t_0 + T_{\text{sch}}, t_{\text{T}}^{\text{il}}, t_{\text{p}}^{\text{il}}\}, \quad (\text{C2})$$

式中， t_{T}^{il} 表示室内温度触及设计标准舒适范围边界的时刻， t_{p}^{il} 表示空调运行功率触及目标功率的时刻。该定义能够在统一调度周期内同时刻画交流空调温度控制下功率渐近收敛过程与直流空调功率直控的差异化响应机制。

C.1 最大爬坡率

最大爬坡率用于表征空调功率在指令下发后的最快下调速度，定义如下：

$$r_{\max}^{il} = \max_{t \in \mathcal{T} \cap [t_0, t_{\text{stop}}^{il}]} \left(\frac{P_{\text{IAC}}^{il}(t - \Delta t) - P_{\text{IAC}}^{il}(t)}{\Delta t} \right), \quad (\text{C3})$$

式中 $r_{\max}^{il}$ 的单位为 kW/s。该指标越大，表示功率下调越迅速，可用于刻画空调的功率在速度层面的差异。

C.2 调节容量

调节容量用于表征在响应终止时间能够实现的净功率削减幅度，定义如下：

$$\mathcal{R}_{\text{reg}}^{il} = P_{\text{IAC}}^{il}(t_0) - P_{\text{IAC}}^{il}(t_{\text{stop}}^{il}), \quad (\text{C4})$$

式中 $\mathcal{R}_{\text{reg}}^{il}$ 的单位为 kW。该指标较大时，表示空调设备（或空调集群）能够提供更大的瞬时调节裕度。

C.3 温度偏差

温度偏差用于量化需求响应对用户热舒适性的影响，定义为响应过程中室内温度相对初值的最大偏差，可表示如下：

$$T_{\text{reg}}^{il} = \max_{t \in \mathcal{T} \cap [t_0, t_{\text{stop}}^{il}]} (T_a^{il}(t) - T_a^{il}(t_0)), \quad (\text{C5})$$

式中， T_{reg}^{il} 的单位为 °C。该指标越小，表示在实现功率调节的同时对室内热舒适性的扰动越弱。

附录 D:

D.1 房间热动态模型

房间热动态模型具体表示如下：

$$c_a^{il} \rho_a^{il} V^{il} \frac{dT_a^{il}(t)}{dt} = H_{\text{gain}}^{il}(t) - H_{\text{IAC}}^{il}(t), \quad (\text{D1})$$

式中， c_a^{il} 表示空气的比热容； ρ_a^{il} 表示空气的密度； $T_a^{il}(t)$ 表示 t 时刻房间的温度； V^{il} 表示房间体积； $H_{\text{gain}}^{il}(t)$ 表示 t 时刻房间增加的总热量，可以表示为：

$$H_{\text{gain}}^{il}(t) = U_{\text{o-a}}^{il} A_s^{il} (T_o^{il}(t) - T_a^{il}(t)) + c_a^{il} \rho_a^{il} V^{il} (T_o^{il}(t) - T_a^{il}(t)) \zeta^{il} + \varepsilon^{il} A^{il}, \quad (\text{D2})$$

式中， $U_{\text{o-a}}^{il}$ 表示热量传递系数； A_s^{il} 表示房间表面积，包括地面、四周墙壁和天花板； $T_o^{il}(t)$ 表示 t 时刻室外的温度； ζ^{il} 表示室内外空气的交换次数； ε^{il} 表示房间内单位面积的人员、设备等产热量； A^{il} 表示房间面积； $H_{\text{IAC}}^{il}(t)$ 表示 t 时刻空调系统提供的制冷量，可以表示为：

$$H_{\text{IAC}}^{il}(t) = \eta_{\text{COP}}^{il} P_{\text{IAC}}^{il}(t), \quad (\text{D3})$$

式中， η_{COP}^{il} 表示空调的能效比； $P_{\text{IAC}}^{il}(t)$ 为 t 时刻空调的运行功率。

D.2 压缩机频率与空调功率的动态响应关系建模

空调压缩机频率 f_{IAC}^{il} 通过改变制冷剂循环速率影响空调制冷系统的瞬时功耗，其功率动态响应模型表征为：

$$P_{\text{IAC}}^{il}(t) = P_{\text{IAC}}^{il}(t-1) + \kappa_p^{il} \Delta f_{\text{IAC}}^{il}(t) \left(1 - e^{-t/T_c^{il}} \right) + \mu_p^{il}, \quad (\text{D4})$$

式中， κ_p^{il} ， μ_p^{il} 表示空调运行功率常系数； T_c^{il} 为压缩机的时间常数； $\Delta f_{\text{IAC}}^{il}(t)$ 表示 t 时刻空调的压缩机频率变化。根据空调类型的不同，压缩机频率变化量 $\Delta f_{\text{IAC}}^{il}(t)$ 的具体表示如下：

$$\Delta f_{\text{IAC}}^{il}(t) = \begin{cases} \Delta f_{\text{IAC}}^{\text{AC},ij}(t), f_{\text{IAC}}^{\text{AC},ij} \in [5, 150] \text{ Hz} \\ \Delta f_{\text{IAC}}^{\text{DC},ik}(t), f_{\text{IAC}}^{\text{DC},ik} \in [5, 150] \text{ Hz} \end{cases} \quad (\text{D5})$$

式中， $\Delta f_{\text{IAC}}^{\text{AC},ij}(t)$ 表示交流空调 ij 压缩机频率变化； $\Delta f_{\text{IAC}}^{\text{DC},ik}(t)$ 表示直流空调 ik 压缩机频率变化。

附录 E:

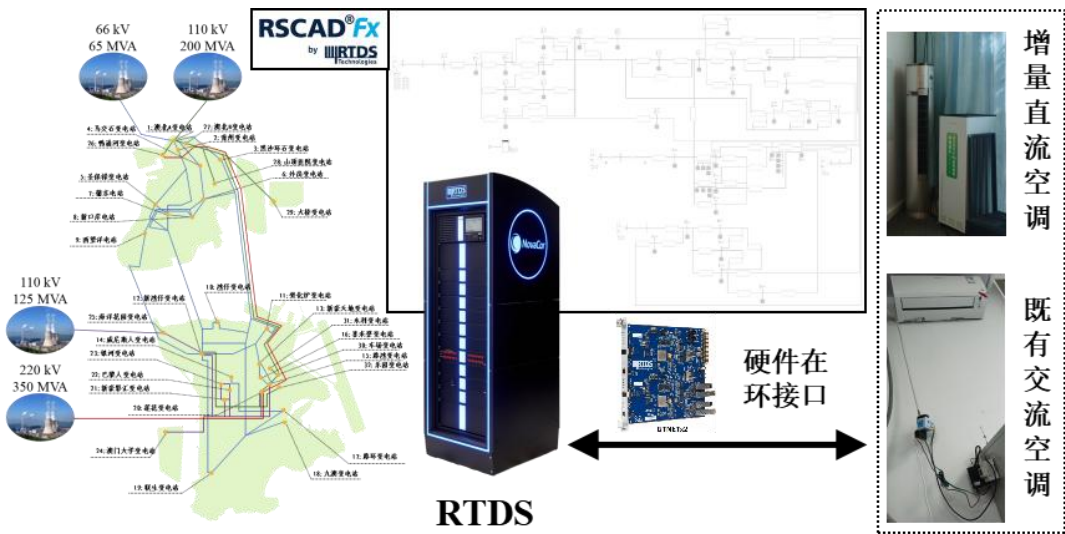


图 E1 基于 RTDS 的交直流混联配电网与空调硬件在环仿真实验

Fig.E1 A hardware-in-the-loop experiment platform based on RTDS for AC/DC hybrid distribution network with air conditioners

E.1 RTDS 硬件在环实验平台构建

如附录 E 图 E1 所示，本实验基于澳门实际电网的拓扑结构和电压等级，在 RTDS 平台上构建交直流混联配电网模型。输电侧的电压层级包括 220 kV、110 kV 和 66 kV，配电侧则涵盖 11 kV 及 400/230 V 低压系统，用户侧则采用 220 V 单相、50Hz 的交流电。同时该配电网集成 400 V 分布式光伏直流供电系统，其输出经直流母线与直流空调直接连接；交流空调通过 220 V 单相供电回路接入系统，与直流空调构成负荷侧交直流空调集群。在此基础上，交直流空调集群通过 GTNET 接口构建实际空调设备与 RTDS 仿真平台的硬件在环实验环境。电脑上上位机软件将采集得到的空调运行功率等电参数经 RTDS 硬件在环接口 GTNET 传输至 RTDS 更新节点负荷功率。RTDS 实时将配电网频率、母线电压等信号通过 GTNET 反馈至电脑上上位机软件，构成 RTDS 硬件在环验证平台，确保控制方法在真实物理设备与仿真场景下的一致性验证。

E.2 交流空调与直流空调的实验设置

本硬件在环实验平台所使用的直流空调型号为格力 KFR-72LW 分体变频热泵型落地式空调，采用适配交直流混联配电网的 400 V 直流供电，能够实现 0.3 kW 至 3.1 kW 的宽范围功率连续调节，额定最大输入功率为 3.73 kW。交流空调型号为大金 KFR-36G/BP，采用 220 V/ 50 Hz 交流供电，实测运行功率范围约为 0.2 kW 至 2.5 kW。交直流空调均通过 RS-485 通讯接口与电脑上上位机软件连接，并采用 Modbus-RTU 协议实现功率指令的交互。

附录 F:

表 F1 交流空调与直流空调的实验参数设置

Table F1 Experiment setup of AC and DC air conditioners

参数	交流空调	直流空调
装机容量	415.979 MW	108.781 MW
空调数量	113,200	29,600
运行功率	140.368 MW	36.704 MW

表 F2 交流空调与直流空调的模型参数设置

Table F2 Experiment setup of AC and DC air conditioners model parameter

参数	参数值	单位
c_a	1.005	$\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
ρ_a	1.205	kJ/m^3
V	$\Pi(250, 400)$	m^3
A_s	$\Pi(138, 203)$	m^2
A	$\Pi(83.3, 133.3)$	m^2
ζ	0.5	l/hour
U_{o-a}	$\Pi(4.0, 8.0)$	$\text{W}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2)$
T_o	$\Pi(34, 36)$	$^{\circ}\text{C}$
T_a	$\Pi(27, 30)$	$^{\circ}\text{C}$
ε	4.3	W/m^2
η_{COP}	$\Pi(2.5, 3.0)$	N/A
κ_p	0.04	kW/Hz
μ_p	0.02	kW
α_c	0.52	$\text{Hz}/(^{\circ}\text{C})$
β_c	0.0032	$\text{Hz}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s})$
α_a	0.10	Hz/W
β_a	0.005	$\text{Hz}/(\text{W} \cdot \text{s})$

Π 表示均匀分布。