

电力电子化配电台区形态发展以及 运行控制技术综述

刘文龙, 吕志鹏, 刘海涛

(国网上海能源互联网研究院有限公司, 上海市 浦东新区 201210)

An Overview of Morphological Development and Operation Control Technology of Power Electronics Dominated Distribution Area

LIU Wenlong, LYU Zhipeng, LIU Haitao

(State Grid Shanghai Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Pudong New Area, Shanghai 201210, China)

ABSTRACT: With the development of new infrastructure, renewable energy and the increasing demand of DC load, distribution area presents the development trend of power electronics domination. It brings new challenges to the morphological development and operation control of distribution area. This paper summarizes the domestic and international developments, technical characteristics and application scenarios of power electronics dominated distribution area from six aspects including structural morphology, low voltage interconnection morphology, optimal dispatch, power quality management, stability analysis and control, as well as fast protection of fault. Finally, the future key research directions are prospected.

KEY WORDS: power electronics dominated distribution area; low voltage AC/DC hybrid distribution; low voltage flexible interconnection; optimal dispatch; power quality; stability analysis and control; fault protection

摘要: 随着配电台区侧新基建、新能源发展和直流负荷用电需求日益增长, 配电台区呈现电力电子化发展趋势, 对配电台区形态发展和运行控制带来新的挑战。该文主要围绕电力电子化配电台区结构形态、低压互联形态、经济调度、电能质量治理、稳定分析与控制、故障快速保护等6个方面, 对国内外发展情况、技术特点以及应用场景进行综述, 最后对未来重点研究方向进行了展望。

关键词: 电力电子化配电台区; 低压交直流混合配电; 低压柔性互联; 经济调度; 电能质量; 稳定分析与控制; 故障保护

0 引言

随着新基建、新能源大力开展实施, 配电台区

侧电动汽车充电桩、分布式新能源、储能、5G 基站、数据中心等元素呈现快速增长趋势, 而这些新增元素需通过电力电子变换装置并入配电台区, 大量变换装置引入显著激增配电台区电力电子化程度^[1-2]。随着用户侧高效节能用电需求迫切^[3-4], 具有变频特点的空调、窗帘、洗衣机、照明等节能产品技术不断成熟, 并得到推广应用, 而变频节能的核心在于电力电子变换装置应用, 故其在负荷侧影响配电台区电力电子化发展。配电台区源荷储元素, 在不同程度上呈现电力电子化发展趋势, 共同推动配电台区新形态发展。随着电力电子技术、信息技术和配电装备技术不断成熟发展, 低压直流柔性配电技术得到广泛重视和发展^[5-8], 配电台区配电环境随之发生新的变化。结合供电半径大、线路容量大、电能质量佳、损耗小、无频率问题等技术优势^[9-11], 通过电力电子变换装置在配电台区构建低压直流母线, 为不同直流元素提供友好、可靠、便捷接入环境^[12-13], 实现配电台区交直流灵活配电。基于电力电子变换装置和直流通道的低压柔性互联技术, 实现配电台区之间在线互济、动态增容等, 提升配电台区协同管理能力。同时, 利用电力电子变换柔性技术改善传统刚性调控方式^[14-15], 实现潮流功率、动态补偿等方面连续、快速调控, 从而提升配电台区配用电品质。上述配电台区元素、配电环境以及控制方式变化, 对配电台区电力电子化形态创新发展具有推动作用。

此外, 以电力电子化为特征的源荷储规模化发展趋势以及快速灵活、高效可靠控制需求, 将给电

力电子化配电台区运行控制带来新的挑战和压力:

1) 以分布式光伏、储能、数据中心、电动汽车、变频空调等为代表的电力电子分布式资源丰富配电台区元素, 配电台区由单一“荷”性质逐步发展为“源-荷-储”共存性质, 且部分负荷出现柔性化发展, 上述配电台区元素种类、性质多元化发展, 对配电台区源荷储可控资源高效利用提出挑战。此外, 以电动汽车和新能源为代表的电力电子分布式资源具有显著不确定性特点, 将激增台区运行状态的不确定性和复杂度, 对配电台区能量管理提出更高的要求, 需优化配电台区运行调度技术, 提升配电台区功率能量平衡能力以及灵活运行水平。

2) 电力电子分布式资源分散式接入、功率随机性以及控制非线性等特点, 加剧了配电台区功率扰动性、不平衡度、谐波注入等, 影响配电台区电能质量品质, 此外, 高精密用户对高品质供电和电力定制化需求迫切, 两者都将对台区电能质量快速治理提出更高要求。

3) 大量电力电子装置接入配电台区, 受控制方式、控制参数、动态特性等影响, 电力电子装置之间以及与配电线路之间可能产生交互作用, 从而引发不同频率的谐振现象, 对于电力电子化配电台区稳定运行提出挑战。

4) 电力电子化配电台区低压直流对于规模化接入分布式资源接入具有技术优势, 但低压直流惯性小且无自然过零点, 发生故障时电流上升快速, 对低压直流断路器开断以及故障保护配置等提出更高要求。

综上所述, 随着分布式资源元素以及配电环境变化, 配电台区逐渐呈现向电力电子化发展趋势, 并随之面临新的问题和挑战, 研究电力电子化配电台区形态发展以及运行控制对提升高比例分布式资源接入下配电台区运行水平具有重要意义, 目前该领域内容仍处于起步阶段, 有待进一步深入探索和研究。

1 本文整体架构

本文整体架构如图1所示, 围绕配电台区电力电子化趋势以及特点, 聚焦形态发展和运行控制两大维度, 进行相关技术归纳综述。其中, 形态发展是指因配电台区的配电设备、连接方式以及外部交互方式变化引发的形态变化, 包括结构形态、低压互联形态两个方面, 分别侧重电力电子化配电台

区内部以及配电台区之间的物理形态变化; 运行控制是指考虑电力电子装置(如各类并网装置、补偿装置、配电组网装置)以及所连接源荷储元素特性, 电力电子化配电台区不同类型运行控制问题及技术方法, 具体包括优化调度、电能质量治理、稳定分析与控制以及故障快速保护4个方面, 分别侧重电力电子化配电台区经济、优质、稳定、安全运行以及控制技术与方法。下文围绕上述6个方面, 对电力电子化配电台区形态发展以及运行控制相关研究进行综述。

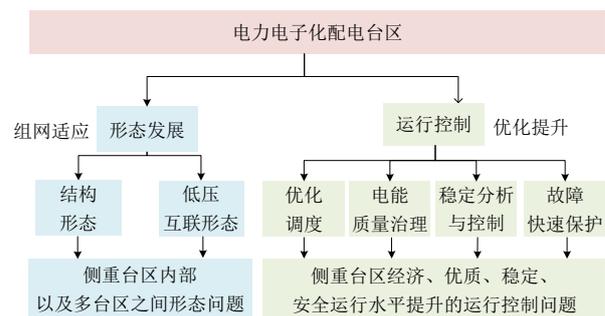


图1 本文整体架构

Fig. 1 Overall structure of the manuscript

2 电力电子化配电台区结构形态

2.1 配电台区电力电子化影响因素分析

为了便于概念区分, 归纳配电台区与低压型微电网异同。配电台区属于配电网末端供电单元, 是指通过配电网中一台配电变压器(通常 35kV/400V 或 10kV/400V)的供电范围^[16], 依靠配电网对配电台区负荷供电。微电网是集成发配用一体化的微型系统^[17-18], 通过配电变压器与配电网连接, 在并网运行时与配电网进行能量双向交互, 在离网运行时依靠各类型分布式电源保障其负荷供电。故配电台区和并网运行微电网相似, 但当配电变压器停运时, 配电台区因内部无分布式电源支撑而无法保障配电台区负荷供电。随着配电台区电力电子化发展, 分布式资源如光伏、储能、车网互动(vehicle to grid, V2G)等渗透率不断提升, 配电台区在配电变压器故障时也能依靠分布式资源实现部分或全量负荷供给^[19], 以及与配电网能量双向交互, 具备微电网功能属性。

伴随着半导体器件技术快速发展以及成本降低, 电力电子设备以及控制技术在配电台区得到广泛应用, 涵盖配电台区中源、网、荷等各侧以及控制补偿等环节, 如图2所示, 共同驱动配电台区电力电子化发展。

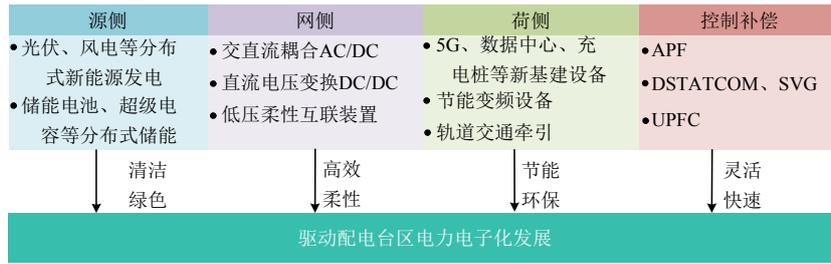


图 2 配电台区电力电子化影响因素

Fig. 2 Influencing factors of power electronics domination in distribution area

1) 源侧：随着低碳绿色转型发展，分布式新能源得到更高重视，特别是分布式光伏在乡村、楼宇、园区等的应用规模呈现快速发展趋势，打破了传统配电台区“无源”的格局。在新型电力系统建设背景下，未来分布式新能源将成为配电网的重要电源之一，而光伏、风电等新能源均需要通过电力电子并网装置，保障其安全并网与灵活控制，以实现发电效率最大化。作为能量、功率优质调节电源，分布式储能通过电力电子并网装置参与配电台区调控，在平抑新能源波动、用户侧削峰填谷、紧急供电等方面得到成熟发展与应用。故源侧分布式新能源、储能的快速发展，同步加深配电台区电力电子化程度。

2) 网侧：低压直流配电技术具备高效、可靠、环境友好等优势^[20]，已在居民供电、船舶、工业生产、智能家居等得到广泛运用。在组网建设方面，用于交直流耦合的 AC/DC 变流器以及用于直流电压等级变换的 DC/DC 变流器^[21]，提升了配电台区的电力电子化渗透率；此外，为了提升台区资源共享和最大化利用能力，配电台区互联技术得到学术界和工业界关注，尤其是以电力电子为核心的柔性互联技术，实现多配电台区闭环运行，大幅增强配电台区之间互济能力，实现重过载配电台区动态增容、多配电台区分布式资源消纳等。故低压直流配电技术引入和柔性互联发展，推动配电台区结构形态创新，在网侧加快了配电台区电力电子化发展。

3) 荷侧：随着新基建和节能环保政策推出，荷侧直流用电需求以及电力电子化用电设备种类、规模不断扩大，如数据中心、5G 基站、快速充电桩、变频节能设备以及轨道交通牵引等，因具有能效好、质量佳、调节方便等优势，上述变化助力社会用电能效以及用户用电体验提升。同样，荷侧电力电子化进一步推动配电台区电力电子化发展。

4) 在控制补偿方面，对于分布式资源规模化接入配电台区，谐波、无功补偿、电压波动等问题

凸显，以变压器、无源元件为主的传统调控方式在跟踪响应速度、控制精细度等方面难以满足谐波补偿、无功补偿、电压快速控制等治理需求。而电力电子装置具备调控灵活、响应快速、体积小等优势，越来越多电力电子调控设备在配电台区开展应用，如静止无功发生器(static var generator, SVG)、有源滤波器(active power filter, APF)、配电网静止同步补偿器(distribution static synchronous compensator, DSTATCOM)^[22]、统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)^[23]等，为配电台区潮流调控、谐波治理、无功补偿等提供精确调控手段，优化配电台区运行环境。

基于上述分析，在配电台区源、网、荷各侧以及控制补偿方面的电力电子化发展，有利于实现配电台区清洁绿色、高效柔性、节能环保以及灵活快速，共同驱动配电台区呈现电力电子化发展趋势，其组网形态在上述影响因素作用下随之发生改变。

2.2 电力电子化配电台区结构形态分类

结合 2.1 节各类影响因素，定义电力电子化配电台区，是指因源荷储元素接入或新型配电装置、补偿装置引入，新增大量电力电子装置或模块的配电台区。其结构形态主要是指配电台区的组网设备以及组网方式的呈现。从结构形态角度，本文将对电力电子化配电台区分为 3 类，即交流型、交直流柔性混合型和交直流柔性集成型。不同类型电力电子化配电台区主要特点，如表 1 所示。

对于交流型，如图 3 所示，分布式光伏、储能、5G 基站、电动汽车直流充电桩等直流元素，通过内置单相/三相电力电子逆变模块或附加单相/三相电力电子逆变装置，直接并网接入传统配电台区低压交流侧，从而实现多元素接入台区。这种组网方式具有结构简单、容易实现的优点，但该方式接入粗犷，同时存在线路损耗大、电能质量不佳、控制复杂等多种运行控制问题。

对于交直流柔性混合型^[24]，如图 4 所示，采用

表1 结构特点对比

Table 1 Comparison of structural features

类型	组网关键装备	接入特点	优点	缺点
交流型	不同元素 并网逆变器	不同元素并网逆变器接入 台区配电变压器低压侧	1) 单个装备投资成本低; 2) 结构简单、易实现。	1) 因换流设备多, 台区损耗大; 2) 电能质量差; 3) 分散设备数量多、控制复杂。
交直流柔性 混合型	低压柔性 多端口配电装备	低压柔性多端口配电装备接入台区 配电变压器低压侧, 与交流侧负荷 共享台区配变容量	1) 投资成本适中; 2) 装备可靠性高; 3) 台区改造方便; 4) 直流侧控制独立灵活; 5) 直流端口故障快速隔离。	1) 当装备交流交互端口容量较小时, 对交流侧功率调节能力有限; 2) 当装备交流交互端口实时容量裕度较小时, 对交流侧电能质量补偿能力有限。
交直流柔性 集成型	中压柔性 多端口配电装备	中压柔性多端口配电装备接入中压 交流馈线侧, 向台区提供交直流 不同电压配电端口	1) 不同电压等级独立可控; 2) 柔性调控能力; 3) 电能质量治理; 4) 台区能量灵活路由; 5) 端口故障快速隔离。	1) 10kV 对电力电子器件耐压、 可靠性要求高; 2) 装备投资成本相对高。

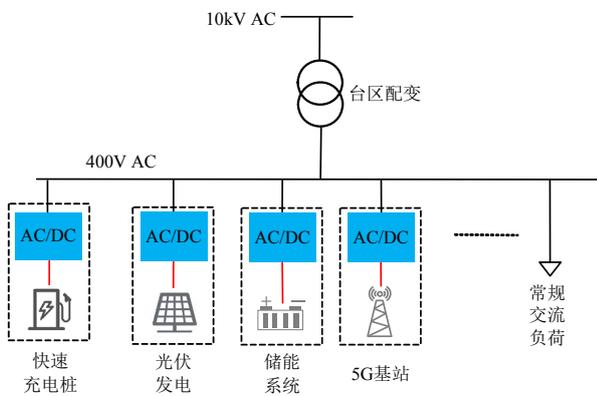


图3 交流型配电台区

Fig. 3 AC distribution area

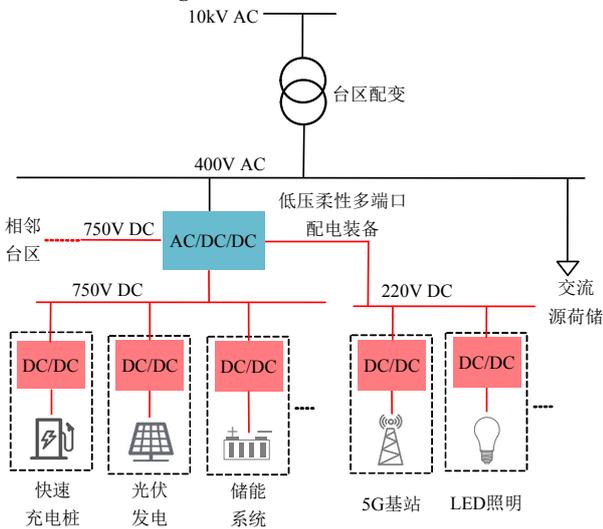


图4 交直流柔性混合型配电台区

Fig. 4 AC/DC flexible hybrid distribution area

电力电子低压柔性多端口配电装备, 接入配电台区低压交流侧, 通过内部电力电子变换, 同时也输出不同电压等级直流端口, 方便不同类型负荷友好接入, 同时通过装备内部功率均衡, 实现能量多向流动, 以及负荷灵活互动管理。由于低压柔性多端口配电装备拓扑结构是采用低压交直流变换, 对电力

电子器件耐压要求不高, 故造价成本低且技术成熟, 具有较好的技术经济性, 可方便实现配电台区交直流配电灵活混合改造, 在实际生产运行中有广阔的应用前景。需要说明的是, 当直流侧只有单一电压等级配电需求时, 低压柔性多端口配电装备, 可用电压源型换流器(voltage source converter, VSC)替代。

对于交直流柔性集成型^[25-26], 如图5所示, 采用电力电子中压柔性多端口配电装备, 接入中压交流 10kV 配电线路, 替代传统配电变压器, 柔性输出低压交流电压以及不同电压等级直流电压, 方便不同交直流元素即插即用接入, 对整个配电台区提供柔性配电与灵活管理。此种方式具有全柔性调控能力, 实现配电台区交直流功率、电能质量独立控制以及故障隔离, 提升配电台区交直流混合供给运行水平。但受中压端口器件耐压性能、拓扑结构等影响, 中压多端口配电装备投资成本高, 运行可靠性、运维便捷性也有待提升, 故此类型技术经济性

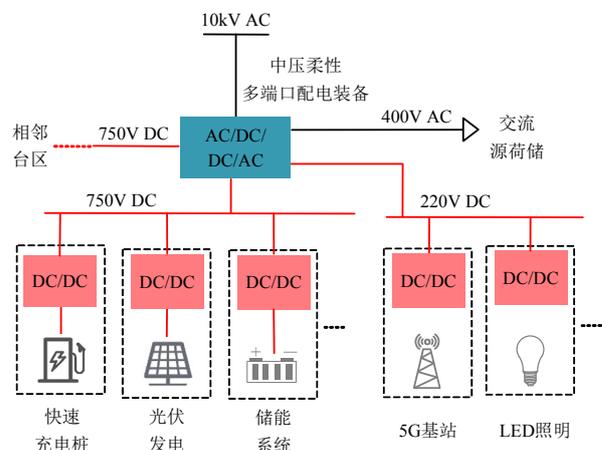


图5 交直流柔性集成型配电台区

Fig. 5 AC/DC flexible integrated distribution area

需进一步优化，以应用于实际生产中。

此外，对于交直流柔性混合型和交直流柔性集成型电力电子化配电台区，除了实现配电台区内灵活配电，其较高电压等级直流端口，可与邻近配电台区对应直流端口相连，实现配电台区之间低压柔性互联互通，相比于交流型配电台区，扩大配电台区供电半径和提高供电可靠性。

综上，不同类型电力电子化配电台区各具特点，在实践应用中，需根据配电台区源荷储类型、数量规模、功率配置以及接入方式等特点，以及考虑配电台区升级改造的技术经济性，选择适宜的电力电子化配电台区结构形态，为电力电子化配电台区运行控制提供适宜的基础结构。

2.3 电力电子化配电台区结构形态发展

随着配电台区电力电子化程度加大，宽禁带电力电子器件技术经济性提升，以及对电力电子分布式资源运行控制灵活性需求变化，电力电子化配电台区发展阶段依次分为交流型、交直流柔性混合型和交直流柔性集成型。

交流型电力电子化配电台区，是最先出现的形态阶段。各类源荷储装置，通过各自逆变并网装置或逆变模块，直接接入传统低压交流配电环境，自然形成交流型电力电子化配电台区。但随着分布式光伏、充电桩以及新型负荷等规模化接入，谐波治理、无功补偿、运行损耗等问题显著，需配置大量分布式补偿装置，将导致额外配置成本高，同时加剧配电台区控制设备数量以及控制复杂度。

为提升配电台区源荷储规模化接入能力，在传统配电台区基础上打造低压直流环境得到重点关注，配电台区交直流混合改造应运而生，包括用于交直流环境连接的低压柔性多端口配电装备、直流配电线路以及各类元素 DC/DC 接口，形成交直流柔性混合型电力电子化配电台区。相比于交流型，一方面减小低压交流侧大量逆变环节从而降低配电台区运行损耗以及减小低压交流侧动态补偿设备配置；另一方面低压直流系统控制主要涉及直流电压调控、交直流交互功率调控，控制方便、灵活。

对于低压交流侧，交直流柔性混合型依然通过变压器分接头调控电压^[27]，在低压交流电压连续灵活调节方面具有局限性，为了实现低压交流精准调压以及增强配电台区与配电网交互能力，在交直流柔性混合型基础上，进一步用电力电子配电装备完全代替传统的配电变压器，同时集成低压交直流多

电压等级变换电路，实现配电台区降压以及低压交直流配电一体化，形成交直流柔性集成型。相对交直流柔性混合型，其对配电网交互端口、低压交流配电端口均具备柔性调控、高质量输出优势，配电台区灵活调控程度进一步提升。

3 电力电子化配电台区低压互联形态

3.1 低压互联需求分析

随着分布式资源接入以及终端电气化不断提升，对配电台区动态扩容、功率均衡以及可靠性等提出更高的挑战。配电台区低压互联，是面向多台区资源综合利用、容量共享共用、台区负荷转供的新型技术，充分发挥不同台区之间负载率差异性和互济能力，提升台区对分布式新能源、充电桩等电力电子新型元素接入适应性、供电可靠性以及负载均衡水平。相比于单一配电台区运行，多配电台区低压互联运行，具备以下优越性：

1) 释放配电台区冗余，充分运用多配电台区可用容量，满足电动汽车充电桩、5G 基站等新基建负荷激增动态增容需求，延缓配电台区扩容投资和建设。

2) 提升配电台区供电可靠性，当某配电台区故障时，实现配电台区重要负荷快速灵活转供，提升配电台区供电可靠性。

3) 实现不同台区负载均衡，通过低负载率台区向高负载率台区转供，从而均衡不同配电台区负荷时空差异性，提升配电设备利用率，促进配电台区运行经济性。

4) 提升配电台区分布式新能源消纳能力^[29-30]，对于新能源富裕配电台区，通过低压互联通道转移，向负荷需求较大的配电台区供电，实现多配电台区能量共享消纳，推动能源清洁化发展。

根据多配电台区互联采用的形式不同，其具体可分为交流互联和直流(柔性)互联，两者在互联原理、动态调节特性、负荷转供方式等方面具有显著区别。交流互联通过开关组合配置构建配电台区低压互联形态^[28]，以三台区为例，如图 6 所示，当配电台区 2 负荷需转供时，开断配电台区 2 总开关，闭合台区 1 和台区 2 互联联络开关，同时维持台区 2 和台区 3 开断状态，实现台区 2 负荷由台区 1 转供。因配电开关不具备连续功率、电压等调节能力，同时在实际生产中配电台区不允许低压交流合环运行，故低压交流互联在互济有功调控、互济模式

在线切换等方面存在局限性。电力电子装置可实现交直流环境隔离和潮流功率连续可控，将其替代交流互联开关，通过配电台区多端口配电装备互联端口或互联变流器之间连接，构建低压柔性互联系统，具备在线互济、动态增容等优势，相比于低压交流互联，低压柔性互联具有更灵活调控空间、更广阔应用前景。

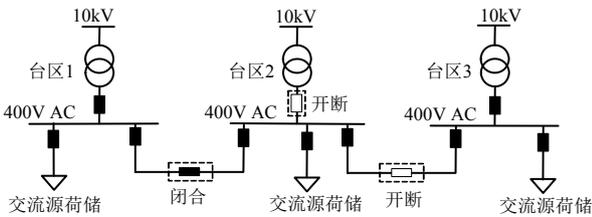


图6 交流互联形态

Fig. 6 AC interconnection

3.2 低压柔性互联形态分析

根据用于互联的电力电子装置(或端口)部署位置，低压柔性互联形态分为集中式和分散式。1) 集中式采用内部公共母线集中部署，将直流元素集成在一起，每个配电台区通过低压交流线路与集成装置连接，以三台区为例，如图7所示。为了避免该低压交流线路过长而引发的降压与损耗问题，该方式下互联配电台区分布位置需相对集中，同时集成装置以集装箱形式部署，故对部署位置、土地空间具有较高要求。2) 分散式是在每个台区分散部署电力电子装置，然后通过低压直流线路互联，该方式具有更好的扩展性、可靠性以及互联传输效率。基于配电台区直流互联拓扑结构不同，多台区低压柔性分散式互联形态可分为链式互联型、环网互联型^[31]，以三台区为例，分别如图8、9所示。对于链式互联型，不同配电台区的多端口配电装备互联端口或互联变流器，通过直流线路依次连接，构建低压柔性互联通道，具备较好的拓展性和较大

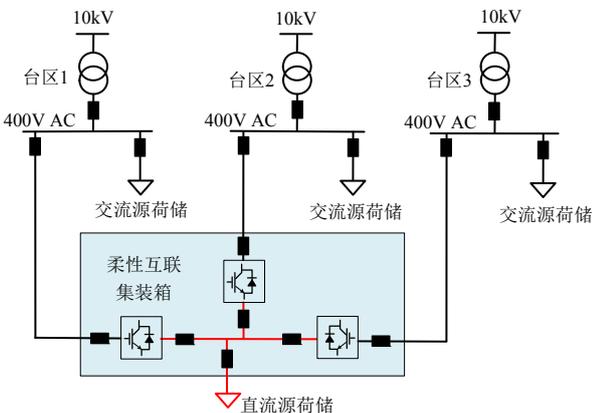


图7 集中式互联型

Fig. 7 Centralized interconnection

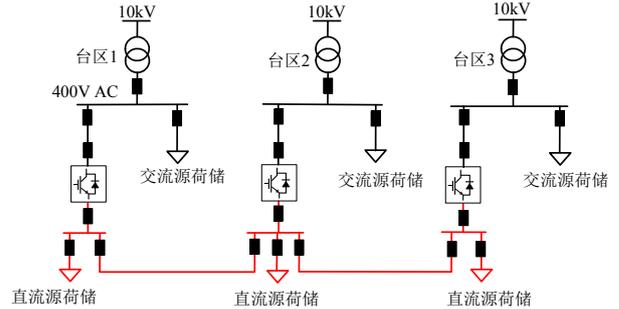


图8 链式互联型

Fig. 8 Chain interconnection

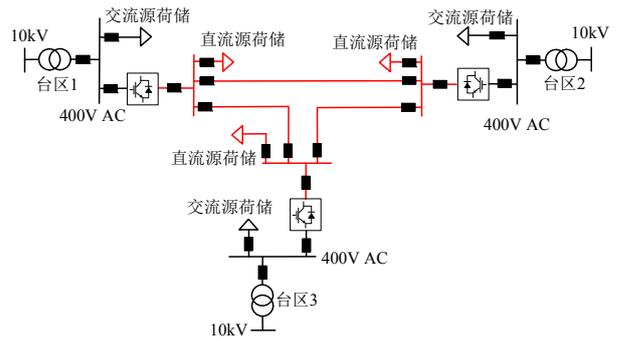


图9 环网互联型

Fig. 9 Loop interconnection

的互联范围，在投资建设、运行控制、维护检修等方面具有技术经济性优势，故其应用前景广阔。而对于可靠性要求极高的场景，可采用环状型形式，形成环网互联模式，保障多类型故障下台区低压柔性互联区域可靠运行。

同时，在低压直流互联区域，可根据实际需要，接入储能、分布式新能源、直流充电桩等，丰富配电台区互联运行场景，比如接入储能，可提升多配电台区削峰填谷、平抑波动以及紧急供电能力。文献[32]通过构建多配电台区低压柔性互联系统，同时储能、光伏、直流充电桩通过DC/DC变流器接入低压直流母线，满足电动汽车直流快充用电和光伏消纳需求。

3.3 低压柔性互联形态发展

低压柔性互联形态，相比于电力电子化配电台区结构形态，本质上没有内在依次发展关系，主要是基于不同应用场景驱动发展而来，以满足不同应用需求。总体上3种低压柔性互联形态，均可解决以下配电台区问题：1) 动态增容；2) 可靠性提升；3) 负载均衡；4) 分布式新能源消纳。但因结构、部署特点以及运行需求不同，3种低压柔性互联形态适用的应用场景，具有一定区别，如表2所示。1) 集中式因采用预制式集中箱部署，适用于台区分布相对集中，同时低压直流负载分布相对集中，

以及具备集中部署土地空间条件的应用场景，其安装部署、控制方便，但因损耗和压降问题其低压交流引线不易过长，故配电台区互联距离有限。2) 链式互联型，因具有很强扩展性和互联范围大，适用于台区分布分散、台区互联数量多，以及有后续拓展需求、本地直流源荷储接入需求的应用场景，其在扩展性和互联范围方面优势有利于提升推广应用价值；3) 环网互联型，因具备环网合环运行

优势，提供多路电源保障，其可靠性很高，但对应经济成本也较高同时控制复杂，适用于供电可靠性要求很高的应用场景，比如数据中心供电。上述不同类型低压柔性互联形态各具优势和适用性，因此，在实际应用时，需综合考虑配电台区分布位置、负荷水平、分布式资源接入需求、可靠性要求以及建设成本等多方面因素，选择适宜的低压柔性互联形态，提升低压柔性互联应用技术经济性。

表 2 低压柔性互联形态应用场景对比

Table 2 Comparison of application scenarios of low-voltage flexible interconnection morphologies

类型	应用场景	优点	缺点
集中式互联型	1. 互联台区相对集中 2. 需要一定土地空间 3. 直流负载相对集中	1. 预制式，集中安装方便 2. 统一管理，控制方便	1. 扩展性不足 2. 互联距离有限
链式互联型	1. 台区分布分散 2. 台区连接数量多 3. 后期有扩展需求 4. 本地源荷储接入	1. 可扩展性好 2. 供电范围大 3. 台区本地直流供能	1. 因用于互联的电力电子装置（端口）部署在不同台区，需分散施工安装
环网互联型	1. 可靠性要求很高的台区	1. 可靠性很高 2. 运行方式丰富 3. 台区本地直流供能	1. 因用于互联的电力电子装置(端口)部署在不同台区，需分散施工安装 2. 经济成本相对高 3. 环网控制复杂

4 电力电子化配电台区优化调度方法

4.1 优化调度范畴

电力电子化配电台区优化调度，是充分利用配电台区源荷储资源、配电装备容量以及电力电子装置柔性调控能力，优化解决配电台区运行降耗、新能源消纳、电动汽车增容用电等方面问题，提升配电台区运行经济性和源荷储互动性。其中，优化调度对象，主要包括分布式新能源并网装置、储能并网装置、多端口配电装备、VSC 以及可调节性负荷等分布式可控资源，基于调度对象灵活互动性，优化调整电力电子化配电台区潮流分布。电力电子化配电台区优化调度研究所涉及内容，如图 10 所示，

主要包括以电动汽车、分布式能源为代表的配电台区不确定性建模，以及结合分布式可控资源的配电台区优化调控策略研究，本节将具体围绕这两方面内容进行阐述。

4.2 以电动汽车和新能源为代表电力电子源荷不确定性建模

电动汽车和新能源是电力电子化配电台区中不确定元素典型代表。电动汽车充电活动，与电动汽车用户出行目的、出行时间、活动范围等密切相关；新能源发电行为受本地光照、风速、温度等气象条件影响较大，故分布式新能源发电和电动汽车充电行为均存在较大的不确定性，加剧台区运行复杂性和能量管理难度，因此，需要对上述因素开展不确定性建模研究，从而提升台区经济调度精准性。

对于电动汽车充电不确定性建模，主要是基于统计学方法和蒙特卡洛方法对电动汽车充电行为或充电负荷进行估计，从而为配电台区调控提供不确定性模型支撑。主要分为两大类：1) 入网时间、离网时间、入网时电动汽车初始荷电状态(state of charge, SOC)估计。文献[33]基于原始数据集，利用最小二乘法对电动汽车的离网时刻、入网时刻以及出行里程的累计分布函数的反函数进行拟合，进而通过[0,1]均匀分布随机变量生成到家时间、离家时间以及出行距离，进一步通过出行距离以及电动

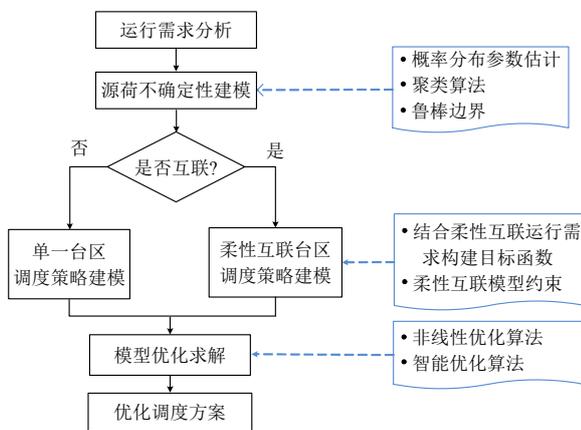


图 10 调度策略研究架构

Fig. 10 Research framework of scheduling strategy

汽车单位距离能量消耗,估计得到入网时刻电动汽车 SOC,从而便于电动汽车后续参与调度管理。文献[34]基于历史数据和马尔科夫蒙特卡洛方法,对电动汽车入网时间以及初始能量状态概率分布参数进行估计,实现电动汽车不确定性建模。但上述研究主要对于私家车充电出行开展分析建模,缺乏其他类型电动汽车如出租车、公交车充电行为为不确定性建模。文献[35-36]结合不同类型电动汽车出行规律以及用户充电心理,分别对私家车、公交车、出租车的充电需求建立概率表征模型,实现对充电时刻估计。这类方法主要侧重于电动汽车充电行为时刻以及初始能量的估计,需根据不同类型电动汽车出行数据,刻画电动汽车充电规律。2)通过电动汽车充电负荷功率分析,建立充电功率边界不确定性模型,用于鲁棒优化调度。文献[37]利用多面体不确定集,对具有规律性的电动公交充电功率进行不确定性建模,利用随机波动参数对功率波动范围进行量化表达,从而实现电动汽车充电负荷不确定性进行描述。此类方法主要侧重于电动汽车充电功率边界范围刻画,结合充电功率均值,引入波动偏差描述量,实现充电功率时序不确定性描述,为鲁棒优化调度提供输入边界。

配电台区分布式新能源,主要以分布式光伏为主,目前关于分布式光伏不确定性研究较多,主要可以分为两类,如图 11 所示。1)基于历史数据,利用聚类算法,得到分布式光伏出力概率密度曲线、典型出力场景或相关参数。文献[38]针对光伏发电功率概率密度分布呈现非对称、多峰值的特性,提出一种基于高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)的分布式光伏出力不确定性描述方法,并利用收敛性能好的最大期望算法求解极大释然模型,实现 GMM 参数估计。文献[39]提出负荷水平模式概念,基于年负荷持续曲线区段划分得到不同负荷水平模式,进而结合不同负荷水平模式对应时段的新能源历史出力数据,通过聚合算法,得到对应负荷水平模式的新能源出力场景及其概率。文献[40]提出无遮挡系数来表征光伏不确定性,通过集中式光伏出力历史数据聚类得到典型天气无遮挡系数,然后基于同一地区集中式、分布式光伏出力的相关性和上述聚类得到的无遮挡系数,推导分布式光伏出力不确定性分量。2)分析光伏出力上下边界(或置信区间)表征不确定性。文献[41]基于区间覆盖概率、预测区间相对宽度、日负荷累积偏差

3 类性能指标综合优化的分布式光伏区间预测模型,并基于神经网络和粒子群算法进行训练模型优化,进而利用预测模型实现不同置信水平下分布式光伏出力范围(即上下边界)估计。文献[42]结合定积分近似计算原理和 Beta 分布特性,提出分布式光伏置信区间快速求解方法,快速计算任意置信水平的分布式光伏最短置信区间,实现分布式光伏不确定性描述。文献[43]提出基于 KL(Kullback-Leibler)散度分析的分布式光伏出力真实模糊集构建方法,结合参考概率分布,计算给定 KL 水平下模式集最大期望与最小期望,作为分布式光伏出力上、下边界。对于上述两大类方法,基于聚类算法的分布式光伏不确定性建模,主要侧重典型特征提取如概率密度曲线、典型出力场景,而基于边界描述的分布式光伏不确定性建模,主要侧重于光伏功率时序范围描述,对于实际应用,结合分布式光伏相关数据丰富度以及调度应用需求,择优选取不确定性建模方法。

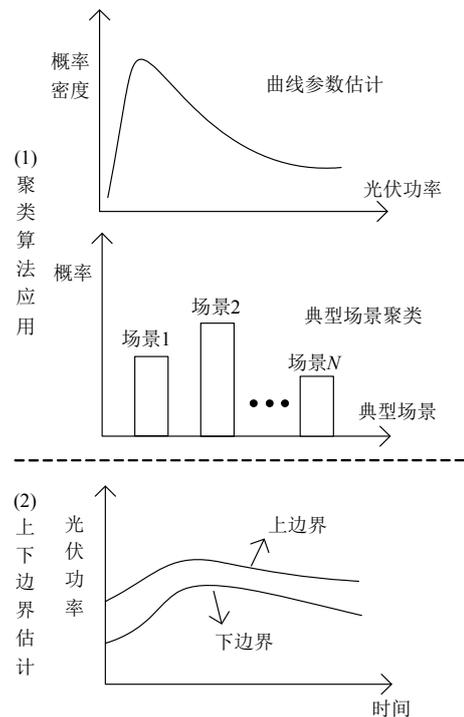


图 11 分布式光伏不确定性建模分类

Fig. 11 Classification of distributed photovoltaic generation uncertainty modeling

电动汽车和分布式新能源应用是实现“碳中和、碳达峰”目标的重要技术手段之一,配电台区侧充电桩、分布式新能源规模将与日俱增,在时空上会更加分散、随机,其不确定性更具挑战性,开展更精准的不确定性建模对电力电子化配电台区调控具有重要意义。

4.3 电力电子化配电台区运行调度策略

基于非互联配电台区(即单一配电台区)和互联配电台区,对电力电子化配电台区调度方法分析与归纳。两者主要区别在于,互联台区需要考虑柔性互联区域电压运行约束、互联功率约束以及互联区域资源配置情况,从而优化台区之间互联功率,提升多配电台区资源利用率和协同互动能力。

对于单一配电台区运行调度策略,其调控对象为配电台区内部分布式可控型源荷储,结合配电台区运行需求,运行调度策略主要分为两个方面:1) 配电台区内部自治均衡,即综合考虑分布式光伏、储能、电动汽车等分布式资源接纳,建立多目标优化调控策略,实现单一配电台区源荷储高效互动和经济性最优控制。文献[44]针对高比例分布式光伏接入台区导致的网损、三相不平衡、电压越限问题,提出台区三相四线制最优潮流模型,协同优化多时段分布式光伏无功功率和储能有功功率,提升台区对高比例分布式光伏的消纳能力;文献[45]针对配电台区接入大量分布式电源、储能和电动汽车等电力电子元素,以最小化系统运行成本和储能出力调整为目标,提出基于短期、超短期阶段优化的配电台区微电网优化控制方法,实现自治均衡调控。为了减小通信配置需求和应对通讯环境条件不良的情况,不依赖集中通信的分布式调控方法得到一定关注,文献[46]基于瞬时功率理论和电压灵敏度矩阵,建立点对点通信的分散式模型预测控制方法,在不影响电动汽车充电情况下,优化调控充电桩无功功率输出,提升配电台区电压管理能力。文献[47]基于分布式控制和动态潮流在线计算,实时优化控制新能源发电和储能出力,实现配电台区潮流分布动态优化。文献[48]提出考虑不确定性的分布式无模型自适应调控方法,利用公共传播信息,本地用户实现快速计算以及对分布式资源近似最优控制,实现配电台区运行鲁棒优化。配电台区内部自治均衡,主要侧重于协调内部可调性资源,满足配电台区分布式光伏消纳、电动汽车充电管理、经济水平提升等不同类型运行需求。2) 满足与配电网外部互动需求,分析与动态聚合配电台区可调节性资源,参与需求侧响应、虚拟电厂、绿电交易等外部应用^[49-51],同时将外部调度指令优化分解下发给配电台区内可控元素,实现外部应用动态响应,提升电力电子化配电台区综合效益。此类调度策略,主要侧重于内部可调性资源聚合以及与配电网互动

应用响应,发挥电力电子化配电台区功率、能量调节特性,提升配电网运行灵活性。

对于多互联配电台区调度策略,重点在于如何利用配电台区共享资源进行协同优化运行,文献[52]考虑电动汽车负荷大量接入,建立以最小化变压器损耗、变流器损耗和储能运行成本为目标的优化调度模型,优化配电台区互联装置功率和储能功率,提高配电台区电动汽车充电需求满足率。随着低压直流元素增加和配电台区可靠性提升、动态增容等需求提出,基于电力电子调控的低压柔性互联优化调度,对支持台区低压柔性互联具有重要实际意义和应用价值,相比于单一配电台区,主要有两大不同:1) 目标函数设计,以多配电台区为整体进行考虑;2) 模型约束,考虑低压柔性互联运行模型,包括柔性互联装置、互联区域所接入元素的运行约束,互联网络潮流平衡约束,以及直流节点电压约束等。以分布式新能源消纳为例,给出多配电台区低压柔性互联调度典型模型,如式(1)~(4)。

$$\min \alpha \sum_{i=1}^{N_d} (P_{mg,exp,i} - P_{mg,i}) + \beta \sum_{i=1}^{N_d} P_{loss,sum,i} + r \sum_{i=1}^{N_d} (|P_{ess,i}| + |P_{fld,i}|) \quad (1)$$

$$f_{ac}(P_{mg,ac}, P_{ess,ac}, P_{fld,dc}, P_{ac,dc}) \leq 0 \quad (2)$$

$$f_{dc}(P_{dc,dc}, P_{mg,dc}, P_{ess,dc}, P_{fld,dc}, P_{fcint}) \leq 0 \quad (3)$$

$$f_{ac,dc}(P_{ac,dc}, P_{dc,dc}) \leq 0 \quad (4)$$

式中: α 、 β 、 r 为权重系数; N_d 为柔性互联配电台区总数; $P_{mg,ac}(P_{mg,dc})$ 、 $P_{ess,ac}(P_{ess,dc})$ 、 $P_{fld,ac}(P_{fld,dc})$ 分别为交流(直流)侧新能源功率、储能功率以及柔性负荷调节量集合; P_{fcint} 是各台区柔性互联功率指令集合; $P_{ac,dc}$ 、 $P_{dc,dc}$ 分别是柔性多端口配电装备交流端口、直流端口的功率集合; $f_{ac}(\cdot)$ 、 $f_{dc}(\cdot)$ 、 $f_{ac,dc}(\cdot)$ 为配电台区交流侧、直流侧以及多端口配电装备约束集合。

式(1)为调度模型目标函数,第一项代表分布式新能源发电缩减量,第二项为多配电台区整体运行损耗,第三项为储能和柔性负荷调节量,以最小化运行损耗和调节性资源使用,实现配电台区群范围内新能源最大化消纳;式(2)~(4)分别代表各台区交流侧分布式新能源、储能以及柔性负荷运行约束、低压交流配电网约束,直流侧分布式新能源、储能以及柔性负荷运行约束、低压直流配电网约束以及台区之间柔性互联运行约束,台区交直流耦合

的柔性多端口配电装备运行约束,然后通过上述模型求解得到多配电台区互济功率指令和可调节性资源功率指令,提升配电台区协同运行水平。

5 电力电子化配电台区电能质量治理

随着新能源、充电设施以及各类柔性负荷规模化接入,加剧了配电台区随机性、大功率扰动性、非线性、分散性等,使配电台区原有的三相不平衡、电压、谐波等电能质量问题更多凸显^[53-56],加大了电力电子化配电台区电能质量治理难度。关于配电台区电能治理方法,传统手段目前已研究较多,基本分为4大类^[57-58]:1)无源设备,配电台区配变压器低压侧部署固定电容器、滤波器等;2)有源设备,基于电力电子调控的有源电力滤波器(active power filter, APF)、静止无功补偿器(static var generator, SVG)等有源设备进行治理,但无源设备控制不灵活,难以连续调控,无法实现电能质量精细管理,有源设备控制灵活、响应速度快、连续补偿效果佳,但成本较高、运维复杂。3)混合补偿设备,结合无源补偿和有源补偿优点,构建混合补偿设备,提升电能质量治理经济性。4)低压负荷换相装置,实现三相不平衡治理。

除了上述方法之外,对于电力电子化配电台区,分布式源、储、柔性负荷电力电子并网装置以及台区低压柔性互联装置等,存在较大的无功补偿、电压响应、谐波抑制以及有功调节的潜力,通过电能质量补偿算法引入电力电子装置控制环,可以实现电能质量动态补偿,从而提升电能治理治理灵活性以及降低 SVG、APF 以及混合补偿设备配置成本,优化电力电子化配电台区运行品质,基本方法如图 12 所示。首先,基于无功补偿、谐波电流补偿、电压稳定响应等不同补偿功能需求,设计对应信号分析环节(例如不平衡电流补偿,基于检测信号进行三相不对称分析,筛出负序电流和零序电流

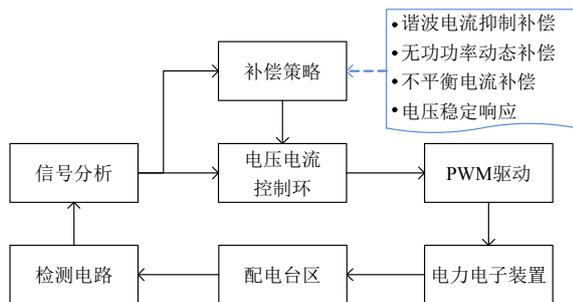


图 12 基于电力电子设备的电能质量补偿基本方法
Fig. 12 Basic method of power quality compensation based on power electronic equipment

分量),然后,电能质量分析结果被传递给补偿策略环节,将谐波电流、无功功率、不平衡电流补偿方法设计成补偿算法,作为附加控制环节,引入电力电子变换装置电压电流控制环,充分利用电力电子装置实时容量裕度,在常规功率输出基础上额外实现电能质量补偿功能。

下文结合电力电子设备和电力电子控制技术应用,分别对电力电子化配电台区的三相不平衡、交直流电压质量以及谐波抑制3方面进行归纳与总结。

5.1 三相不平衡

配电台区三相不平衡主要带来3方面影响^[59]:1)电压不均衡,供电电压质量下降;2)配电台区配电设备损耗增大和过热,绝缘加速老化;3)因负序电流、零序电流流通,线路运行损耗增加。对于三相不平衡治理,主要有两大类方法:1)三相负荷换相,将重载相负荷换至轻载相,实现三相负荷均衡;2)对台区负荷进行补偿,调整三相不平衡度。

对于负荷换相方法,通过对低压负荷进行精细管理,从根源上解决配电台区全线路三相不平衡问题,传统人工换相存在操作繁琐、人力成本大、依赖主观经验、短时停电等缺点,三相不平衡治理效果具有差异性。随着电力电子技术和控制技术发展,配置基于电力电子的低压负荷换相装置,灵活切换用户接入线路位置,实现低压线路各相潮流在线调节,从而减小配电台区三相不平衡度^[60]。基于低压负荷换相装置,实现配电台区负荷自动换相,提升配电台区三相不平衡治理智能化水平,其基本思路如图 13 所示。文献[61]结合基于磁保持继电器

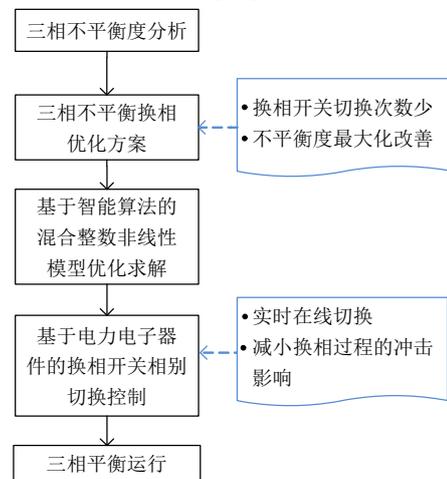


图 13 基于低压负荷换相装置的三相不平衡治理方法
Fig. 13 Three-phase unbalance mitigation based on phase-switching device of low voltage load

和电力电子开关的低压负荷在线变换装置，从装置配置、系统方案、优化控制等方面提出配电台区三相负荷不平衡治理技术，以换相开关切换次数最小和电流不平衡度最小为目标实现三相不平衡治理。文献[62]提出基于晶闸管的配电台区无缝换相装置，并采用向量基因遗传算法决策三相不平衡换相方案，实现三相不平衡优化治理。此类方法通过负荷换相切换，实现重载相负荷转移，从根源上解决三相不平衡问题，在实际应用时，需综合考虑换相装置配置数量与控制效果，以提升换相装置配置的合理性和经济性。

对于负荷补偿方法，利用配电台区可调节性资源对台区进行有功或无功功率补偿，从而改善三相不平衡度。文献[63]提出基于配变低压侧静态无功补偿器和负荷侧换相装置联合应用的低压台区三相不平衡治理方法，考虑低压配电网络运行约束建立混合整数非凸优化模型，并转化为二阶锥模型进行高效快速求解，优化控制静态无功补偿器和换相装置，平抑配电台区不平衡度。文献[64]提出基于全控型器件的三相不平衡有源补偿装置，对不平衡负载中负序电流和零序电流分量进行实时全补偿，从而改善配电台区电能质量。文献[65]结合传统的 Δ -Y 补偿和基于电力电子的动态补偿优缺点，提出基于分相补偿电容、相间补偿电容以及动态补偿装置的混合补偿方案以及控制策略，提升配电台区三相不平衡补偿灵活性和经济性。对于高比例光伏接入配电台区，文献[66]结合居民单相屋顶光伏并网装置无功调节能力，提出基于一致性算法和多代理架构的低压配电台区无功调节方法，动态提供无功功率支撑，补偿配电台区零序和负压电压，有效降低配电台区不平衡度。文献[67]结合储能调节灵活特性，提出基于深度加强学习的配电台区分布式储能优化控制策略，通过调整低压分布式储能有功实现功率补偿，解决大规模分布式光伏接入导致的台区三相不平衡问题。此类方法侧重通过利用各类补偿装置或可调节性分布式资源，实现功率不平衡补偿，从而达到三相平衡，在实际应用时可能涉及协调不同类型控制对象，对三相不平衡治理策略设计提出更高要求。

5.2 交直流电压质量

交直流电压扰动将影响电力电子化配电台区交直流侧运行品质，具体包括：1) 电压偏差大(过电压或低电压)，影响源荷储各类元素无法正常运

行，甚至引发脱网；2) 电压频繁波动，影响用户体验感和满意度，以及旋转类电机工作效率；3) 电压剧烈变化，容易引发绝缘刺穿、电流过大等，影响设备运行安全。故保障交直流电压质量是电力电子化配电台区高效运行关键。

对于配电台区交流电压问题，除了 SVG、电容器投切等调节控制方式之外，设计电力电子新型调节装置或建立电力电子并网装置网侧电压与功率耦合关系，是电力电子化配电台区交流侧电压治理新思路、新方法，丰富了低压交流电压调控手段，可实现全线路多点电压问题解决。在电力电子新型调节装置方面，文献[68]针对单相负载网络提出一种基于电力电子变换电路和电容器的配电台区主动动态电压调节器，既适应配电台区短期快速扰动，同时为配电台区提供长期的无功支撑，有效解决因单相负载问题引发的电压质量问题，该方法充分利用电力电子灵活控制优势，提升无源设备电压调节与无功补偿效果；在电力电子并网装置主动电压支撑方面。文献[69-72]对于分布式光伏并网装置，充分利用并网装置无功调节能力，建立不同类型的电压-无功耦合关系如迟滞特性、分段下垂特性等，实现配电台区分布式电压控制方法，提升高比例分布式光伏接入的配电台区电压质量。作为灵活性资源，储能可参与配电台区电压质量快速治理，维持交流电压在正常范围内。文献[73]基于分布式和集中式结合的控制方法，动态协调配电台区不同节点的储能功率出力，高效解决高比例分布式光伏接入过电压问题。文献[74]提出一种基于本地下垂控制和一致性控制结合的储能功率分布式控制方法，实现配电台区实现电压管理，解决配电台区光伏发电高峰时段电压上升问题和负荷高峰时电压下降问题。文献[75]提出考虑信息交互延时的分布式储能控制方法，提高储能参与配电台区电压控制的实用性，提升高比例分布式光伏接入下电压治理水平。为了提升电力电子并网装置电压动态支撑能力，文献[76-77]提出虚拟同步控制技术，使电力电子并网装置模拟虚拟同步电机惯性响应特性，根据并网电压波动情况动态调整并网装置与电网的功率交换，实现配电台区交流电压动态支撑。上述基于源荷储电力电子并网装置的电压调节方法，主要侧重于并网装置控制特性改善，以主动响应电压变化，实现配电台区交流侧不同节点位置电压快速动态调节。

对于配电台区直流电压问题,主要通过电力电子装置调节,提升低压直流电压平衡能力,目前研究较多的调节方法包括定电压控制、下垂控制、功率控制以及混合控制等,建立不同类型的电压主动响应特性,协调不同类型控制单元或装置的电压调节行为,从而满足不同运行模式下直流电压调节需求。文献[78]根据低压直流系统不同运行模式,提出并网模式下基于电压源换流器(voltage source converter, VSC)的定电压控制策略,和离网模式下基于储能的定电压控制策略,并结合稳定裕度对电压电流环中PI控制参数进行合理设计,提升低压直流电压动态响应能力。文献[79]对于两端低压柔性互联系统中用于电压主控的VSC,提出一种基于多扰动因素引入电流环的定电压控制策略,提升VSC电压动态响应特性,提升低压直流电压运行品质。文献[80]考虑低压光伏、储能和燃料电池运行特性,将低压直流电压划分多个区间,分别在不同区间提出下垂控制方法,三者相互配合提升低压直流电压调整能力,如在额定电压附近,光伏和燃料电池不参与电压调节,储能通过下垂控制环节进行充电放电实现直流电压波动抑制。针对直流负载接入配电台区低压直流不同极的情况,文献[81]考虑中性线电流和阻抗因素,提出低压直流双极电压管理方法,优化决策送端正、负极电压指令,减小负载波动引发正、负极电压幅值差异性以及电压暂降问题。

5.3 谐波抑制

电力电子化配电台区,因分布式新能源、充电桩、变频负荷等电力电子并网装置,在运行过程中带来一定谐波注入,大量分布式谐波存在对配电台区运行带来不利影响^[82]。1)因谐波电流存在,增加配变设备和配电线路运行损耗、绝缘老化加速,以及导致温度上升对设备安全造成隐患;2)对通信设备或元件等产生干扰;3)容易引发局部谐振;4)影响表计计量精确性;5)继电保护误动作。因此需重视配电台区谐波治理,提高配电台区谐波抑制能力,推动配电台区高品质运行。理清配电台区谐波产生机理以及谐波特性,有利于谐波控制策略设计。对于谐波机理分析,文献[83]重点分析新能源并网逆变器的谐波产生模型,归纳谐波阻抗估计方法和谐波责任评估指标以及其适用范围、局限性,并对新能源条件下谐波新特征以及责任评估存在的难点进行详细分析与总结,为谐波溯源、谐波控制研究提供支持。文献[84]基于充电站实测数据

对不同类型电动汽车(私家车、巴士车)充电过程中谐波特性及其关联因素进行详细分析,并与理论仿真结果进行对比,为进一步开展谐波抑制提供参考与依据;对于谐波抑制问题,除了在配电台区配置无源滤波器、有源滤波器之外,基于电力电子并网装置的谐波补偿方法得到广泛的关注和研究,促进提升电力电子化配电台区谐波抑制能力。文献[85]结合配电台区光伏逆变器不同运行方式,提出光伏逆变器自适应谐波抑制算法,在低功率输出时采用 dq 轴前馈控制方式,在高功率输出时先采用陷波器滤除特定次谐波再进行前馈控制,从而提升全功率区间谐波抑制水平。文献[86]在分布式光伏逆变器控制环路中引出有源电力滤波器(active power filter, APF)控制算法,对基波电流与谐波电流进行协调控制,并基于分布式光伏原理样机验证了谐波抑制效果。文献[87]在单相分布式新能源最大功率跟踪控制基础上,引入面向三角形接线/星形接线配电台区的不同类型分相谐波补偿控制方法,为配电台区线路提供谐波电流动态补偿,提升配电台区谐波治理水平。

综上,随着源荷储元素丰富和配电台区互联发展,多元电力电子调控资源综合利用、更加高效的电能质量治理方法,将成为电力电子化配电台区新的研究热点,以技术经济性最优方式为电力电子化配电台区用户提供高品质电力服务。

6 电力电子化配电台区稳定分析与控制

相比于传统配电台区,电力电子化配电台区存在分布式资源并网装置、台区柔性互联装置(或端口)、交直流互联装置(或端口)等多类型、多数量电力电子变流器,整体惯性能力弱、谐振阻尼能力弱,同时受控制方式、调节特性、功率扰动、规模数量等因素影响,电力电子装置之间以及与配电线路可能产生交互作用,容易引发谐振现象,影响配电台区安全稳定运行。需要对电力电子化配电台区开展稳定性分析与控制,理清振荡机理以及提出对应抑制措施,对于电力电子分布式资源规划接入与台区管理具有重要意义。对于电力电子化配电台区低压交流侧,因分布式电源电力电子并网装置LCL滤波器具有谐振尖峰特性,在各类谐波激励下容易在谐振点附近诱发振荡,目前主要通过引入电容电流或网侧电流反馈,设计电力电子并网装置有源阻尼控制算法,从而提升低压交流侧谐振阻尼能力和运行

稳定性^[88-90]。对于电力电子化配电台区低压直流侧，因惯性阻尼弱，且电力电子装置控制模式多、数量多，其谐振机理分析与稳定控制复杂，目前基本方法如图 14 所示，下文将主要对低压直流侧稳定分析与控制研究进行归纳与总结。

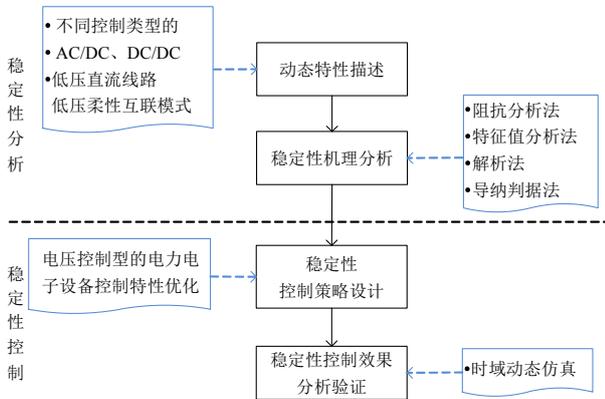


图 14 低压直流侧稳定分析与控制基本方法
Fig. 14 Basic method of stability analysis and control on low voltage DC side

6.1 稳定性分析

在建模分析方面，目前研究主要基于阻抗分析法、特征值分析法和解析法等，开展电力电子化配电台区振荡机理分析。

1) 阻抗分析法，开展阻抗特性建模，然后基于奈奎斯特图和伯德图，对频率特性、幅值裕度和相位裕度等阻抗特性进行分析。文献[91]对于低压直流配电系统中电压控制型 DC/DC 变流器和恒功率负载 DC/DC 变流器开展阻抗建模以及谐振机理分析，理清容性输出阻抗与感性输入阻抗的交互作用。但上述模型没考虑配电台区交直流互联 AC/DC 变流器为电压主控单元的情形。文献[92-93]结合电压源换流器 voltage source converter, VSC)功率-电压下垂控制特性以及直流线路、负荷特性，建立低压直流配电系统高频振荡频域分析模型，并考虑控制系统具有较快电气量跟随特性，对系统整体传递函数进行降阶处理，并进一步分析降阶模型极点分布以及振荡模态特性，提高低压直流配电网高频振荡以及影响因素分析效率。文献[94]考虑柔性互联装置主从控制和下垂控制模式，基于戴维南等效电路推导出不同控制模式下源变流器的输出阻抗和负载变流器的输入阻抗，结合阻抗比奈奎斯特曲线进行稳定性影响分析，得出恒功率负载功率持续增加将加剧负阻抗不稳定性风险，以及下垂控制模式稳定边界范围较主从控制更大。此类方法主要侧重于低压直流配电系统阻抗特性刻画，基于奈奎斯特

图和伯德图，实现稳定性分析；

2) 特征值分析法，考虑配电台区交直流 AC/DC 和各类 DC/DC 变流器等控制特性，直流线路参数分布以及台区柔性互联等，建立式(5)所示小信号模型，从而分析低压直流配电系统的特征矩阵特征值分布特性。文献[95]对于主从控制的低压柔性互联系统，提出定电压和定功率控制的 VSC 降阶模型，并进一步建立多端低压直流配电系统 11 阶小信号分析模型，通过状态矩阵特征值进行稳定性判定。所提出建模方法实现 33 阶全阶模型降阶，并与详细电磁暂态模型进行对比，验证了所提出降阶模型在稳定性评估方面的精确性。文献[93]考虑 VSC 直流电压-交流侧功率和直流电压-直流侧功率两种不同下垂控制模式，建立多端低压柔性互联系统小信号模型，通过状态矩阵特征值分布分析上述两种控制模式以及下垂系数对小信号稳定性的差异性，并验证分析在稳定性边界方面，直流电压-交流侧功率下垂控制优于直流电压-直流侧功率下垂控制。此类方法主要侧重于低压直流配电系统状态矩阵建立与分析，进而基于状态矩阵特征值，分析判断低压直流配电系统稳定性。

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \tag{5}$$

式中： A 、 B 分别为状态矩阵、输入矩阵； x 为状态变量向量； u 为扰动变量。

3) 解析法，考虑特定频率范围稳定特性以及影响因素，进行模型降阶然后求解振荡模态解析表达式。文献[96]忽略电流内环控制影响，建立直流电压控制时间尺度(约 100ms)的低压直流配电系统物理等效模型，并对动态过程求解推导出低频振荡解析表达式，结合灵敏度分析推导直流线路参数影响较小，进而对动态模型降阶处理以及推导振荡频率简化表达式，然后对电压环控制比例积分 (proportional-integral, PI) 控制系数、直流侧电容对低频振荡频率的正、负相关性进行详细分析。该方法对振荡频率分析具有直观性，但需对系统模型进行大量简化、降阶，实现解析表达式推导。除了上述 3 种方法之外，文献[97]对于直流配电系统稳定性分析，提出基于导纳视角和广义奈奎斯特判据的稳定性条件，并与阻抗判据进行对比分析，导纳判据在计算量方面具有优势，且通过谐振阻尼因子，可实现稳定性判断以及振荡频率获取。但导纳判据存在一定局限性，需电压源变换器输出阻抗在右半平面没有零极点。目前电力电子化配电台区稳定性

分析研究大多是基于确定性条件或运行点开展研究,而电力电子化配电台区光伏、电动汽车等分布式资源存在随机性特点,导致配电台区运行状态随机变化以及柔性互联具有时变性,故计及随机扰动特性的电力电子化配电台区稳定性分析方法,将有利于提升稳定性分析精度,同时存在极大难度和挑战^[98]。

6.2 稳定性控制

对于稳定性控制,主要通过修正用于电压控制的电力电子变流器控制环节,改善系统动态特性,提升系统振荡阻尼能力。文献[91]基于谐振机理提出有源阻尼补偿器,在谐振点附近将电压控制变流器输出阻抗由容性补偿为感性,从而消除谐振通道实现谐振抑制。文献[99]设计一种基于带通+一阶微分的有源阻尼控制器,抑制谐振频率处电压源型变流器最小相位环节环路增益,同时减弱系统主导特征值对稳态交互功率的敏感性,基于带通环节和一阶微分环节的独立阻尼系数调整,灵活改善系统阻尼特性,从而提高低压直流配电系统稳定性。文献[92]考虑VSC下垂控制系数以及直流线路参数对高频振荡影响,在VSC下垂控制环节中引入基于上述因素影响的高频控制环节,提供快速阻尼补偿,有效抑制低压直流配电系统控制环节和物理环节引发的高频振荡发生。文献[100]为了提升低压配电系统对参数摄动和负荷扰动导致的低频振荡抑制能力,在AC/DC下垂控制基础上,提出基于 H_∞ 回路成形法和规范互质分解技术的鲁棒稳定控制策略,提升控制器计算效率和降低控制器实现复杂度,并基于双端低压柔性互联系统模型验证低频振荡抑制鲁棒控制性能。电力电子化配电台区存在多端口配电装备、VSC、柔性互联装置、光伏DC/DC、储能DC/DC等具备电压控制能力的多元电力电子变流器,考虑多样化控制模式和运行状态随机时变特性,优化设计稳定性控制策略,对电力电子化配电台区稳定运行具有重要意义。

7 电力电子化配电台区故障快速保护

故障快速保护是保障电力电子化配电台区安全运行的关键技术。相对低压交流侧,低压直流侧阻抗小、惯性小,在故障条件下电流上升速率快,且直流电流没有自然过零点,故对低压直流故障分析、保护配置、开断容量等方面提出更高的要求。本章主要结合电力电子装置特性以及低压直流回

路故障特点,对电力电子化配电台区低压直流故障保护进行综述。

7.1 故障保护策略

目前有关低压直流系统故障保护研究,主要侧重故障电流特性分析以及基于电力电子装置、低压直流断路器的保护策略设计,实现故障精确定位、快速隔离,最大程度减小故障影响范围。针对低压直流系统不同区域故障,采取不同类型保护措施,有利于提升故障条件下低压直流运行特性。为了避免故障电流快速上升导致交直流变换装置闭锁,从而引发低压直流系统整体停运,文献[101]考虑电流故障分量方向性特征,提出基于中压柔性配电装备的低压直流配电网主动限流控制以及实现方法,且不依赖通信系统和附加边界元件,降低故障电流,避免中压柔性配电装备直流侧闭锁,提高设备故障穿越能力,从而减小低压直流停电范围。对于低压直流母线和馈线线路保护,文献[102]开展不同位置的单极接地故障和极间故障建模分析,理清不同故障类型暂态电流变化特性,并提出基于暂态故障电流变化率绝对值的反时限保护策略与配合方案,实现低压直流线路故障快速可靠切除。文献[103]分析直流系统短路、接地等不同故障类型特点,提出基于源荷储电力电子器件自保护和变流器隔离单元的主动直流保护方案,协调保护动作逻辑与器件控制逻辑,实现微秒级故障支路快速准确隔离,避免故障范围扩大。对于低压直流用户侧保护,文献[104]从民用供电角度,分析低压直流配电末端各类故障以及电击条件下电气量变化特性,并基于用电安全,总结各类型保护措施以及负载保护特殊性。

7.2 低压直流断路器

低压直流断路器是用于低压直流配电保护的关键设备之一。基于拓扑结构和工作原理,目前直流断路器可以分为机械式、混合式和全固态式,主要特点如表3所示^[105]。可以看出,机械式通态损耗小,但熄弧时间长,可能导致故障范围扩大;全

表3 直流断路器对比

Table 3 Comparison of DC circuit breakers

类型	结构特点	优点	缺点
机械式	机械开关、反向电流支路、吸能支路并联	运行稳定、通态损耗小	开断时间长、触头易损坏
混合式	基于机械开关的载流支路、固态开关、吸能支路并联	开断时间短、通态损耗小	造价高
全固态式	固态开关、吸能支路并联	无电弧、开断时间极短	通态损耗高、造价较高

固态式利用电力电子开关切换电流，具有极高开断性能以及无电弧损伤，但其导通损耗相对较高；混合式断路器，结合机械式和全固态式优点，采用机械开关和固态开关混合设计，兼顾开断时间、通态损耗等问题，具有较好的综合性能。

在低压直流断路器相关研究方面，基于电力电子技术发展与应用，混合式和全固态式低压直流断路器得到广泛关注。为了提升混合式低压直流断路器灭弧性能，文献[106]对真空电弧电流转移特性以及影响因素进行了研究分析，然后得到真空电弧电流转移判据，提高混合式低压直流断路器开断速度。文献[107]提出全固态低压直流断路器拓扑结构以及参数选取方法，并研制 $\pm 380\text{V}$ 直流断路器样机，基于动模实验平台验证其开关动作性能。随着半导体材料技术发展，新型碳化硅器件应用于全固态低压直流断路器，将有利于进一步提升开断能力以及降低通态损耗。文献[108]利用碳化硅金氧半场效应晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) 低导通阻抗、击穿电压高等优点开发低压直流断路器，实现快速可靠切断短路电流，并基于分断过电压性能表现，分析验证了碳化硅 MOSFET 低压直流断路器可行性。对于低压直流断路器试验分析，文献[109]结合低压直流断路器的开断技术以及开断要求，设计低压直流断路器开断试验回路以及实施方法，为开展低压直流断路器性能测试工作提供参考。随着配电台区电力电子化程度加深，在低压直流断路器开断容量、导通损耗、超高速响应、耐压范围等性能方面需要进一步深入研究，支撑电力电子化配电台区低压直流保护可靠性和经济性。

8 结论与展望

分布式资源规模化发展和低压直流技术不断成熟，引发配电台区电力电子化日趋凸显，开展适应规模化分布式源荷储接入的配电台区结构形态、低压柔性互联形态分析与关键组网设备研究更加迫切。此外，需考虑电力电子化配电台区随机性、不确定性、非线性等运行特性以及电力电子并网装置调控特性，结合配电台区结构形态以及低压柔性互联形态，深入分析与研究配电台区优化调度、电能质量治理、稳定分析与控制以及故障快速保护等方面运行控制机理与方法，形成运行控制理论体系，支撑电力电子化配电台区经济、优质、稳定、

安全运行。

本文结合配电台区电力电子化演变和现有技术发展，对未来研究进行展望，具体如下：

1) 高性能柔性配电装备技术。

作为重要组网装备，中低压柔性多端口配电装备技术经济性提升是交直流柔性混合型、交流直柔性集成型电力电子化配电台区应用发展的关键因素，低成本、紧凑型、模块化、高功率密度以及优良故障穿越特性是柔性配电装备技术未来发展趋势。同时，充分挖掘中低压柔性多端口配电装备控制灵活性，研究端口多功能复合控制技术，实现配电台区电能质量综合治理、自治均衡管理以及多台区协同运行。因此，结合结构、功能的集约化设计与研发，开展高性能中低压柔性多端口配电装备技术研究，是未来电力电子化配电台区高效经济组网、柔性灵活控制的重要基础。

2) 配电台区全局优化控制技术。

结合配电台区“管家”如智能融合终端的边缘计算和管控能力，研究配电台区电能质量全局最优治理技术，统筹全局分布式调控资源如 SVG、APF 等补偿装置以及实时容量富裕的各类电力电子装置资源，实现三相不平衡、谐波补偿、电压治理等电能质量优化治理，降低配电台区运行损耗以及补偿装置配置成本，是未来电力电子化配电台区电能质量高效、经济治理的重要手段。此外，基于功率、能量可调性资源，开展兼容配电台区内部耦合和与配电网灵活互动的管控技术研究以及管控链路设计，高效解决配电台区重过载、分布式新能源消纳、负荷故障转供等问题，同时聚合配电台区可调性资源，参加虚拟电厂交易、需求侧响应、多台区柔性互济等外部互动应用，是未来电力电子化配电台区优化调度的关键技术。

3) 低压柔性互联经济性评估以及功率耦合控制技术。

对于低压柔性互联电力电子化配电台区，需考虑柔性互联结构、运行模式、线路长度、电压等级、分布式资源接入规模以及配电台区负荷特性等影响，挖掘具体落地场景，建立低压柔性互联经济性评估方法、手段以及开展评估软件开发，是未来支撑配电台区低压柔性互联落地应用的关键技术。此外，在柔性互联控制节点集成大量电力电子源荷储资源，多端低压柔性互联系统运行机理复杂，以不同类型电力电子装置功率特性和控制特性为基础，

开展电力电子配台区柔性互联运行模式设计、功率耦合机理分析、多层次协同控制技术研究,是未来提升多端低压柔性互联系统稳态、动态特性的关键技术。

4) 低压直流安全保护技术。

规模化分布式源荷储资源接入电力电子化配台区低压直流侧,对直流断路器开断容量、开断速度等性能提出新的需求和挑战。结合新一代半导体器件技术发展,开展低成本、大容量、高耐压、低导通损耗以及具备限流功能的一、二次融合低压直流断路器理论分析与设备研制,是未来低压直流安全保护关键设备研究的技术难点。同时,突破器件级-设备级-系统级多层协调低压直流故障保护基础理论以及设计实用化的工程应用方案,掌握多类型故障机理以及保护配置技术,实现低压直流故障精准定位、快速隔离,是支撑电力电子化配台区低压直流安全运行的研究热点与重要保障。

参考文献

- [1] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035(in Chinese).
- [2] 刘海涛, 熊雄, 季宇, 等. 直流配电系统不同运行模式下扁平化管理与协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 37-46.
LIU Haitao, XIONG Xiong, JI Yu, et al. Research on power flat management and coordinated control strategy under different operation modes for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 37-46(in Chinese).
- [3] 马钊, 赵志刚, 孙媛媛, 等. 新一代低压直流供用电系统关键技术及发展展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 12-22.
MA Zhao, ZHAO Zhigang, SUN Yuanyuan, et al. Key technologies and development prospect of new generation low-voltage DC power supply and utilization system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 12-22(in Chinese).
- [4] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154(in Chinese).
- [5] 梁永亮, 吴跃斌, 马钊, 等. 新一代低压直流供用电系统在“新基建”中的应用技术分析与发展展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 13-24.
LIANG Yongliang, WU Yuebin, MA Zhao, et al. Application and development prospect of new generation of LVDC supply and utilization system in “new infrastructure”[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 13-24(in Chinese).
- [6] 姜淞瀚, 彭克, 徐丙垠, 等. 直流配电系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 219-231.
JIANG Songhan, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Current situation and prospect of demonstration projects of DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 219-231(in Chinese).
- [7] HAKALA T, LÄHDEAHO T, JÄRVENTAUSTA P. Low-voltage DC distribution—utilization potential in a large distribution network company[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1694-1701.
- [8] SHAH F M, MAQSOOD S, SHAH Z M, et al. Multilevel LVDC distribution system with voltage unbalancing and disturbance rejection control topology[J]. IEEE Access, 2020, 8: 133787-133801.
- [9] 熊雄, 季宇, 李蕊, 等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6802-6813.
XIONG Xiong, JI Yu, LI Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6802-6813(in Chinese).
- [10] 刘沛津, 石梦涛, 何林, 等. 中低压直流配电网母线电压稳定控制[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 120-125.
LIU Peijin, SHI Mengtao, HE Lin, et al. Stability control of bus voltage for medium- and low-voltage DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 120-125(in Chinese).
- [11] 金吉, 唐西胜, 师长立. 中低压直流配电压层级配置方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 31-38.
JIN Ji, TANG Xisheng, SHI Changli. Voltage hierarchy configuration method for medium-and low-voltage DC distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 31-38(in Chinese).
- [12] 张勇军, 刘子文, 宋伟伟, 等. 直流配电系统的组网技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 39-49.
ZHANG Yongjun, LIU Ziwen, SONG Weiwei, et al.

- Networking technology and its application of DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 39-49(in Chinese).
- [13] 赵政嘉, 李海波, 赵宇明, 等. 多类型分布式电源接入下的低压交流与直流配电网运行经济性对比[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 50-61.
ZHAO Zhengjia, LI Haibo, ZHAO Yuming, et al. Operational economic comparison of low voltage AC and DC distribution networks with multi-type distributed generation integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 50-61(in Chinese).
- [14] 梁得亮, 柳轶彬, 寇鹏, 等. 智能配电变压器发展趋势分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 1-14.
LIANG Deliang, LIU Yibin, KOU Peng, et al. Analysis of development trend for intelligent distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 1-14(in Chinese).
- [15] 盛万兴, 段青, 孟晓丽, 等. 电力电子化进程下的交直流无缝混合灵活配电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1877-1888.
SHENG Wanxing, DUAN Qing, MENG Xiaoli, et al. Research on the AC&DC seamless-hybrid fluent power distribution system following the power electronics evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1877-1888(in Chinese).
- [16] 刘日亮, 刘海涛, 夏圣峰, 等. 物联网技术在配电台区中的应用与思考[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1707-1714.
LIU Riliang, LIU Haitao, XIA Shengfeng, et al. Internet of things technology application and prospects in distribution transformer service area management[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1707-1714(in Chinese).
- [17] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70(in Chinese).
- [18] 钱峰, 皮杰, 刘俊磊, 等. 微电网建模与控制理论综述[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2020, 53(12): 1044-1054.
QIAN Feng, PI Jie, LIU Junlei, et al. Review of microgrid modeling and control theory[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(12): 1044-1054(in Chinese).
- [19] WANG Bowen, VERBIČ G. Stability analysis of low-voltage distribution feeders operated as islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4681-4689.
- [20] LIU Jianqiang, HUANG Xiaoguang, HONG Ying, et al. Coordinated control strategy for operation mode switching of DC distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(2): 334-344.
- [21] GANESAN S I, PATTABIRAMAN D, GOVINDARAJAN R K, et al. Control scheme for a bidirectional converter in a self-sustaining low-voltage DC nanogrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6317-6326.
- [22] HOCK R T, DE NOVAES Y R, BATSCHAUER A L. A voltage regulator for power quality improvement in low-voltage distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2050-2060.
- [23] HAQUE M M, ALI M S, WOLFS P, et al. A UPFC for voltage regulation in LV distribution feeders with a DC-link ripple voltage suppression technique[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6857-6870.
- [24] 李俊杰, 吕振宇, 吴在军, 等. 基于电力电子变压器的交直流混合微电网运行模式自适应切换策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 126-131, 138.
LI Junjie, LÜ Zhenyu, WU Zaijun, et al. Adaptive switching strategy of AC/DC hybrid microgrid operating mode based on power electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 126-131, 138(in Chinese).
- [25] 金强, 冯明灿, 李红军, 等. 交直流配电台区建设改造模式研究[J]. 供用电, 2020, 37(10): 16-21.
JIN Qiang, FENG Mingcan, LI Hongjun, et al. Research on construction and transformation mode of AC and DC distribution station area[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(10): 16-21(in Chinese).
- [26] 段青, 盛万兴, 孟晓丽, 等. 面向能源互联网的新型能源子网系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 388-398.
DUAN Qing, SHENG Wanxing, MENG Xiaoli, et al. Research of energy sub grid for the future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 388-398(in Chinese).
- [27] 王鹤, 栾钧翔. 变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 171-187.
WANG He, LUAN Junxiang. Summary of power electronic evolution of transformer and its influence on voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 171-187(in Chinese).
- [28] 傅晓飞, 廖天明, 纪坤华. 基于交叉联合供电的多配电

- 台区网损优化[J]. 电力与能源, 2017, 38(2): 102-106.
FU Xiaofei, LIAO Tianming, JI Kunhua. Line loss optimization of multi-distribution transformer bank based on interconnected power supply[J]. Power & Energy, 2017, 38(2): 102-106(in Chinese).
- [29] 徐冬生, 周静, 金海, 等. 互联配电台区故障背靠背无缝模式切换策略[J]. 电器与能效管理技术, 2018(20): 15-20, 81.
XU Dongsheng, ZHOU Jing, JIN Hai, et al. Seamless mode switching strategy for back-to-back devices under connecting TD's failure[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(20): 15-20, 81(in Chinese).
- [30] 钟伟东, 汤东升, 刘继文, 等. 低压智能柔性互连交直流混合配电网设计[J]. 现代建筑电气, 2019, 10(1): 16-21.
ZHONG Weidong, TANG Dongsheng, LIU Jiwen, et al. Design of intelligent flexible interconnected AC/DC hybrid LV distribution network[J]. Modern Architecture Electric, 2019, 10(1): 16-21(in Chinese).
- [31] 吴峻, 武迪, 朱金大, 等. 多端柔性直流配电网接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2551-2560.
WU Jun, WU Di, ZHU Jinda, et al. Grounding method design of multi-terminal flexible DC distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2551-2560(in Chinese).
- [32] 沈培锋, 王徐延, 张昊亮, 等. 考虑规模化快充负荷的低压互联配电台区风险评估[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 56-64.
SHEN Peifeng, WANG Xuyan, ZHANG Haoliang, et al. Risk assessment of low-voltage interconnected distribution districts considering large-scale fast charging load[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 56-64(in Chinese).
- [33] 袁桂丽, 苏伟芳. 计及电动汽车不确定性的虚拟电厂参与 AGC 调频服务研究[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2538-2548.
YUAN Guili, SU Weifang. Virtual power plants providing AGC FM service considering uncertainty of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2538-2548(in Chinese).
- [34] 孙韩, 陈宗海, 武骥. 计及电动汽车不确定性的家庭微电网实时能量调度策略[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2544-2551.
SUN Han, CHEN Zonghai, WU Ji. Online energy dispatch strategy for residential microgrid considering uncertainty of electric vehicle[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2544-2551(in Chinese).
- [35] 王晞, 徐浩, 王海燕, 等. 考虑风电和电动汽车不确定性的综合能源系统日前经济调度[J]. 电力建设, 2020, 41(12): 82-91.
WANG Xi, XU Hao, WANG Haiyan, et al. Day-ahead economic dispatch of integrated energy system considering uncertainties of wind power and electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12): 82-91(in Chinese).
- [36] 林铭蓉, 胡志坚, 高明鑫, 等. 基于时空规律的电动汽车负荷建模及其自动需求响应[J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 99-107.
LIN Mingrong, HU Zhijian, GAO Mingxin, et al. Electric vehicle load modeling and automatic demand response based on space-time law[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 99-107(in Chinese).
- [37] 石锦凯, 鲍谚, 陈振, 等. 计及充电负荷不确定性的充电站储能鲁棒优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 49-58.
SHI Jinkai, BAO Yan, CHEN Zhen, et al. Robust optimization configuration method of energy storage for charging stations considering charging load uncertainty [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 49-58(in Chinese).
- [38] 许寅, 李佳旭, 王颖, 等. 考虑光伏出力不确定性的园区配电网日前运行计划[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 85-91, 105.
XU Yin, LI Jiaxu, WANG Ying, et al. Day-ahead operation plan for campus distribution network considering uncertainty of photovoltaic output[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 85-91, 105(in Chinese).
- [39] 孙珂, 赵鹏飞, 韩晓男, 等. 考虑高比例可再生能源出力不确定性的电力流规划方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 79-85.
SUN Ke, ZHAO Pengfei, HAN Xiaonan, et al. Electricity flow planning method for high penetration of renewable energy[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 79-85(in Chinese).
- [40] 张家安, 王琨玥, 陈建, 等. 基于空间相关性的分布式光伏出力预测[J]. 电力建设, 2020, 41(3): 47-53.
ZHANG Jiaan, WANG Kunyue, CHEN Jian, et al. Research on prediction of distributed photovoltaic output considering spatial relevance[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(3): 47-53(in Chinese).
- [41] 杜进桥, 徐诗鸿, 胡志豪, 等. 基于光伏出力区间预测的相变储能电-热联合调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 109-116.

- DU Jinqiao, XU Shihong, HU Zhihao, et al. Electric-thermal combined scheduling strategy by phase-change energy storage based on interval prediction of photovoltaic output[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(21): 109-116(in Chinese).
- [42] 王宁, 孙玲玲, 贾清泉, 等. 计及光伏调压能力的分布式光伏并网机会约束规划方法[J]. *电工电能新技术*, 2018, 37(6): 88-96.
- WANG Ning, SUN Lingling, JIA Qingquan, et al. Chance constrained programming method of distributed photovoltaic grid connection considering PV voltage regulation ability[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2018, 37(6): 88-96(in Chinese).
- [43] 陈泽雄, 张新民, 王雪峰, 等. 分布式光伏电站接入配电网的分布鲁棒优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(13): 30-42.
- CHEN Zexiong, ZHANG Xinmin, WANG Xuefeng, et al. A distributionally robust optimal allocation method for distributed photovoltaic generation stations integrated into a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(13): 30-42(in Chinese).
- [44] 唐巍, 李天锐, 张璐, 等. 基于三相四线制最优潮流的低压配电网光伏-储能协同控制[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(12): 31-40.
- TANG Wei, LI Tianrui, ZHANG Lu, et al. Coordinated control of photovoltaic and energy storage system in low-voltage distribution networks based on three-phase four-wire optimal power flow[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(12): 31-40(in Chinese).
- [45] 寇凌峰, 熊雄, 侯小刚, 等. 面向低压配变台区的微电网技术[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(4): 665-670.
- KOU Lingfeng, XIONG Xiong, HOU Xiaogang, et al. Microgrid technology for low voltage distribution transformer station area[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(4): 665-670(in Chinese).
- [46] HU Jindi, YE Chengjin, DING Yi, et al. A distributed MPC to exploit reactive power V2G for real-time voltage regulation in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 576-588.
- [47] BELL M, BERKEL F, LIU S. Real-time distributed control of low-voltage grids with dynamic optimal power dispatch of renewable energy sources[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(1): 417-425.
- [48] WEI Boyuan, QIU Zhifeng, DECONINCK G. A mean-field voltage control approach for active distribution networks with uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(2): 1455-1466.
- [49] 张卫国, 陈良亮, 成海生, 等. 基于电动汽车供电资源态势感知的台区负荷弹性调度策略[J]. *电力建设*, 2020, 41(8): 48-56.
- ZHANG Weiguo, CHEN Liangliang, CHENG Haisheng, et al. Elastic load scheduling based on awareness of electric vehicle power supply resources[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(8): 48-56(in Chinese).
- [50] 刘东奇, 曾祥君, 王耀南. 边缘计算架构下配电台区虚拟电站控制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(13): 2852-2860, 2870.
- LIU Dongqi, ZENG Xiangjun, WANG Yaonan. Control strategy of virtual power station in distribution transformer area under edge computing architecture [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(13): 2852-2860, 2870(in Chinese).
- [51] 王冰钰, 颜拥, 文福拴, 等. 基于区块链的分布式电力交易机制[J]. *电力建设*, 2019, 40(12): 3-10.
- WANG Bingyu, YAN Yong, WEN Fushuan, et al. A blockchain based distributed power trading mechanism [J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(12): 3-10(in Chinese).
- [52] 孙国强, 徐广开, 沈培锋, 等. 规模化电动汽车负荷的柔性台区协同经济调度[J]. *电网技术*, 2020, 44(11): 4395-4403.
- SUN Guoqiang, XU Guangkai, SHEN Peifeng, et al. Coordinated economic dispatch of flexible district for large-scale electric vehicle load[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(11): 4395-4403(in Chinese).
- [53] 袁敞, 郝毅, 冯佳耀, 等. 复杂工况下并联型电能质量补偿装置净现值比较研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(1): 11-19.
- YUAN Chang, HAO Yi, FENG Jiayao, et al. Research on the net present value comparison of shunt power quality compensators under complex conditions[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(1): 11-19(in Chinese).
- [54] 袁泽, 宝海龙, 周鹿鸣, 等. 规模化电采暖设备对配电网电能质量的影响分析[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(1): 60-68.
- YUAN Ze, BAO Hailong, ZHOU Luming, et al. Analysis on impacts of large-scale electric heating radiators to power quality of distribution networks[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(1): 60-68(in Chinese).
- [55] 金炜, 徐斌, 丁津津, 等. 基于协同自治的光伏扶贫农网电能质量综合控制技术研究[J]. *电力电容器与无功补*

- 偿, 2017, 38(3): 157-161, 177.
- JIN Wei, XU Bin, DING Jinjin, et al. Research on power quality integrated control technology for photovoltaic poverty alleviation rural grid based on coordination and autonomy[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2017, 38(3): 157-161, 177(in Chinese).
- [56] 康鹏, 郭伟, 黄伟钢, 等. 区域电网电能质量问题及治理关键技术综述[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(24): 1-12.
- KANG Peng, GUO Wei, HUANG Weigang, et al. Review of the power quality problem and key treatment technology of regional power grid[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(24): 1-12(in Chinese).
- [57] 张建军, 程大印, 韩丹, 等. 混合智能无功补偿在低压台区的应用[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2016, 37(3): 1-4.
- ZHANG Jianjun, CHENG Dayin, HAN Dan, et al. Study on application of hybrid intelligent reactive power compensation in low voltage area[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2016, 37(3): 1-4(in Chinese).
- [58] 马明, 郝毅, 雷二涛, 等. 采用净现值法的电能质量综合补偿装置不同控制策略下的经济性评估[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2018, 39(5): 123-128, 136.
- MA Ming, HAO Yi, LEI Ertao, et al. Economic evaluation of power quality comprehensive compensation device using net present value method under different control strategies[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2018, 39(5): 123-128, 136(in Chinese).
- [59] 鲁文军, 傅明, 张嘉辉, 等. 低压配变台区负荷及无功智能平衡实现方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(5): 124-131.
- LU Wenjun, FU Ming, ZHANG Jiahui, et al. Intelligent balance realization method for load and reactive power in low-voltage distribution area[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(5): 124-131(in Chinese).
- [60] SHAHNI A F, WOLFS P J, GHOSH A. Voltage unbalance reduction in low voltage feeders by dynamic switching of residential customers among three phases[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(3): 1318-1327.
- [61] 方恒福, 盛万兴, 王金丽, 等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(9): 2185-2193.
- FANG Hengfu, SHENG Wanxing, WANG Jinli, et al. Research on the method for real-time online control of three-phase unbalanced load in distribution area [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(9): 2185-2193(in Chinese).
- [62] 曹磊, 胡鹏飞, 王蕊. 基于无缝换相装置的三相负荷不平衡治理[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(4): 99-106.
- CAO Lei, HU Pengfei, WANG Rui. Research on three-phase load imbalance treatment based on the seamless commutation device[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(4): 99-106(in Chinese).
- [63] LIU Bin, MENG Ke, DONG Zhaoyang, et al. Unbalance mitigation via phase-switching device and static var compensator in low-voltage distribution network[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4856-4869.
- [64] 陆钟华. 配电台区三相不平衡治理技术研究[J]. *电力电子技术*, 2021, 55(9): 40-42.
- LU Zhonghua. Research on the three-phase unbalanced treatment technology in distribution area[J]. *Power Electronics*, 2021, 55(9): 40-42(in Chinese).
- [65] 成静红, 粟忠来. 配电台区电能质量问题的混合补偿的研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(2): 32-37, 52.
- CHENG Jinghong, SU Zhonglai. Research on hybrid compensation of power quality problem in distribution network[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(2): 32-37, 52(in Chinese).
- [66] ZERAATI M, GOLSHAN M E H, GUERRERO J M. Voltage quality improvement in low voltage distribution networks using reactive power capability of single-phase PV inverters[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 5057-5065.
- [67] WANG Shengyi, DU Liang, FAN Xiaoyuan, et al. Deep reinforcement scheduling of energy storage systems for real-time voltage regulation in unbalanced LV networks with high PV penetration [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(4): 2342-2352.
- [68] HAFEZI H, FARANDA R. Dynamic voltage conditioner: a new concept for smart low-voltage distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(9): 7582-7590.
- [69] 张天卫, 袁旭峰, 时豪, 等. 含扶贫式光伏农村配电网电能质量综合控制技术研究[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(22): 54-58, 66.
- ZHANG Tianwei, YUAN Xufeng, SHI Hao, et al. Research on power quality integrated control technology for rural distribution network with photovoltaic for poverty alleviation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(22): 54-58, 66(in Chinese).
- [70] ISLAM M, MITHULANANTHAN N, HOSSAIN M J.

- Dynamic voltage support by TL-PV systems to mitigate short-term voltage instability in residential DN[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4360-4370.
- [71] OLIVIER F, ARISTIDOU P, ERNST D, et al. Active management of low-voltage networks for mitigating overvoltages due to photovoltaic units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 926-936.
- [72] CIOCIA A, BOICEA V A, CHICCO G, et al. Voltage control in low-voltage grids using distributed photovoltaic converters and centralized devices[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 225-237.
- [73] WANG Lei, LIANG D H, CROSSLAND A F, et al. Coordination of multiple energy storage units in a low-voltage distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2906-2918.
- [74] ZERAATI M, GOLSHAN M E H, GUERRERO J M. Distributed control of battery energy storage systems for voltage regulation in distribution networks with high PV penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3582-3593.
- [75] XING Lantao, MISHRA Y, TIAN Yuchu, et al. Distributed voltage regulation for low-voltage and high-PV-penetration networks with battery energy storage systems subject to communication delay[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(1): 426-433.
- [76] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603(in Chinese).
- [77] 吕志鹏, 梁英, 曾正, 等. 应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4287-4294.
- LÜ Zhipeng, LIANG Ying, ZENG Zheng, et al. Virtual synchronous motor based control scheme of fast charger for electric vehicle application[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4287-4294(in Chinese).
- [78] 赵中田, 王泓钊, 李伟, 等. 低压直流微电网母线电压控制策略[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2018, 32(1): 69-74.
- ZHAO Zhongtian, WANG Hongzhao, LI Wei, et al. Bus voltage control strategy for low voltage DC microgrid[J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 32(1): 69-74(in Chinese).
- [79] 李振, 盛万兴, 段青, 等. 背靠背低压直流配电装备及其直流电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6873-6881.
- LI Zhen, SHENG Wanxing, DUAN Qing, et al. Back to back LVDC distribution equipment and DC voltage control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6873-6881(in Chinese).
- [80] 潘鹏鹏, 陈武, 侯凯, 等. 中低压直流配电系统的分散式统一控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 72-80.
- PAN Pengpeng, CHEN Wu, HOU Kai, et al. Decentralized unified control strategy for medium-and low-voltage DC power distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 72-80(in Chinese).
- [81] JUNG T H, GWON G H, KIM C H, et al. Voltage regulation method for voltage drop compensation and unbalance reduction in bipolar low-voltage DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 141-149.
- [82] 肖湘宁, 廖坤玉, 唐松浩, 等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 707-720.
- XIAO Xiangning, LIAO Kunyu, TANG Songhao, et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmonics issues[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 707-720(in Chinese).
- [83] 刘子腾, 徐永海, 陶顺. 新能源并网下谐波责任定量评估方法研究现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 203-212.
- LIU Ziteng, XU Yonghai, TAO Shun. Research status and prospect of harmonic responsibility quantitative evaluation method under grid-connection of new energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 203-212(in Chinese).
- [84] 孙可慧, 刘国鹏, 李少雄, 等. 基于实测数据的电动汽车充电站电能质量分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 74-88.
- SUN Kehui, LIU Guopeng, LI Shaoxiong, et al. Power quality analysis method of an electric vehicle charging station based on measured data[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 74-88(in Chinese).
- [85] 邹鹏辉, 张治, 张显立. 高渗透率分布式光伏系统谐波与电压控制[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 40-45.
- ZOU Penghui, ZHANG Zhi, ZHANG Xianli. Harmonic and voltage control of distributed photovoltaic system

- with high permeability[J]. *Smart Power*, 2020, 48(12): 40-45(in Chinese).
- [86] 张国祥, 严兴宇. 分布式光伏发电与 APF 协调统一控制策略[J]. *电力电子技术*, 2021, 55(11): 71-74.
ZHANG Guoxiang, YAN Xingyu. Distributed photovoltaic power generation and APF coordinated unified control strategy[J]. *Power Electronics*, 2021, 55(11): 71-74(in Chinese).
- [87] 翁利国, 朱铁铭, 寿挺, 等. 单相分布式发电接入台区电网的谐波补偿控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(19): 1-11.
WENG Liguang, ZHU Tieming, SHOU Ting, et al. A harmonic compensation control method for single-phase distributed generations integrated into low voltage power network[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(19): 1-11(in Chinese).
- [88] 王渝红, 叶葳, 宋瑞华, 等. 基于阻抗分析法的三相 LCL 型并网逆变器附加有源阻尼设计[J]. *高电压技术*, 2021, 47(8): 2645-2654.
WANG Yuhong, YE Wei, SONG Ruihua, et al. Design of additional active damping for three-phase LCL grid connected inverter based on impedance analysis method [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(8): 2645-2654(in Chinese).
- [89] 周乐明, 罗安, 陈燕东, 等. LCL 型并网逆变器的鲁棒并网电流反馈有源阻尼控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(10): 2742-2752.
ZHOU Leming, LUO An, CHEN Yandong, et al. A robust grid-current-feedback-active-damping method for LCL-type grid-connected inverters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(10): 2742-2752(in Chinese).
- [90] 陈东, 张军明, 钱照明. 带 LCL 滤波器的并网逆变器单电流反馈控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(9): 10-16.
CHEN Dong, ZHANG Junming, QIAN Zhaoming. Single current feedback control strategy for grid-connected inverters with LCL filters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(9): 10-16(in Chinese).
- [91] 林刚, 李勇, 王姿雅, 等. 低压直流配电系统谐振机理分析与有源抑制方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3358-3364.
LIN Gang, LI Yong, WANG Ziya, et al. Resonance mechanism analysis and its active damping suppression of LVDC distribution system[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3358-3364(in Chinese).
- [92] 彭克, 王琳, 李喜东, 等. 采用下垂控制的直流配电系统高频振荡分析及控制[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(17): 43-50.
PENG Ke, WANG Lin, LI Xidong, et al. Analysis and control of high-frequency oscillation for DC distribution system with droop control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(17): 43-50(in Chinese).
- [93] DENG Wei, PEI Wei, WU Qi, et al. Analysis of interactive behavior and stability of low-voltage multiterminal DC system under droop control modes[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(7): 6948-6959.
- [94] 张学, 裴玮, 邓卫, 等. 含恒功率负载的交直流混联配电网系统稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(19): 5572-5582.
ZHANG Xue, PEI Wei, DENG Wei, et al. Stability analysis of AC/DC hybrid distribution system with constant power loads[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(19): 5572-5582(in Chinese).
- [95] 李鲁阳, 裴玮, 孔力. 基于电压源型换流器的多端直流配电系统降阶小信号模型[J]. *电网技术*, 2019, 43(4): 1187-1195.
LI Luyang, PEI Wei, KONG Li. Reduced-order small signal model of voltage source converter based multi-terminal distribution network[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(4): 1187-1195(in Chinese).
- [96] 李海荣, 彭克, 陈羽, 等. 直流配电系统直流电压控制时间尺度的低频振荡机理分析[J]. *高电压技术*, 2021, 47(6): 2232-2239.
LI Hairong, PENG Ke, CHEN Yu, et al. Mechanism analysis of low frequency oscillation on DC voltage control time scale in DC distribution system[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(6): 2232-2239(in Chinese).
- [97] 张辉, 朱刘柱, 潘鹏鹏, 等. 直流配电系统阻抗判据与导纳判据的比较分析[J]. *电网技术*, 2021, 45(3): 1167-1174.
ZHANG Hui, ZHU Liuzhu, PAN Pengpeng, et al. Comparison between impedance-based criterion and admittance-based criterion for the DC distribution power system[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(3): 1167-1174(in Chinese).
- [98] 彭克, 陈佳佳, 徐丙垠, 等. 柔性直流配电系统稳定性及其控制关键问题[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(23): 90-98, 115.
PENG Ke, CHEN Jiajia, XU Bingyin, et al. Key issues of stability and control in flexible DC distribution system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(23): 90-98, 115(in Chinese).

- [99] 李鲁阳, 裴玮, 邓卫, 等. 改善直流配电网中 VSC 与线路交互失稳的有源阻尼策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2884-2894.
LI Luyang, PEI Wei, DENG Wei, et al. Active damping strategy for improving VSC and line interaction instability in DC distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2884-2894(in Chinese).
- [100] 李喜东, 彭克, 姚广增, 等. 基于 H^∞ 回路成形法的柔性直流配电系统鲁棒稳定控制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 77-85.
LI Xidong, PENG Ke, YAO Guangzeng, et al. Robust stability control of flexible DC distribution system based on H^∞ loop forming method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 77-85(in Chinese).
- [101] 韩杰祥, 张哲, 冉启胜, 等. 低压直流配电网主动限流控制及保护方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 182-190.
HAN Jiexiang, ZHANG Zhe, RAN Qisheng, et al. Active current-limiting control and protection scheme for low-voltage DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 182-190(in Chinese).
- [102] 刘鑫蕊, 谢志远, 孙秋野, 等. 低压双极性直流微网故障分析及保护方案[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 749-755.
LIU Xinrui, XIE Zhiyuan, SUN Qiuye, et al. Fault analysis and protection for LV bipolar DC microgrid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 749-755(in Chinese).
- [103] 吴鸣, 刘海涛, 陈文波, 等. 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(4): 891-899.
WU Ming, LIU Haitao, CHEN Wenbo, et al. Research on active protection for MV/LV DC distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 891-899(in Chinese).
- [104] 李露露, 雍静, 梁仕斌, 等. 民用低压直流供电系统保护综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 133-143.
LI Lulu, YONG Jing, LIANG Shibin, et al. A review of civil low voltage DC distribution system protection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 133-143(in Chinese).
- [105] 何俊佳, 袁召, 赵文婷, 等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.
HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15(in Chinese).
- [106] 葛国伟, 程显, 王华清, 等. 低压混合式直流断路器中真空电弧电流转移判据[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4038-4047.
GE Guowei, CHENG Xian, WANG Huaqing, et al. Investigation on the vacuum arc current commutation criteria of the low voltage DC hybrid circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4038-4047(in Chinese).
- [107] 朱童, 余占清, 曾嵘, 等. 全固态直流断路器在低压直流配电系统中的应用[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 50-56.
ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Application of all-solid-state circuit breaker in low-voltage DC distribution system[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 50-56(in Chinese).
- [108] 丁锐, 石新春. 碳化硅 MOSFET 用于 500V 低压直流断路器的可行性研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(14): 64-69.
DING Rui, SHI Xinchun. The silicon carbide MOSFET feasibility study for 500V low voltage DC circuit breaker [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(14): 64-69(in Chinese).
- [109] 班建, 高享想, 黄实, 等. 直流断路器电流开断试验技术与试验回路[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 167-172.
BAN Jian, GAO Xiangxiang, HUANG Shi, et al. Current breaking test technology and circuit of DC circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 167-172(in Chinese).



刘文龙

在线出版日期: 2022-12-14。

收稿日期: 2022-04-10。

作者简介:

刘文龙(1991), 男, 博士, 工程师, 研究方向为配电网电力电子技术、新能源并网与储能技术应用, liuwenlong@epri.sgcc.com.cn;

吕志鹏(1984), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为配电网电力电子技术, lvzhipeng@epri.sgcc.com.cn;

刘海涛(1978), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为直流配电技术、微电网技术, lhtcn@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 邱丽萍)