

## 中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望

王皓靖<sup>1</sup>, 郭佩乾<sup>2</sup>, 时珊珊<sup>1</sup>, 方 陈<sup>1</sup>, 袁志昌<sup>2</sup>

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海市 200437; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084)

**摘要:** 基于电力电子设备(PED)的柔性互联装置(FID)能够整合有功功率或无功功率的独立控制、无功功率动态补偿和故障隔离等功能,是实现多台区间潮流柔性互济、负载率均衡和新能源友好并网的有效手段。尽管FID应用潜力巨大,现阶段在其应用于不同场景的组网特性、运行特性、需求特性、典型功能模式等方面缺乏系统性总结与分析。首先,文中对国内外典型柔性互联工程的系统架构、电气参数与运行特点进行了梳理。然后,计及配电网多端柔性互联系统和含有重要交流负荷/新型直流负荷的交直流互联系统特点,归纳了相应的典型应用场景、互联网架形态、典型功能模式、组网方案和运行特性与技术需求。最后,结合中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与问题,对系统设计与应用方案、关键设备研发以及系统运行与控制保护多个方面的发展趋势进行了全面的讨论。

**关键词:** 配电网; 台区; 电力电子设备; 柔性互联; 新能源并网; 示范工程

### 0 引言

大多数配电网都采用“闭环设计、开环运行”的方式,利用联络开关将各分区形成手拉手或网状的配电网,实现分段控制和事故后负荷转供。然而,这种模式存在如下问题:1)由于负荷的快速增长和不平衡发展,如中国广州、深圳、北京和上海负荷中心城市中压配电网出现了配电走廊紧张、馈线负载率过高和分布不均衡的问题;2)配电网故障发生时,通常采用闭合联络开关进行负荷转供,一旦操作不当,可能会导致供电中断和合环冲击,扩大故障范围;3)新型敏感直流负荷的接入对供电可靠性提出更高的要求,而开环运行方式会导致非故障区域的短时停电,限制供电可靠性的提升。同时,政策层面对可再生能源和储能的应用推广使中压配电系统面临着潮流反转等复杂运行方式,开环运行潮流调控能力受到进一步限制。

基于电力电子设备(power electronic device, PED)的柔性互联装置(flexible interconnection device, FID)可以实现不同交流分区间的闭环互联。通过控制直流环节的潮流可以完成不同交流分区间的功率均衡,无须考虑频率同步问题。相比于配电网分段开关和联络开关,FID技术更易于实现故障

隔离,从而极大地提升配电网控制的灵活性与安全性。将FID技术用于中压馈线互联时,可在不增加短路容量的前提下,完成多交流配电馈线间的异步合环运行,起到潮流转供、负载率均衡、降低网损、故障隔离以及供电恢复等作用,实现馈线间多端合环运行与可调资源优化配置。

已对采用FID和类FID的互联配电系统开展了研究,其中包括智能软开关(soft open point, SOP)和软常开开关(soft normally open point, SNOP)等结构,本文均以FID表示。文献[1]提出了多端柔性软开关的概念,研究结论表明多端FID能够显著提升分布式发电量消纳水平。文献[2]基于非线性优化方法,在不同负荷和发电条件下,给出了FID运行参数的设计方案。文献[3]应用一种改进的Powell's direct set方法以优化FID运行方式,实现了馈线负荷平衡和网络损耗降低的效果。文献[4-5]对配电网柔性互联系统不同变换器功能与经济性开展分析,并给出了相匹配的应用场景。进一步地,文献[6]挖掘了FID在主动配电网(active distribution network, ADN)中的应用潜力,对大量存在的分布式电源所导致的实时电压和无功无法精确调节的问题展开了研究,提出基于FID-ADN协同电压无功控制方法。文献[7]综合考虑了ADN中分布式可再生能源的不确定性,对FID和储能系统提出基于日前调度和校正控制两阶段的功率平衡优化策略,有效降低系统内实时功率平衡所需运行成本。在工

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2023-11-03。

上网日期: 2024-05-08。

国网上海市电力公司科技项目(52094022004P)。

程方面,文献[8-9]结合中国广东省东莞市松山湖地区和北京市延庆地区配电网所面临的实际工程难题,对柔性互联的应用模式和方案进行系统性研究。文献[10]则对目前基于FID的配电网柔性互联的工程应用、网架形态以及相匹配的运行控制方式进行了总结。文献[11]对新型交直流互联系统的互联理念和关键技术方面进一步细化,并指出需对适用于不同应用场景的方案与技术开展研究。

综合来看,现阶段有不少对基于FID的柔性互联系统的研究,涵盖了互联系统网架形态、配电网重构运行优化、配置优化、协调控制方法等,且部分成果已开始应用。例如,英国 Angel-DC 工程和中国苏州市金鸡湖四端互联工程。然而,基于FID的中压配电多台区柔性互联系统应用的系统性分析仍然较为有限,涉及柔性互联系统典型应用场景的网架形态和需求特性匹配的相关技术和典型应用场景的总结仍存在不足。此外,结合最新的研究进展,对未来技术应用的展望也缺乏较全面的讨论。因此,有必要进行更为全面的专题研究,以推动该领域的深入发展。

本文以国内外采用FID技术的配电网柔性互联示范应用为切入点,对各工程的组网架构、电气参数、设备拓扑以及工程特点进行了全面的梳理。以此为基础,归纳出适合中压配电网多台区柔性互联的网架形态。随后,围绕不同应用场景特点与功能模式需求,对电源类型、“源-网-荷”特性、网架结构、电压等级、供电半径以及典型功能模式与技术需求等进行了分析与总结。最后,结合中压配电网柔性互联技术的研究现状、系统设计与应用方案、关键变换设备、运行控制方案和保护配置方案存在的问题,展望了该技术的研究方向和应用前景。

## 1 配电网 FID 与工作原理

中压 FID 由两个或两个以上电压源型变流器 (voltage source converter, VSC) 在直流侧相连接构成,图 1 为交流馈线  $i$  所连接的 FID-VSC 交流侧与配电网连接的基本结构。其中, FID-VSC 设备的选择取决于电压和容量需求,可采用两电平、三电平或者多电平的换流器结构,如图 1 所示的中性点钳位三电平 VSC (three-level neutral point clamped-voltage source converter, 3L NPC-VSC)、半桥模块化多电平换流器 (half bridge-modular multilevel converter, HB-MMC)、全桥模块化多电平换流器 (full bridge-modular multilevel converter, FB-MMC) 以及混合模块化多电平换流器 (hybrid-modular multilevel

converter, H-MMC)。图 1 中:  $U_{DC}$  为交流馈线  $i$  所连接的 FID-VSC 直流侧电压;  $R$  为换流器和滤波器的等效电阻,  $R$  较小, 通常可以忽略;  $L$  为换流器和滤波器的等效电感;  $E_{i,t}^{VSC}$  和  $U_{i,t}^{VSC}$  分别为  $t$  时刻并网节点电压和换流器出口调制电压;  $P_{i,t}^{VSC}$  和  $Q_{i,t}^{VSC}$  分别为换流器在  $t$  时刻与配电系统交换的有功功率和无功功率, 可通过式 (1) 计算得出。

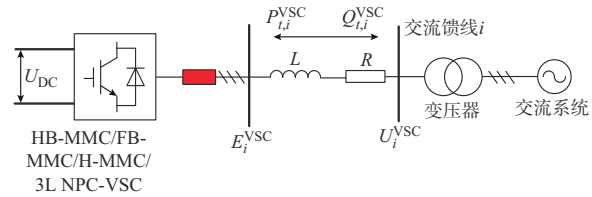


图 1 FID-VSC 与交流系统连接结构图

Fig. 1 Diagram of connection structure between FID-VSC and AC system

$$\begin{cases} P_{i,t}^{VSC} = \frac{U_{i,t}^{VSC} E_{i,t}^{VSC} \sin \delta}{X_L} \\ Q_{i,t}^{VSC} = \frac{U_{i,t}^{VSC} E_{i,t}^{VSC} \cos \delta - (U_{i,t}^{VSC})^2}{X_L} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\delta$  为相位角;  $X_L$  为换流器和滤波器的等效电抗。

结合图 1 和式 (1) 可知, 调节 PED 中 FID-VSC 的  $\delta$  和  $E_{i,t}^{VSC}$  参数值可以在有功功率-无功功率 ( $P$ - $Q$ ) 四象限内快速且独立地完成功率控制, 在自身容量范围内实现多台区互联系统间的功率互济和无功支撑。此外, 当互联系统中某一台区和馈线故障时, FID-VSC 控制可实现电流限幅, 以保护其他互联台区与站点免受影响, 并为故障区域提供电压和频率支撑<sup>[10]</sup>。

## 2 国内外中压配电网柔性互联工程示范应用

目前, 国内外已经建成多个柔性互联工程示范项目。对这些典型示范工程的网架结构、电压等级和容量、运行特点, 以及各自的应用场景进行分析和总结, 可以为多台区中压配电网柔性互联工程的建设与后续研究提供宝贵的实践经验和技术支持。

### 2.1 部分国外工程示范应用

#### 2.1.1 日本示范项目

2007 年, 日本 Demonstrative Project on Power Network Technology 示范项目以无变压器结构的背靠背两电平换流器为基础, 设计出回路平衡控制器 (loop balance controller, LBC), 连接两个配电系统的 6.6 kV 馈线, 完成了 6.6 kV/1 MV·A 的双台区柔性互联, 系统结构如附录 A 图 A1 所示。

LBC通过控制系统间的功率流动来维持直流链路电压的稳定,可实现如下功能:1)分布式电源的灵活接入;2)多台区交流馈线负荷平衡与柔性调节;3)在不改变现有系统(例如,原有保护系统和网架)的情况下,提供环形配电网组合;4)采用了无联结变压器的结构,有效节省了LBC的安装空间,减少了设备投资<sup>[12]</sup>。

### 2.1.2 英国 Network Equilibrium 示范项目

英国 Network Equilibrium 示范项目基于集成门极换流晶闸管(integrated gate-commutated thyristor, IGCT)研发了柔性电力互联(flexible power link, FPL)装置。该装置整体额定有功功率为 $\pm 20$  MW,无功功率为 $\pm 5$  Mvar,同时,装配有两个33 kV/3.25 kV/3.25 kV的联结变压器和两组交流滤波器。

该项目利用PED-FPL完成了两个配电系统互联,系统结构如附录A图A2所示。FPL具备有功功率和无功功率的动态传输和调节功能。同时,直流链路环节还能有效缓解因故障电流/电压和相角而造成的网络解环。此外,由于FPL的应用间接缩短了负载和电源之间的电气距离,可通过无功动态调节控制功能抑制系统电压波动,进而实现更大规模分布式电源集合接入互联配电网<sup>[13]</sup>。

### 2.1.3 英国 Angle-DC 示范项目

2020年,英国 Angel-DC 项目采用新型电力集成技术将33 kV交流互联配电网中架空线路两端各安装交流/直流换流站,以 $\pm 27$  kV中压直流(medium-voltage direct current, MVDC)链路并联运行,额定容量为30 MV·A,结构如附录A图A3所示。由于仍采用原有交流电缆,为保证系统的安全稳定运行,该工程将电缆最大运行电流从219 A降低到188 A,并将电缆运行的最高温度从65℃降低至50℃左右。项目验证了直流双回路并联运行模式的可行性,有效提升了供电可靠性<sup>[14]</sup>。

## 2.2 中国部分工程示范应用

### 2.2.1 中国苏州市金鸡湖四端柔性直流示范工程

2018年10月,中国江苏省苏州市金鸡湖20 kV四端柔性互联示范工程投运。工程构建了一个 $\pm 10$  kV直流系统和四端能源路由器,单端容量可达8 MV·A。直流侧通过直流负荷开关连接到直流母线,20 kV交流线路通过交流断路器连接到能源路由器,如附录A图A4所示。工程研发了适用于20 kV交流配电网的能源路由器,完成了能量和信息的互联互通。同时,采用主动管理和运行控制技术,实现了电源与负荷的就地平衡,提高了交流电网对多类型分布式能源的消纳能力<sup>[15]</sup>。

### 2.2.2 中国珠海市唐家湾城市能源互联电网示范工程

2018年12月,中国广东省珠海市的唐家湾投运了当时世界规模最大的多端交直流混合柔性配电网互联工程。工程包括1个直流微电网和3个柔性换流站(鸡山换流站1、鸡山换流站2和唐家换流站),如附录A图A5所示。互联系统的直流部分采用了多个电压等级( $\pm 10$  kV、 $\pm 375$  V和 $\pm 110$  V),总容量达到20 MV·A。该工程首次应用了 $\pm 10$  kV中压柔性直流换流阀,首创了三端口直流断路器并研发了当时世界上最大容量的 $\pm 10$  kV直流变压器,完成了配电网内各个节点电压和系统潮流的实时调控<sup>[16]</sup>。

### 2.2.3 中国佛山市三端交直流配电网柔性互联项目

2019年,中国广东省佛山市高明区配电站内引入基于多电平换流器技术的 $\pm 10$  kV/6 MV·A三端智能配电柔性多状态开关(flexible distribution switch, FDS),实现高明变电站和仙村变电站的柔性互联和馈线解耦(见附录A图A6)。FDS提高了馈线所连接分布式电源的消纳能力,并利用无功动态调节能力平滑轧钢等负荷启动和运行过程对交流系统电压产生的冲击。此外,该设备与馈线开关协调配合,自适应完成故障的快速清除与网架恢复,保证重要负荷和敏感负荷的不间断供电。值得注意的是,FDS实现上述功能时,无须改变原有交流馈线结构<sup>[17]</sup>。

### 2.2.4 中国北京市延庆柔性环网示范工程

2019年,中国北京市延庆10 kV柔性环网控制示范工程应用柔性环网控制装置实现了环网开环点的三端互联,同时,将中低压直流电源和负荷接入直流母线。与日本 Demonstrative Project on Power Network Technology 示范项目相同,柔性环网控制装置通过3个绝缘栅双极型晶体管-模块化多电平换流器(insulated gate bipolar transistor-modular multilevel converter, IGBT-MMC)互联构成,而交流侧不经变压器直接接入配电网,如附录A图A7所示。

该示范工程具备以下特点:1)对原有配电网进行升级改造,满足了柔性互联和高渗透率分布式电源接入下的能量传输需求;2)利用柔性互联装置建设了10 kV交直流混联开闭站,实现了开闭站内3段母线之间的潮流灵活控制和母线功率平衡,均分了3路馈线的负载率;3)完善了分布式电源和微电网的采集和调控手段,实现了分布式电源的友好接入和微电网群的运行优化调控<sup>[18]</sup>。

### 2.3 现有示范应用总结与分析

表1总结并分析了已建成的典型柔性互联配电

网示范工程的互联端数、交/直流电压等级、FID额定容量以及系统拓扑。

表1 已建成的柔性互联配电网示范工程  
Table 1 Constructed flexibly interconnected distribution network demonstration projects

项目名称	端数	系统所含交/直流电压等级	容量	拓扑与选型
日本 Demonstrative Project on Power Network Technology 示范项目	2	AC 6.6 kV, DC $\pm 13.2$ kV	1 MV·A	两电平 VSC, 无联结变压器结构
Flexible Urban Networks-Low Voltage 示范项目	2/3	AC 33 kV, DC $\pm 2.5$ kV	240 kV·A/ 400 kV·A	两电平 VSC
英国 Network Equilibrium 示范项目	2	AC 33 kV, DC $\pm 2.5$ kV	20 MV·A	IGCT HB/FB-MMC
英国 Angle-DC 示范项目	2	AC 33 kV, DC $\pm 27$ kV	30 MV·A	FB-MMC, 无联结变压器结构
中国苏州市金鸡湖四端柔性直流示范工程	4	AC 20 kV, DC $\pm 10$ kV	8 MV·A	HB-MMC
中国杭州市江东新城配电网示范工程 <sup>[19]</sup>	3	AC 20 kV, AC 10 kV, DC $\pm 10$ kV, DC $\pm 0.375$ kV	10 MV·A	HB-MMC, 无联结变压器结构
中国贵州大学中压五端柔性直流配电网示范工程 <sup>[20]</sup>	5	AC 10 kV, DC $\pm 10$ kV, DC $\pm 0.375$ kV	1 MV·A	HB-MMC
中国珠海市唐家湾城市能源互联网示范工程	3	AC 10 kV, DC $\pm 10$ kV, DC $\pm 0.375$ kV, DC $\pm 110$ V	20 MV·A	ICC-MMC
中国佛山市三端交直流配电网示范工程	3	AC 10 kV, DC $\pm 10$ kV	6 MV·A	HB/FB-MMC
中国北京市延庆柔性环网示范工程	3	AC 10 kV, DC $\pm 10$ kV	10 MV·A	HB-MMC, 无联结变压器结构

由表1可知,对于柔性互联配电网网架形态而言,国外早期示范项目以双端和点对点式互联架构为主,FID被作为互联开关来提升配电网供电能力,可视为对其可行性的验证。相比之下,中国起步较晚,但通过借鉴国外工程经验,成功衍生出了多电压等级和多端交直流互联系统,并涵盖了三至五端星形或环网的配电网柔性互联工程的示范应用。

在柔性互联系统的功能模式和工程建设方面,考虑不同应用场景功能需求时配置也会有所不同,以最大程度地满足特定需求。日本 Demonstrative Project on Power Network Technology 和英国 Flexible Urban Networks-Low Voltage 示范项目的目的是提升台区互联系统的供电可靠性。在中国,为满足工业园区对高可靠性供电和高电能质量的要求,建立了深圳市宝龙工业城和苏州工业园示范工程。而广东省珠海市的唐家湾城市能源互联网示范工程和浙江省杭州市江东新城示范工程用于实现能源转型和多能互联,贵州大学中压五端柔性直流配电网示范工程和北京市延庆柔性环网示范工程则用于解决新能源消纳、间歇出力和功率波动引起的电压波动、供电质量差等问题。浙江省海宁市的主动配电网工程通过不同电压等级线路进行柔性互联,提高了电能质量与供电可靠性。此外,为探索新型电力系统,福建省建成了台区共享储能型微电网系统示范工程,通过采用柔性直流互联技术和配套储能供电系统实现了分布式光伏约14.3%的弹性增容,

完成就地消纳。

对于柔性互联系统直流链路电压等级的选择,早期项目受限于交流系统与关键设备运行电压,导致直流链路电压等级较低。随着互联关键变换设备电压等级和容量的提升,2020年,英国 Angle-DC 交流配电网直流化改造工程的电压已达 $\pm 27$  kV,与33 kV的交流配电系统进行了连接。目前,对于MVDC链路电压选择已较为清晰,综合示范工程电压选择值、标准推荐值、内外部影响因素(电源和负荷构成、电压质量和供电可靠性、电气绝缘、网损、输送距离和容量、投资经济性与设备研发等)<sup>[19-22]</sup>以及便于与当地交流系统电压流畅对接的需求,中压柔性互联配电网的直流电压等级可采用的方案为:1) $\pm 50$  kV,便于与中压交流66 kV的电压等级衔接;2) $\pm 35$  kV,便于与中压交流35 kV和20 kV的电压等级衔接,便于风电场直流集中汇流送出;3) $\pm 10$  kV,便于与中压交流10 kV的电压等级衔接,便于光伏电站并联升压送出。

此外,关于FID中采用变换器的拓扑和选型,为满足更高电压等级和更大传输功率的需求,国内外均发展为多电平换流器。同时,国外部分示范项目采用了基于IGCT的换流设备,例如,英国 Network Equilibrium 示范项目。另外,对具备故障自清除能力的FB-MMC和IGCT交叉钳位模块化多电平换流器(IGCT cross-clamped-MMC, ICC-MMC)方案,国内外也进行了研究与应用。

可以看出,现阶段配电网柔性互联工程示范应用的功能各有侧重,在拓扑结构、运行模式、关键设备等方面表现出多种不同形态。梳理配电网柔性互联系统的典型应用场景和应用方案,总结典型功能模式与设施配置方案,并提出未来发展方向,对于该技术的推广与工程应用具有重要的参考意义。

### 3 中压配电网多台区柔性互联形态

#### 3.1 基于FID的背靠背柔性互联形态

对于中压等级馈线柔性互联,FID需完成多馈线间的合环运行,在更大范围内实现可调资源的优化配置、网络潮流功率灵活调节、潮流均衡,以及提高系统 $N-1$ 故障可靠性和负荷转供的能力。据此,在考虑不同地理环境与空间限制的基础上,中压配电网多台区配电系统的柔性互联形态可主要归纳为两类,如图2所示。

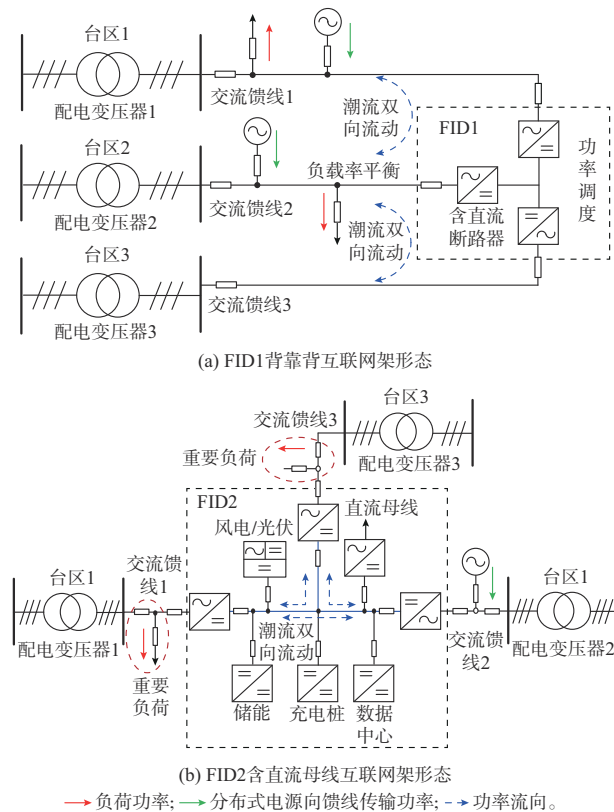


图2 中压配电网多台区柔性互联系统典型网架形态  
Fig. 2 Typical network configuration of flexibly interconnected system with multi-station areas in medium-voltage distribution networks

如图2(a)中FID1及其互联系统应用形态,采用两端或多端的背靠背式FID代替传统联络开关,互联馈线间距相对较短,能够对馈线末端或变电站间进行互联与柔性调节。

直接采用背靠背FID进行馈线或变电站间互联

的系统特点是可实现系统间功率的柔性控制与交换,在负荷转供与容量共享方面具有很强的灵活性,适合负载率和负荷用电时间等特性相差较大的系统。同时,由于FID具备无功调节功能,能够有效解决电压降落问题。日本 Demonstrative Project on Power Network Technology 示范项目、英国 Flexible Urban Networks-Low Voltage 示范项目、英国 Network Equilibrium 示范项目和佛山市交直流配电网示范工程等均采用了此类互联形态,是现阶段发展最为迅速的柔性互联形式。

#### 3.2 基于FID的直流母线柔性互联形态

第2类则在背靠背互联的基础上将其直流侧拓展为直流母线。这类形态不仅具备了上述第1类方案的优势,还能够实现更广泛区域系统的功率和电压调节。此外,图2(b)中FID2及其互联系统可接入直流负载和电源等子系统。

FID第2类互联形态具备供电容量大、损耗小、对更广泛区域进行潮流供给的优势,适合于存在功率传输需求但交流线路紧张的系统。通过调节互联系统间的功率,这种形态还能实现直流形式的“源-储-荷”融合调控,实现能源综合利用。在表1中,英国 Angle-DC 项目、中国苏州市金鸡湖四端柔性直流示范工程、中国杭州市江东新城配电网示范工程、中国北京市延庆柔性环网示范工程、中国贵州大学中压五端柔性直流配电工程以及中国珠海市唐家湾城市能源互联网示范工程均可归属于此类互联形态的应用。

### 4 中压配电网多台区柔性互联系统典型应用场景与功能模式

根据第3章所提不同配电网互联形态,结合交流系统运行特性的差异,以及各应用场景对高供电可靠性、负荷率平衡控制、分布式电源消纳和功率波动抑制等特定需求<sup>[23]</sup>,本章对中压配电网多台区柔性互联系统的典型功能模式、典型应用场景、配电电压等级序列、电力设施配置参数选择4个方面给予分析与说明。

#### 4.1 中压配电网多台区柔性互联系统典型功能模式

针对不同应用场合,各种柔性互联系统典型功能模式亦有所差异<sup>[24]</sup>,主要可归纳为以下几类。

##### 1) 馈线负载率均衡

根据要求需监测并控制交流馈线所连接FID-VSC的传输功率,进而实现各个馈线负载率均衡。馈线平均负载率 $L_{avg}$ 的计算如式(2)所示。

$$L_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{L,i}}{\sum_{i=1}^n P_{T,i}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中:  $n$  为柔性互联系统端数;  $P_{L,i}$  为交流馈线  $i$  接入的实时负荷值;  $P_{T,i}$  为交流馈线  $i$  的额定功率值。

为达到平均负载率的目的, 交流馈线  $i$  所连接的 FID-VSC 需要向交流馈线注入的有功功率指令值  $P_{\text{VSC},i}$  为:

$$P_{\text{VSC},i} = P_{L,i} - L_{\text{avg}} P_{T,i} \quad (3)$$

### 2) 多台区系统潮流转供

柔性互联系统的某一馈线退出运行时, 需调节其他交流配电台区的运行方式, 并修改各馈线所连接 FID-VSC 的功率参考值, 完成功率转带, 实现负载快速转供、敏感负荷不间断供电。

当交流馈线  $i$  退出运行时, 互联系统中未退出的交流馈线需增加的有功功率附加指令值  $\Delta P_{T,j}$  为:

$$\Delta P_{T,j} = \frac{P_{L,i}}{\sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} P_{T,j}} \quad (4)$$

对于交流馈线  $j$ , 为达到互联系统潮流转供的功能, FID-VSC 与交流馈线有功功率交互指令值为:

$$\begin{cases} P_{\text{VSC},j} = P_{\text{VSC},j}^{\text{ref}} + \Delta P_{T,j} \\ P_{\text{VSC},j} \leq P_{\text{VSC},j}^{\text{max}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{VSC},j}^{\text{ref}}$  为交流馈线  $j$  所连接 FID-VSC 的原有有功功率指令设定值;  $P_{\text{VSC},j}^{\text{max}}$  为交流馈线  $j$  与所连接 FID-VSC 有功功率交互的最大值。

### 3) 波动性电源功率均摊

通过检测波动性电源接入馈线功率值, 减去该馈线日常负荷值, 得出分布式电源的波动性功率值。将该波动性功率的低频分量值, 根据各馈线容量为权值分配到各个馈线, 并作为 FID-VSC 运行功率的参考值, 以减小分布式电源集中接入某一条馈线对互联配电系统正常运行的影响, 见式(6)~式(8)。

$$P_{\text{FR}}^{\text{LF}} = \sum_{i=1}^n L_{\text{F}}(P_{\text{FR},i}) = \sum_{i=1}^n L_{\text{F}}(P_{\text{TR},i} - P_{L,i}) \quad (6)$$

$$\Delta P_{\text{FR},i}^{\text{LF}} = \frac{P_{\text{FR}}^{\text{LF}} S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{FR}}^{\text{LF}}$  为波动性功率的低频分量值;  $L_{\text{F}}(\cdot)$  为取低频分量的函数;  $P_{\text{FR},i}$  为波动性电源接入交流馈线  $i$  的功率值;  $P_{\text{TR},i}$  为分布式电源的波动性功率值;  $\Delta P_{\text{FR},i}^{\text{LF}}$  为交流馈线  $i$  的有功功率附加指令值;  $S_i$  为交

流馈线  $i$  的额定承载容量。

为实现波动性电源功率均摊, 交流馈线  $i$  所连接 FID-VSC 再整定的有功功率指令值  $P_{\text{VSC},i}$  为:

$$\begin{cases} P_{\text{VSC},i} = P_{\text{VSC},i}^{\text{ref}} + \Delta P_{\text{FR},i}^{\text{LF}} \\ P_{\text{VSC},i} \leq P_{\text{VSC},i}^{\text{max}} \end{cases} \quad (8)$$

### 4) 高质量供电

对供电可靠性和供电质量有较高需求的交流负荷与新型直流负荷, 采用 FID-VSC 直流逆变的交流电源供电以及直流变压后直接供电的方式, 无谐波和电压跌落等问题。

### 5) 动态无功补偿

根据需要, 改变馈线所连接 FID-VSC 的无功功率指令值, 向变电站提供动态无功补偿功能。此外, 需要根据负荷侧无功功率变化情况, 动态调节馈线电压水平。根据所检测的馈线电压水平, 通过反馈控制来调节 FID-VSC 的无功功率指令值, 维持交流馈线电压。对于交流馈线  $i$  所连接的 FID-VSC, 实现动态无功补偿时需要满足如式(9)所示的条件。

$$Q_{\text{VSC},i} \leq Q_{\text{VSC},i}^{\text{max}} \quad (9)$$

式中:  $Q_{\text{VSC},i}$  为交流馈线  $i$  所连接 FID-VSC 的无功功率指令值;  $Q_{\text{VSC},i}^{\text{max}}$  为交流馈线  $i$  所连接 FID-VSC 无功功率交互的最大值。

## 4.2 中压配电网多台区柔性互联系统典型应用场景

### 4.2.1 多台区配电网分区互联场景

1) 场景分析: 应用场景中负荷相对较少, 且主要以各交流台区负荷为主多台区馈线间通过背靠背换流器完成不同配电网分区互联, 并实现各交流馈线间潮流互济和不同配电网分区互联要求。

2) 适用场合: 城市电网交直流改造。

3) 功能模式: (1) 馈线负载率均衡; (2) 多台区系统潮流转供; (3) 动态无功补偿。

4) 电源类型: 中压交流。

5) “源-网-荷”特性匹配需求: 传输容量大、传输线少、无相角差和电压等级匹配问题

6) 电网结构: 如图 2(a) 所示的 FID1 互联网架形态, 交流负荷由交流系统提供能量。

表 2 给出了互联应用场景下的系统和设备参数选型。主接线方案根据系统的运行需求以及资产投资综合考虑, 可选择对称单极或对称双极的结构(以下场景均相同); FID-VSC 则选择 HB-MMC 或三电平 IGCT-VSC 方案。

7) 可实现功能: 动态无功无偿, 节省常规台区智能电容器与静止无功发生器 (static var generator,

表2 配电网多台区场景中FID-VSC的主要设备参数

Table 2 Main device parameters of FID-VSC in scenario of distribution network with multiple substations

电压等级	容量/MW	供电半径/km	换流站电压等级/kV	电缆类型	电缆截面积/mm <sup>2</sup>
AC 66 kV/DC±50 kV	35~50	150	66	66 kV 换流站;50 kV 电力电缆导线	240或300
AC 35 kV/DC±35 kV	20~35	100	35	35 kV 换流站;35 kV 电力电缆导线	240
AC 10 kV/DC±10 kV	7~10	35	10	10 kV 换流站;10 kV 交联聚乙烯-绝缘铜芯电缆	240

SVG)等无功补偿设备;互联系统各台区变电站互为“热备用”,消除区域间的负荷分布不均衡,防止个别变电站达到负载率上限而其他相邻变电站仍处于低负载率的情形,提高各台区变电站的平均负载率;缓解季节性负荷波动造成的单台变压器增容需求,减少一次设备投资和变压器总损耗。

#### 4.2.2 部分可再生能源接入场景的直流负荷集中区

1)场景分析:新型配电网系统内包含以城轨牵引交通系统、数据中心、大型电动汽车充电站、发光二极管(light emitting diode, LED)照明、各类型PED为主的直流负荷。另外,区域内包含部分分布式可再生能源和储能设施。

2)适用场合:直流负载集中区域、新型城市负荷中心或新型直流建筑综合体<sup>[25]</sup>。

3)功能模式:(1)馈线负载率均衡;(2)多台区系统潮流转供;(3)波动性电源功率均摊;(4)高质量供电;(5)动态无功补偿。

4)电源类型:中压交流、MVDC、分布式电源。

5)“源-网-荷”特性匹配需求:传输容量较大、可靠性高、传输线少、改造成本低。

6)电网结构:如图2(b)所示的FID2互联网架形态,直流负荷和部分直流线路所接交流负荷由直流母线来提供能量,交流负荷主要由交流系统提供能量且交流电源应取自不同变电站中压出线或者同一变电站不同母线,具体如表3所示。

表3 直流负荷集中区中FID-VSC的主要设备参数

Table 3 Main device parameters of FID-VSC in areas with concentrated DC loads

电压等级	容量/MW	供电半径/km	换流站电压等级/kV	电缆类型	电缆截面积/mm <sup>2</sup>
AC 35 kV/DC ±35 kV	20~35	100	66	35 kV 换流站;35 kV 电力电缆导线	240或300
AC 35 kV/DC ±10 kV	20~35	35~100	35	35 kV 换流站;10 kV 交联聚乙烯-绝缘铜芯电缆	240
AC 10 kV/DC ±10 kV	7~10	35	10	10 kV 换流站;10 kV 交联聚乙烯-绝缘铜芯电缆	240

7)可实现功能:通过集中式交直流变换器可实现直流负荷集中式并网,减少多个负载端交直交变换器的投资;直流侧设备接入方式简单,易实现即插即用;通过多端柔性互联方式可满足台区负荷的高可靠供电需求。此外,通过双向变换器的优化调度与控制调节,可以实现直流侧充电桩集群、可中断负荷、可控负荷以及储能参与峰谷电价调节的功能,提升系统的经济效益。

#### 4.2.3 部分直流负荷接入场景的交流负荷集中区

1)场景分析:工业园新区是中压柔性互联非常好的应用场景,其对供电容量、供电可靠性和电能质量的需求高。主要交流类型负荷包含交直流变频电机、轧机、电解炉、敏感器件设备(例如电子精密仪器等)、电弧炉、大型空调换风系统、电梯等中压负荷。另外,存在数据中心等新型负荷,也包含直流充电桩、分布式可再生能源和储能等直流设施。

2)适用场合:工业园新区。

3)功能模式:(1)馈线负载率均衡;(2)多台区系统潮流转供;(3)波动性电源功率均摊;(4)高质量供电;(5)动态无功补偿。

4)电源类型:中压交流、MVDC、分布式电源。

5)“源-网-荷”特性匹配需求:传输容量大、可靠性高、传输线少、无相角差问题、改造成本低。

6)电网结构:如图2(b)所示的FID2互联网架形态,直流负荷和部分直流线路所接交流负荷由直流母线来提供能量,交流负荷主要由交流系统提供能量,且交流电源应取自不同变电站的中压馈线或者同一变电站不同母线,具体如表4所示。

7)可实现功能:互联系统中的直流系统在同样的配电线路走廊可传输更多的电能,保障大型企业的供电可靠性和电能质量;系统中各类型能源和储能设备可在系统出现故障时通过FID实现互联交流分区间潮流互济,快速提供备用容量,满足重要负荷运行需求。

表4 交流负荷集中区中FID-VSC的主要设备参数  
Table 4 Main device parameters of FID-VSC in areas with concentrated AC loads

电压等级	容量/MW	供电半径/km	换流站电压等级/kV	换流站与电力电缆导线选型	电缆截面积/mm <sup>2</sup>
AC 66 kV/DC±50 kV	35~50	150	66	66 kV 换流站;50 kV 电力电缆导线	240 或 300
AC 35 kV/DC±35 kV	20~35	100	35	35 kV 换流站;35 kV 电力电缆导线	240
AC 35 kV/DC±10 kV	20~35	35~100	10	35 kV 换流站;10 kV 交联聚乙烯-绝缘铜芯电缆	240
AC 10 kV/DC±10 kV	7~10	35		10 kV 换流站;10 kV 交联聚乙烯-绝缘铜芯电缆	240

#### 4.3 中压配电网多台区柔性互联系统技术应用对比

综上所述,现有典型示范项目与工程应用所对应的系统互联形态、应用场景、适用场合以及主要功能模式的对比如附录B表B1所示。

#### 5 中压配电网多台区柔性互联技术展望

多台区柔性互联配电系统虽调控潜力巨大,但面对复杂交直流组网架构、多电力电子设备接入、多种复杂运行工况和多类型应用场景特性,在系统设计方案、关键设备研发、协调控制以及控制保护与恢复等方面都面临着新的挑战和技术需求。

首先,现阶段柔性互联工程建设与改造的成本偏高是限制其应用的主要原因。在规划设计阶段,考虑各类应用场景、实际地理环境和典型运行工况等多维因素的情况下,实现中压配电网柔性互联的精准需求建设变得尤为关键。

其次,现有示范工程的控制功能与特性相对单一,应用场景的普适性受限。采用多端柔性互联系统架构可以增加系统功能,但也会导致运行模式的复杂化。多系统间的互联、互济应考虑各类应用场景、运行工况、故障时运行模式切换的需求,以及交流系统运行特性等因素。因此,系统运行协调控制与保护配置方案的选择至关重要。

最后,关键变换设备是制约中压配电网多台区柔性互联系统电压等级与传输容量的重要因素。已有的示范工程装置存在造价高、占地面积大、可靠性受限等问题,在确保经济性和可靠性的基础上,研究适应高电压等级和大容量传输需求的开关器件与设备拓扑方案是必要的方向。

综上所述,为推进中压配电网多台区柔性互联技术的发展与推广应用,亟须在以下5个方面展开深入研究。

1)建立和健全中压配电网柔性互联技术的规范和标准体系。基于VSC的直流柔性互联技术在拓扑结构、运行机理、设计方法、控制特性、保护原理等方面均与传统交流配电网有较大区别,从柔性互联

设备的技术标准到柔性互联系统的设计和运行规范等领域尚属空白,亟须建立和健全。

2)提出适应中压配电网各类典型场景的柔性互联系统通用化设计方法。考虑多台区配电网柔性互联系统建设所面临的实际问题,结合各应用场景、实际地理环境、接入设备、典型运行工况等需求,提出系统组网架构、直流电压等级选择、设备容量优化配置的通用化设计方法,支撑柔性互联配电网有效化、流程化和精细化的建设方案设计。

3)研制低成本、紧凑化、高可靠的柔性互联关键装备。配电网应用对设备的体积和占地面积提出了更高的要求,如何实现高可靠、高功率密度的柔性互联和功率变换是重要的研究方向。

在常用的模块化多电平换流器内,通过半桥子模块和全桥子模块的组合(见附录A图A8),可以充分利用子模块的负电平输出能力,提高直流电压利用率,降低换流阀损耗(增加15%的负电平可减小阀容值和换流阀损耗约20%)。此外,该方案可实现直流侧故障清除且不需要额外的直流限流器<sup>[25]</sup>和直流断路器<sup>[26-27]</sup>,从而有效降低整体投资水平。目前,研究人员在多电平换流器的电容电压波动抑制技术、纹波运行控制技术以及三次谐波注入等方面开展了深入研究,实现了更大范围的电压调节能力,有望进一步减小直流侧电容需求和设备体积。

此外,采用新型电力电子器件的设备研发也在同步进行。耐高压IGCT的研发与迭代使得变换器在同等电压等级和容量下有望降低投资和占地空间。国内研究团队基于国产化IGCT-Plus(4.5 kV/6.5 kV)已研发出10~20 MW三电平直串技术的交直流变换器(IGCT-Plus-based three-level VSC)与大容量直流变压器(IGCT-high-power dc transformer, IGCT-HDCT)(见附录A图A9和图A10)<sup>[21,28-29]</sup>,设备成本和体积可降低30%~60%,支撑了自主化中压配电网柔性互联设备的研发和规模化应用。然而,目前采用IGCT的设备仍在传统拓扑方案的基础上进行扩展和改进。对于这类设备,是否存在更加契合的新型拓扑方案,以进一步发挥



IGCT在冗余特性、故障特性、通态损耗、功率密度与效率特性等方面的优势,减小设备体积与投资规模,是值得深入研究的问题。

未来,中压配电网会向高可靠性、高韧性方向发展,将涌现出多端互联的新结构形态,这对关键变换设备的端口数、电压等级、电能存储能力等方面提出了新要求<sup>[30]</sup>。对于多端口直流变压器而言,宽禁带器件可工作在更高的开关频率下,实现功率密度和效率的大幅提升。然而,目前采用宽禁带器件(例如氮化镓)的多端口直流变压器还存在设备容量相对较小的问题,且设备控制的鲁棒性有待提高。因此,为实现在中压配电网的应用,基于宽禁带器件的变换器功率拓展、基于软开关的高精度宽范围调节方法等问题值得深入研究。

4)研究柔性互联系统与交流配电网的交互作用机理,提出完善的控制保护技术体系。FID的应用虽为中压配电网多台区系统互联供电提供了潜在机遇,但也引发了交流配电系统网络架构的深刻变革,加剧了系统运行工况和设备联调的复杂性。FID接入系统导致潮流和故障特征发生了改变,使得原有的交流保护策略准确性和灵敏性的降低。因此,计及故障期间FID的主动调节能力、FID本身故障的演变机理以及不同故障类型影响与传播范围的特性,研究适用于柔性互联系统的新型控制保护整定方案亟待开展,以实现精准故障定位、故障隔离以及快速自愈。

5)由于具备类同步机的惯性和阻尼特性,构网型备受关注,并不断演化与发展,已应用于储能和风力发电场合<sup>[31-32]</sup>。将构网型控制策略与FID深度融合,有望在强度弱、物理惯性低的配电网系统中提供更好的致稳能力<sup>[33]</sup>。综合考虑构网型控制策略在配电系统故障时的电压动态调节特性和冲击电流发展行为特征,开发相匹配的衍生控制与保护策略可有效提升FID对配电网的灵活支撑能力。

## 6 结语

采用FID的柔性互联应用形态是未来中压配电网经济、灵活、高可靠发展的有效途径之一。对现有工程特点和优势的总结与探索对未来柔性互联系统的发展与建设具有重要的借鉴作用。

本文通过对国内外柔性互联示范工程的深入分析,总结出了基于FID的背靠背柔性互联、直流母线柔性互联以及混合分散式柔性互联应用形态。结合不同互联应用形态,开展了适用于多台区交直流配电网分区互联、新型直流负荷集中区、新型直流建筑综合体和工业园区的典型应用场合,进行了场景需

求匹配特性、功能模式、电压等级序列、主要电力设备配置、供电半径与可实现功能等多维度描述。在此基础上,展望了未来中压配电网多台区柔性互联技术发展和应用需要重点突破的标准建设、设计方法、关键装备、控制保护等若干关键技术。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

- [1] BLOEMINK J M, GREEN T C. Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 911-919.
- [2] LONG C, WU J Z, THOMAS L, et al. Optimal operation of soft open points in medium voltage electrical distribution networks with distributed generation[J]. Applied Energy, 2016, 184: 427-437.
- [3] CAO W Y, WU J Z, JENKINS N, et al. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 165: 36-47.
- [4] 周剑桥,张建文,施刚,等.应用于配电网柔性互联的变换器拓扑[J].中国电机工程学报,2019,39(1):277-288.  
ZHOU Jianqiao, ZHANG Jianwen, SHI Gang, et al. Exploration on power converter topologies applied in flexible interconnection of distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 277-288.
- [5] 韩俊,袁栋,谢珍建,等.交直流配电网典型形态特征对比与应用模式[J].电力建设,2020,41(3):93-99.  
HAN Jun, YUAN Dong, XIE Zhenjian, et al. Comparison of typical configuration characteristics and application mode of AC/DC hybrid distribution network[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(3): 93-99.
- [6] LI P, JI H R, WANG C S, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1430-1442.
- [7] WANG C, SUN J J, HUANG M, et al. Two-stage optimization for active distribution systems based on operating ranges of soft open points and energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(1): 66-79.
- [8] 魏志文,罗煜,曾远方,等.中压配电网柔性互联示范工程技术方案设计[J].电力建设,2022,43(3):1-11.  
WEI Zhiwen, LUO Yu, ZENG Yuanfang, et al. Technical scheme design of an MVAC distribution network project for demonstration with MVDC-flexible interconnection [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 1-11.
- [9] 余潇潇,张璞,张凯.柔性直流背靠背装置在北京配电网中的应用[J].电力建设,2016,37(5):132-137.  
YU Xiaoxiao, ZHANG Pu, ZHANG Kai. Application of VSC-HVDC back-to-back device in Beijing distribution network [J].

- Electric Power Construction, 2016, 37(5): 132-137.
- [10] 祁琪, 姜齐荣, 许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4664-4676.  
 QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664-4676.
- [11] 唐巍, 张起铭, 张璐, 等. 新型配电系统多层级交直流互联理念、关键技术与发展方向[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 2-17.  
 TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 2-17.
- [12] OKADA N, TAKASAKI M, SAKAI H, et al. Development of a 6.6 kV-1 MV·A transformerless loop balance controller [C]// 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, USA.
- [13] Western Power Distribution. Network equilibrium [EB/OL]. [2023-04-19]. <https://www.westernpower.co.uk/projects/network-equilibrium>.
- [14] SP Energy Networks. Angle-DC [EB/OL]. [2023-04-19]. [https://www.spenergynetworks.co.uk/pages/angle\\_dc.aspx](https://www.spenergynetworks.co.uk/pages/angle_dc.aspx).
- [15] 黄强, 陈亮, 袁晓冬, 等. 多端直流配电系统工程仿真分析及示范应用[J]. 供用电, 2018, 35(6): 24-32.  
 HUANG Qiang, CHEN Liang, YUAN Xiaodong, et al. Multi-terminal DC distribution system engineering simulation analysis and demonstration application [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 24-32.
- [16] 郑建平, 陈建福, 刘尧, 等. 基于柔性直流配电网的城市能源互联网[J]. 南方电网技术, 2021, 15(1): 25-32.  
 ZHENG Jianping, CHEN Jianfu, LIU Yao, et al. Urban energy Internet based on flexible DC distribution network [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(1): 25-32.
- [17] 范心明, 孙广慧, 彭元泉, 等. 智能配电柔性多状态开关在主动配电网中的应用[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 40-48.  
 FAN Xinming, SUN Guanghui, PENG Yuanquan, et al. Application of flexible distribution switch in active distribution network [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 40-48.
- [18] 尹昌新, 朱洁, 蒋迅, 等. 多端柔性闭环中压配电网示范工程[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(2): 66-73.  
 YIN Changxin, ZHU Jie, JIANG Xun, et al. Demonstration project of multi-terminal flexible closed-loop medium-voltage distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(2): 66-73.
- [19] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1-14.  
 WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14.
- [20] 徐玉韬, 谈竹奎, 郭力, 等. 贵州电网柔性直流配电系统设计方案[J]. 供用电, 2018, 35(1): 34-39.  
 XU Yutao, TAN Zhukui, GUO Li, et al. Design scheme of flexible DC power distribution system in Guizhou power grid [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 34-39.
- [21] 曾嵘, 赵宇明, 赵彪, 等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6791-6801.  
 ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6791-6801.
- [22] 胡鹏飞, 朱乃璇, 江道灼, 等. 柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 2-12.  
 HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 2-12.
- [23] 国家电网有限公司. 中压配电网设计指导原则: Q/GDW 11722—2017 [S/OL]. [2023-04-19]. <http://www.bzmfz.com/biaozhun/Soft/DLDBZ/287946.html>.  
 State Grid Corporation of China. Guidelines for the design of medium voltage distribution networks: Q/GDW 11722—2017 [S/OL]. [2023-04-19]. <http://www.bzmfz.com/biaozhun/Soft/DLDBZ/287946.html>.
- [24] 袁志昌, 魏应冬, 刘文华, 等. 基于柔性直流的不间断电力交换器[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2914-2921.  
 YUAN Zhichang, WEI Yingdong, LIU Wenhua, et al. Uninterrupted power hub based on VSC-HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2914-2921.
- [25] 赵宇明, 郭佩乾, 袁志昌, 等. 建筑直流配用电系统运行控制策略与示范应用[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 63-72.  
 ZHAO Yuming, GUO Peiqian, YUAN Zhichang, et al. Operation control strategy and demonstration application of DC building distribution and utilization system [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 63-72.
- [26] 郭佩乾, 袁志昌, 宋萌, 等. 160 kV 1 kA 电阻型超导直流限流器设计与应用[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3221-3231.  
 GUO Peiqian, YUAN Zhichang, SONG Meng, et al. Design and application of 160 kV 1 kA resistive type superconducting DC current limiter [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3221-3231.
- [27] 袁志昌, 郭佩乾, 刘国伟, 等. 新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1460-1475.  
 YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1460-1475.
- [28] 赵彪, 安峰, 宋强, 等. 双有源桥式直流变压器发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 288-298.  
 ZHAO Biao, AN Feng, SONG Qiang, et al. Development and application of DC transformer based on dual-active-bridge [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 288-298.
- [29] 赵彪, 崔彬, 马已青, 等. 基于IGCT-Plus和中频隔离的大容量直流变压器[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 1114-1123.  
 ZHAO Biao, CUI Bin, MA Yiqing, et al. High-power DC transformer based on IGCT-plus and medium-frequency isolation [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 1114-1123.
- [30] 张国驹, 裴玮, 杨鹏, 等. 中压配电网柔性互联设备的电路拓扑与控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 18-29.  
 ZHANG Guojun, PEI Wei, YANG Peng, et al. Review on

circuit topology and control technology of flexible interconnection devices for medium-voltage distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 18-29.

- [31] 秦世耀,齐琛,李少林,等.电压源型构网风电机组研究现状与展望[J].中国电机工程学报,2023,43(4):1314-1334.

QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1334.

- [32] 曹伟,钦焕乘,陆建忠,等.新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J].电力系统自动化,2023,47(4):190-207.

CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.

- [33] 刘朋印,谢小荣,李原,等.构网型控制改善跟网型变流器次/超同步振荡稳定性的机理和特性分析[J/OL].电网技术[2023-08-03].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0620>.

LIU Pengyin, XIE Xiaorong, LI Yuan, et al. Mechanism and characteristics of grid-forming control for improving sub/super synchronous oscillation stability of grid-following-based grid-connected converter [J]. Power System Technology [2023-08-03]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0620>.

王皓靖(1987—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向:智能电网、分布式能源、储能与电动汽车技术。E-mail: haojingw@126.com

郭佩乾(1991—),男,通信作者,硕士,助理研究员,英国皇家特许工程师,主要研究方向:柔性直流输电系统、电力电子技术、FACTS、储能与新能源并网技术。E-mail: guopeiqian@tsinghua.edu.cn

时珊珊(1985—),女,博士,高级工程师,主要研究方向:韧性电网、储能技术、电动汽车技术与新能源发电技术。E-mail: sss3397@163.com

(编辑 杨松迎)

## Application Status and Prospects of Flexible Interconnection Technology for Multi-station areas in Medium-voltage Distribution Network

WANG Haojing<sup>1</sup>, GUO Peiqian<sup>2</sup>, SHI Shanshan<sup>1</sup>, FANG Chen<sup>1</sup>, YUAN Zhichang<sup>2</sup>

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The flexible interconnection device (FID) founded on the power electronic device (PED) integrates functionalities such as active/reactive power independent control, dynamic compensation for reactive power, and fault isolation. It serves as an efficacious resolution for the flexible interconnection power flow among multi-station areas, load rate balancing, and the friendly integration of renewable resources. Despite significant application potential of FIDs, there is a lack of systematic summarization and analysis of its application in different scenarios in terms of networking characteristics, operational characteristics, demand characteristics, and typical functional modes. Firstly, this paper reviews the system architectures, electrical parameters, and operation characteristics of typical flexible interconnection projects in China and other countries. Then, considering characteristics of multi-terminal flexible interconnection in distribution networks and AC/DC interconnected systems with important AC loads/new types of DC loads, this paper offers matched information on typical application scenarios, interconnection network topologies, typical functional modes, electrical network configurations, operation characteristics, and technological requirements. Finally, by integrating the current application status and challenges of flexible interconnection technology in medium-voltage distribution networks, this paper conducts a comprehensive discussion on the development trends of various aspects, including system design and application strategies, key equipment development, and operation control and protection of the system.

This work is supported by State Grid Shanghai Electric Power Company (No. 52094022004P).

**Key words:** distribution network; station area; power electronic device; flexible interconnection; renewable integration; demonstration project

