

配电系统智能软开关技术及应用

王成山¹, 季 节¹, 冀浩然¹, 于 浩¹, 吴建中², 李 鹏¹

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072; 2. 卡迪夫大学工程学院, 卡迪夫 CF24 3AA, 英国)

摘要: 配电网柔性化是统筹配电系统中各类源荷可调度资源,提升系统整体运行水平的有效解决方案。智能软开关(SOP)是实现柔性配电网的核心装置,近年来已广泛开展SOP运行控制的相关研究并取得了丰富成果。从配电网的柔性化发展态势入手,梳理了SOP及其衍生的柔性互联理念在多场景下的技术形态与应用形式。在此基础上,针对以SOP为核心的柔性配电网在运行优化、故障自愈、配置规划等不同阶段的关键技术问题,对当前主要的技术方向和研究进展进行了阐述,并对未来SOP的发展方向进行了展望,为SOP技术研究与应用为进一步拓展和深化提供了思路。

关键词: 智能软开关; 柔性配电网; 形态发展; 运行优化; 规划

0 引言

随着电气与信息技术的不断进步,在国家政策与日益完善的市场机制激励下,配电网进入快速发展阶段。分布式电源的接入比例不断提升,电能替代在社会生产、居民生活、电气化交通等领域被广泛推进,配电网所涵盖的技术要素、所面临的技术需求更为丰富,由此带来了诸多挑战^[1]。面向未来配电网发展需求,如何利用电气装备与运行调控等技术的创新,使系统能够有效承载清洁能源的接入与消纳、提供用户侧差异化电力服务,以及满足配电网与社会生产生活多领域的协调互动,成为当前面临的重要课题。

电力电子装备的广泛应用是柔性配电网的重要特征之一^[2],新型电力电子装置将以各种不同的形式存在于配电网中,并能够通过电能的灵活变换与控制,使源荷行为更加“柔性”和“主动”,从而释放各种源荷新要素的运行调度潜力,共同支撑配电网运行目标的实现^[3]。例如,借助新型电力电子拓扑和控制策略,分布式光伏能够在并网发电的同时参与系统的无功电压控制^[4];各种源荷可组成微电网等形式,以整体可控形态参与配电网运行^[5];在高级量测和信息通信技术的支撑下,分散负荷也能够利用虚拟电厂等组织形式,通过需求响应支撑电网运行;对电动汽车充电站、数据中心等新型负荷,还能

够利用自身的能量管理能力获得节能和支撑电网运行优化的双重收益。

源荷侧设备的柔性化丰富了配电网的运行调度资源,但由于其空间分布的不均衡性和传统配电网的结构与技术约束,其调节效用往往限于局部而难以有效传导至整个系统。如何高效、协同地利用柔性资源成为亟待解决的难题^[6]。智能软开关(soft open point, SOP)技术即在这一背景下提出,其基本结构由大功率全控型电力电子元件组成的背靠背型交-直-交变流器构成,通常SOP各端变流器结构完全对称^[7]。SOP是一种取代传统常开联络开关(normally open point, NOP)的新型电力电子装置,可实现配电系统的柔性闭环运行^[8]。随着SOP应用价值的不断发掘,其“常开”特性逐渐弱化,在名称上也演化为“智能软开关”或“柔性多状态开关”^[9],以凸显其对系统智能运行的支撑作用和多种运行状态灵活切换等特征。SOP能实现馈线层面的实时、精细功率控制^[10],进而在更大的空间尺度下统筹各种柔性源荷资源,调节和优化系统层面的潮流分布^[11]。近年来,围绕配电网SOP的配置规划、运行优化、控制保护等问题已开展了大量研究工作,实现了基于SOP的分布式电源消纳提升、电压无功支撑、运行损耗降低、线路负载平衡、不确定环境下鲁棒运行、自愈能力提升等多元化运行支撑,并在一批实际工程中得到应用,取得了良好的示范效果。

随着SOP研究的不断深入,SOP装置本身及其柔性互联思想在配电网中的应用场景也逐渐得到扩展。但由于SOP的成本较高,必须更充分地发掘其技术潜能,探索SOP与配电网供给侧、需求侧、市场

收稿日期: 2021-05-14; 修回日期: 2021-10-28。

上网日期: 2021-12-21。

国家自然科学基金联合基金资助项目(U1866207); 国家自然科学基金资助项目(52007131)。

机制等新技术和新体系的融合机制,提高其综合收益以使柔性互联装置在投资建设上现实、可行。这些技术形式虽然应用场景各有不同,但共同遵循了柔性互联的核心思想,在控制方式、调控能力、运行策略等方面具有共性特征,在技术方法上具有相互借鉴的价值。因此,从SOP相关基础研究出发,系统性归纳基于SOP的柔性配电网规划与运行技术发展路径和研究进展,对解决各种柔性互联场景的共性技术问题,以及开展柔性配电网整体的运行规划等,都具有重要意义。

本文首先对SOP技术理念发展以及SOP衍生出的多场景柔性互联技术特征与应用进行了归纳;在此基础上,针对以SOP为核心的柔性配电网在运行优化、故障自愈、配置规划等不同阶段的技术问题,对当前主要的研究方向和研究进展进行了综述,并对未来SOP技术发展方向与应用方向进行了展望,希望能够为SOP技术研究与应用的进一步拓展和深化提供思路与借鉴。

1 SOP多场景柔性互联应用形态

配电网中,SOP互联应用从最初的双端馈线柔性互联场景衍生出多端柔性互联、跨电压等级柔性互联、交直流混合互联、柔性变电站等多种技术形态,如图1所示,可满足配电网多种柔性互联需求^[3]。基于SOP的柔性配电技术不断成熟,极大地促进了配电网的柔性互联形态演化,本章重点阐述了应用于不同柔性互联场景的SOP形态。

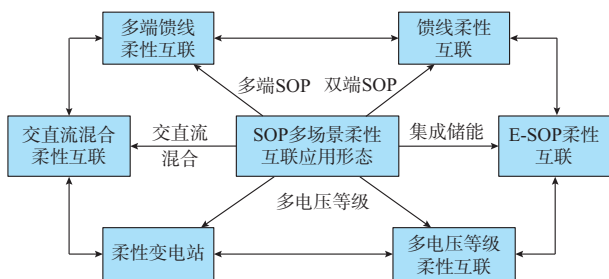


图1 配电网SOP柔性互联多场景应用

Fig. 1 Flexible interconnected multi-scenario application of SOP in distribution networks

1.1 双端馈线柔性互联

SOP的核心理念是代替传统联络开关以实现馈线间柔性电气互联,支撑馈线负载平衡和分布式电源高效消纳等。图2所示的背靠背电压源型换流器(back-to-back voltage source converter, B2B VSC)拓扑是SOP的一种典型实现结构,其两侧换流器为对称形式,可实现有功功率传输、无功功率实时控制和四象限灵活运行。SOP通过不同控制模

式切换,以满足正常状态下的功率控制、外部故障状态的电压支撑等多场景应用需求。

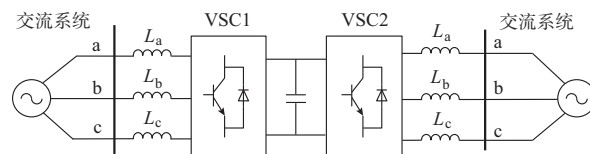


图2 双端SOP的背靠背VSC拓扑结构

Fig. 2 Back-to-back VSC topology of two-terminal SOP

如何研发更紧凑、高效的装置结构,实现快速、准确、灵活的控制响应是SOP技术长期面临的基础性问题。从拓扑实现来看,面向中压配电网的SOP结构可采用升压变压器与两电平变流器、模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)^[12]及其衍生形式等^[13-14]。但不同拓扑的稳态运行约束条件^[15]、故障特性^[16-17]等存在一定的差异。因此,针对具体场景需求,考虑SOP技术性能、装备体积与投资成本等多因素影响,制定SOP拓扑设计方案成为一个复杂的优化问题^[18]。

从运行控制来看,SOP控制目标的实现需两侧换流器共同完成,具体包括直流侧电压的控制、SOP传输有功功率控制,以及两侧换流器发出的无功功率控制等。文献[8]中给出了SOP在正常和故障场景下的典型控制策略。近年来,围绕如何提升直流侧电压抗干扰能力^[19]、提高功率控制响应速度和鲁棒性^[20]、正常-故障多场景控制策略无缝切换^[21]等问题也取得了一些成果,为SOP运行功能的实现和应用形式的拓展奠定了基础。

在工程应用方面,2007年日本电网技术示范工程中投用了容量为1 MV·A、电压等级为6.6 kV的双端环网功率平衡器(loop balance controller, LBC)^[22],虽未明确提出SOP的概念,但在利用潮流改善电压质量与均衡负荷分布等方面已具有了柔性互联思想的雏形;2015年英国FUN-LV示范工程中建造了容量为240 kV·A的双端SOP^[23],起到了良好的示范作用。

1.2 多端馈线柔性互联

随着配电网供电可靠性要求的不断提高,传统的放射形网络结构正在发生变化,N供一备、多分段多联络等接线模式开始得到推广应用^[22,24]。为了以更为经济的方式满足多端馈线柔性互联需求,在双端SOP结构基础之上进一步衍生出了端口数量可灵活配置的多端SOP装置^[25]。

多端SOP将多个AC/DC换流器的直流侧并联于公共母线,交流侧分别连接不同馈线^[26],如图3所示。与双端SOP相比,多端SOP在经济性、可靠性

等方面都更具优势,原因在于:1)采用公共直流母线减少了变流器数量,降低了设备占地、投资与损耗;2)可采用高度模块化装置结构,能够灵活适应不同数量的馈线连接需求;3)与多条馈线连接,由多变流器组成协同运行模式,增强了SOP在馈线负载平衡等应用中的调控能力^[27];4)通过合理的变流器容量配置和馈线联络设计,发生故障时多条馈线灵活切换、互为备用,具有更高的供电可靠性^[28]。

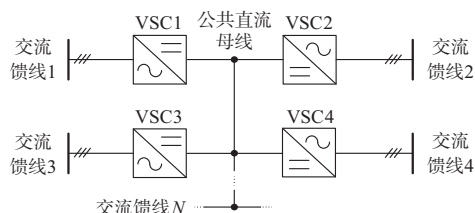


图3 多端SOP拓扑结构
Fig. 3 Topology of multi-terminal SOP

在工程应用方面,与双端SOP相比,多端SOP能够提供的接口数量更多、适用场景更广、综合收益更高、示范意义更强,因此成为目前国内外工程示范中普遍采用的SOP形式。例如,2015年英国在FUN-LV示范工程中进一步建造了400 kV·A容量的三端SOP,并于2020年在ANGLE-DC项目中投运了容量为16 MV·A的四端SOP,SOP内部直流电压为 ± 27 kV,外部可接入33 kV交流电网^[23];在中国天津北辰柔性互联配电网示范工程中,配置了各端换流器容量均为6 MV·A的四端SOP,构成以2个110 kV变电站为中心的柔性双环网架构,通过与居民负荷用电互补提高了线路负荷均衡度^[29]。在中国北京延庆地区智能电网创新示范区中,采用三端SOP作为柔性环网控制装置,使2个10 kV单环网柔性闭环运行,解决了设备利用率低、供电可靠性和供电能力提升受限等问题^[30]。

1.3 交直流混合柔性互联

直流配电已成为配电技术发展的一个重要方向^[31]。为满足交直流混联配电网中的馈线柔性互联需求,可将SOP的换流器形式加以拓展,采用AC/DC换流器与DC/DC换流器组合的形式,各换流器一端并联至公共直流母线,另一端则对应连接交流或直流馈线,使其同时具备交流和直流馈线接入和功率交换的能力,如图4所示。采用上述结构的SOP可灵活交换交直流混联配电网的馈线功率,有助于降低网损、优化电压水平等运行状态,改善系统运行状态^[32]。

基于SOP进行交直流混联的另一思路是利用SOP的内部直流母线实现直流储能、分布式电源、

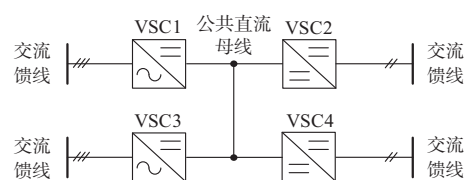


图4 交直流混合柔性互联SOP拓扑结构
Fig. 4 Topology of AC/DC hybrid flexible interconnected SOP

新型负荷等装置接入,如图5所示。例如,将储能装置和SOP进行一体化集成,可形成兼具时间与空间调度能力的智能储能软开关(SOP with ESS integration, E-SOP),与常规SOP相比能更好地应对高渗透率分布式电源的出力波动,在经济性、可持续性等方面都具有优势^[33]。SOP内部直流母线也可开放为配电网的对外直流接口,从而更好地支撑光伏、风机等直流分布式电源和充电负荷的接入;同时,通过SOP端口控制策略和分布式电源与储能控制策略的协调设计,可提高系统稳定性、满足分布式电源即插即用、交直流负载不间断供电等需求^[34]。

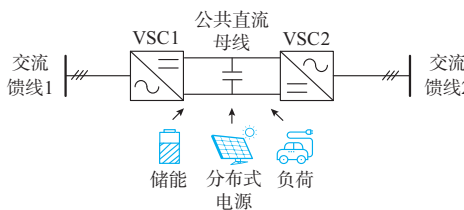


图5 基于SOP直流母线接入的直流源荷储
Fig. 5 Distributed generators, loads and energy storage systems integrated via DC-bus of SOP

交直流混合柔性互联的技术理念在很多工程示范中得到了实践。由于现有的直流配电线路较少,交直流混合柔性互联在现阶段需求有限,因此,大多数的交直流混合柔性互联工程都采用了开放SOP直流母线接口的形式。例如,在中国贵州电网柔性直流配电示范工程中^[35],由4个容量为1 MV·A的AC/DC MMC及1个直流变压器构成3条10 kV交流馈线、0.4 kV低压交流微电网、0.375 kV低压直流微电网之间的柔性互联。实现了交直流负荷和分布式电源、储能装置的灵活接入,可支持交流和直流微电网子系统间、各交流馈线间的功率控制,同时实现了系统经济运行和优化调度,以及系统故障情况下的运行模式切换以提供相互支撑。

1.4 多电压等级柔性互联与柔性变电站

多电压等级柔性互联可应用于馈线间联络,通过对不同电压等级的SOP换流器进行拓扑设计、在SOP内部直流环节增加电压变换模块以及在SOP交流端增加变压器^[13],使其能够连接不同电压等级

馈线并控制互联馈线间的功率流动,实现多电压等级馈线间功率的相互支撑^[36]。多电压等级柔性互联也可应用于独立供电场景,作为柔性变电站连接上下级配电网,发挥电压变换和电能灵活分配的作用^[37]。2种场景下的柔性互联装置在结构实现上具有一定的相似性,均可以在B2B VSC的基础上增加电压变换环节,如图6所示。

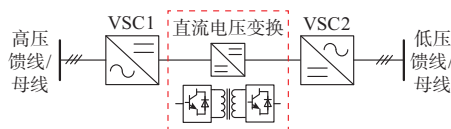


图6 多电压等级柔性互联结构

Fig. 6 Flexible interconnected structure with multiple voltage levels

相比较而言,多电压等级柔性互联装备的成本更高,故大多以柔性变电站形式出现,以期更充分地发挥其运行控制价值。从基本结构来看,柔性变电站的内部直流部分加设了以高频变压器为核心的电压变换模块,以实现可控的直流电压变换;外部交流端连接对应电压等级的馈线^[38-39],形式较为紧凑。当配电网正常运行时,可提供电压变换、功率分配、无功补偿、谐波抑制等功能,以满足系统的潮流优化、电压控制、电能质量治理、定制化供电等需求^[40];当配电系统故障时可限制短路电流、实现故障隔离、提供电压支撑等^[41]。此外,柔性变电站还可集成前文所述的交直流混合柔性互联功能,为配电侧源荷提供更多元化的入网选择。

工程应用方面,在中国杭州江东新城智能柔性直流配电网示范工程中^[42],采用了三端B2B MMC结构的SOP实现2个交流10 kV和1个交流20 kV供电区域的柔性连接,解决了该地区多电压混供互联存在的电压差和相角差问题,提高了供电区域的互济能力;在中国张北交直流配电网及柔性变电站示范工程中^[43],以10 kV柔性变电站为核心,实现了10 kV交流、±10 kV直流、750 V直流、380 V交流4个电压等级的双向输入输出,提高了区域清洁能源和交直流负荷灵活接入、源网荷协调互动的能力。

2 含SOP配电网运行控制架构

当前,SOP等柔性互联装置主要通过配电网主站能量管理系统进行集中式调度。但未来源储荷侧将大量接入如分布式电源、储能、电动汽车、数据中心等多类型新型设备,运行需求更为灵活多变。集中式的能量管理系统在通信架构、计算能力、信息安全等方面将面临沉重负担。

本章主要阐述含SOP配电网控制架构方面的研究进展与发展趋势,重点是在集中式控制策略的基础上,设计并采用分层分布式控制架构,在系统控制效果的最优性与计算负担之间寻找最佳的平衡。例如,基于部分就地信息优化的系统运行策略,可能在保证具有近似集中式控制效果的同时,减小通信与计算规模,如图7所示。

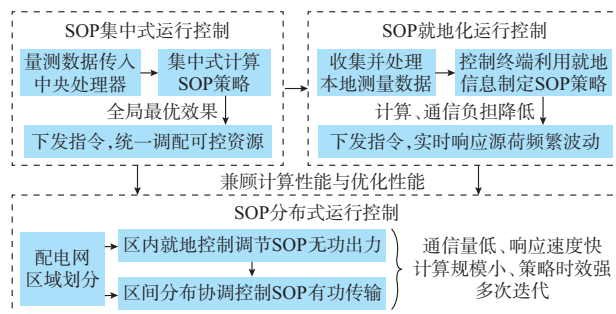


图7 SOP运行控制实现

Fig. 7 Implementation of SOP operation control

2.1 SOP集中式运行控制

在集中式运行控制架构下,SOP及各种柔性互联装置的二次系统将集中接入配电网调度主站,由主站中央控制系统经过复杂的优化计算,对系统中各SOP的有功功率传输和两端无功功率输出进行调整,以调节系统潮流分布和改善电压质量,实现系统经济安全运行。

集中式控制以系统全局最优为目标,统一调配可控资源,但面临以下挑战:1)所有量测数据都要传输至主站,一旦中央控制系统出现故障,整个运行控制体系就会瓦解;2)主站在接收到全网数据并完成大规模优化计算后方可得到SOP控制策略,对数据存储、计算资源的需求较高,对源荷波动的快速响应能力不足;3)随着配电网规模的增大和调控资源的丰富,数据量也将呈爆发式增长,对信息通信系统的承载能力和可靠性要求大幅提高。

目前,受传统配电网运行管理模式的影响,大部分SOP工程实践都沿用了集中式运行控制模式。但随着配电网的不断发展,对系统全局进行集中信息采集、处理、分析和控制的难度增加,发展更加高效的SOP运行控制新架构成为一种可能的方向。

2.2 SOP分布式运行控制

与集中式控制相比,分布式控制架构具有通信量低、计算规模小、策略时效性强、响应速度快等优势^[44]。同时,在分布式架构下对就地控制和集中控制方式进行协调,能够在一定程度上弥补单独采用集中或就地控制模式的不足。

SOP分布式控制需要对配电系统进行控制区

域划分,通过相邻区域间交互边界信息,兼顾控制快速性与全局协调能力,提高系统整体的优化效果^[45]。例如,文献[46]利用灵敏度分析量化SOP对系统节点电压的影响范围,将大规模配电网划分为若干个子区域,利用SOP实现配电网柔性互联和运行优化;文献[47]提出一种虚拟微电网区域划分方法,利用系统的电气关联强度指标实现了对微电网虚拟边界的自动划分与优化,其中以SOP为可控边界组建虚拟分区,是未来SOP的一种可能应用场景;文献[48]基于灵敏度分析进行分区后,利用各分区内就地信息制定SOP运行策略,再通过区间协调计算SOP有功功率传输值,实现近似全局优化。

但分布式控制过程经多次信息交互与算法迭代达到收敛,因而需要优化各区域间的交互机制以降低通信与计算资源需求^[49]。未来,还需继续深化对分布式控制迭代时间的代价评估,确保分布式控制在设备控制时间尺度内完成策略的制定与下发。

2.3 SOP就地化运行控制

相比于集中式与分布式控制,就地控制方式仅基于局部信息,由SOP控制终端就地分析制定策略,需要的通信量更小,可快速响应分布式电源和负荷的频繁波动^[50]。现有的就地控制策略主要基于局部量测电压和量测功率整定就地控制曲线,用于实时调节SOP等可控设备的无功补偿或有功出力,但其控制性能高度依赖于曲线参数的调整,且整定过程较为复杂。

此外对于SOP等柔性互联装置,根据不同控制目标和可用调控资源的特点,将就地控制与分布式、集中式控制架构混合应用。各区域SOP控制器通过交互关键信息,制定区域间交互策略,保证SOP在具有近似于集中式控制效果的同时减小通信与计算规模,往往比只采用就地控制更加有效。例如,考虑SOP有功和无功功率相对解耦,可在区内采用无功-电压就地控制曲线,根据本地信息对SOP无功出力策略进行就地整定,增强不确定运行环境下SOP电压控制的鲁棒性;对有功功率传输既可以采用集中式控制^[51],也可以采用分布式控制,以在减小系统通信量的同时保证控制策略的有效性^[11]。

3 含SOP的配电网运行优化

支撑配电网运行优化是SOP的核心功能之一,为高效发挥SOP的柔性可控能力,需要实现SOP与多类型设备的多时间尺度协同调度,并进一步利用大数据、人工智能等先进技术,配合大规模高级量测设备,挖掘配电系统海量多元异构数据价值,降低SOP控制策略制定中对实际物理模型的高度依赖,

提高SOP策略的准确性与适应性。本章主要从基于SOP的多手段多目标协同优化、不确定性要素处理,以及数据驱动的SOP自适应运行优化方面展开阐述。

3.1 基于SOP的多手段协同运行优化

配电网中既包含有载调压变压器、补偿电容器等传统控制手段,又包含分布式电源、储能装置、电动汽车等新型调度资源。通过SOP对多种差异化运行控制手段进行有效协调,成为充分发挥SOP运行价值的关键。例如,针对SOP与网络重构的协调问题,文献[52]将SOP的主动精细潮流调节与基于传统开关的网络重构方法相结合,在保证系统安全运行前提下有效提高了分布式电源的消纳水平;文献[53]对比了SOP和网络重构作用下的分布式电源消纳能力,表明将二者结合能够更有效地提升消纳水平。

SOP的无功出力能够与传统电压和无功调节设备在快、慢时间尺度上相互配合,实现电压无功控制。例如,文献[54]将SOP的运行优化问题拓展为与有载调压变压器、补偿电容器组等在多时间尺度下协调配合的电压无功时序优化问题;文献[55]采用预动作表确定离散的无功调节设备动作时刻,并根据SOP的功率储备动态调整预动作表,调节无功出力。

SOP还能够与可控分布式电源、储能等设备相互配合,发挥负载均衡、潮流优化、电压控制等作用。例如,文献[10]提出基于SOP单相功率控制特性的三相不平衡运行优化策略,在缓解三相电压、电流不平衡的同时,有效减小了系统损耗;同时可配合储能设备进行时序优化调度,针对分布式电源的出力波动对SOP三相出力进行连续调节;文献[56-57]研究了分属于不同利益主体的多端SOP与微电网日前-日内协调优化方法,利用博弈确定日前有功出力,通过微电网无功余量减小电压偏差,日内对多端SOP采用电压-有功和电压-无功双下垂控制,与微电网联合优化下垂斜率,降低了网损和系统电压偏差。

在求解算法方面,含SOP的配电网运行优化问题模型一般具有大规模、混合整数、非凸非线性规划特征。对此,可通过半正定规划、二阶锥规划、凸差规划等数学方法进行转化^[58-60],利用各种成熟工具包进行高效求解;也可采用蚁群算法、粒子群算法等启发式算法在可行空间搜索获取最优解。

3.2 计及不确定性的SOP运行优化

配电网运行中,分布式电源的出力波动与负荷需求的不确定性会削弱SOP运行策略的有效性。

这一问题可从进一步精细化运行调度周期以及更准确地描述不确定性要素2个方面来加以解决,从而提升运行策略的鲁棒性。

在相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)等先进量测技术的支持下,配电网状态感知的精细度和实时性大幅提升,在日内运行中能够利用更小尺度的运行数据对日前确定的SOP控制策略进行修正。例如,文献[61]在日前阶段确定网络重构方案后,在日内阶段利用短时间尺度预测数据对SOP出力进行闭环滚动优化,以减小分布式电源出力不确定性的影响;在实时控制阶段,还可以基于极短时间尺度预测数据评估系统风险,控制SOP和换流器出力以改善电压分布。文献[62]利用长短期多时间尺度协调,对SOP出力进行鲁棒优化,以提升三相不对称配电系统的运行安全性。

SOP运行优化问题中的不确定性建模方面,主要包括基于不确定集合的鲁棒优化建模方法^[63]、基于典型场景的概率分析描述法^[64]、利用置信水平限制不满足约束情况的机会约束法^[65],以及随机优化建模方法^[66]等。例如,文献[64]提出一种结合随机优化与鲁棒优化优点的SOP分布鲁棒优化调度模型,基于历史数据评估不确定性源荷出力的概率分布范围,计算有源配电网灵活性指标,在最劣场景下决策SOP出力,以平衡策略的优化水平与鲁棒性。

3.3 面向复杂场景的SOP多目标优化

在SOP实际运行中,往往需要经济性、安全性等多方面目标的协调,而不同优化目标间存在互相制约的可能。目前,针对SOP的多目标运行优化问题也开展了一些研究。

将多目标线性加权求和转化为单目标优化问题,是SOP多目标运行优化中常用的方法,但存在权重系数设置主观性过强的问题。为减小主观性影响,文献[67]采用权重分析法确定权重系数,同时明确了不同优化目标的起效范围;文献[68]提出一种网络损耗与电压优化权重自适应的SOP时序优化方法,结合电气距离及源荷出力相关性分析节点电压越限风险,根据节点电压越限的风险差异自适应调整电压优化目标的权重。

另一种思路是基于帕累托前沿对多目标同时进行优化,尤其适用于解决清洁性、可靠性等目标函数存在冲突制约时的优化问题,具体计算多采用智能算法搜索可行空间中的非劣解。例如,文献[69]采用强度帕累托进化算法计算网络重构和柔性多状态开关出力的帕累托最优解集,并通过隶属度函数选择最终的运行方案;文献[70]将多目标粒子群算法和局部搜索算法相结合,提高了求解效率和准确性。

3.4 数据驱动的SOP自适应运行优化

当前针对SOP的就地式、分布式控制框架研究,尽管可在保证具有近似全局集中式优化效果的同时减小通信与计算规模,但需掌握配电网拓扑参数,且高度依赖于精确的物理机理模型。

在先进量测、通信技术及人工智能相关成果的支持下,未来的配电系统将具备大量可用量测数据。挖掘配电系统海量多元异构数据价值,基于量测数据分析建立数据模型替代传统物理模型,降低SOP控制策略制定中对实际物理模型的高度依赖,是SOP技术应用的未来发展方向之一。

目前,已有研究考虑数据驱动的SOP自适应控制策略,初步结果表明,通过建立数据驱动的SOP无模型自适应优化控制策略,能够有效发挥SOP的快速响应能力。例如,文献[71]提出一种在分布式电源和网络拓扑结构未知情况下,基于灵敏度分析调整SOP出力实现电压优化的方法,由SOP施加功率扰动得到SOP外部端口所接入节点的电压-功率灵敏度系数,根据电压偏差反馈结果调整SOP出力。在此基础上,利用数据驱动方法建立无模型自适应控制的SOP优化控制策略,SOP无须反馈直接自适应调整出力,能够进一步发挥SOP的快速响应能力^[72]。

基于数据驱动实现SOP的优化调度,能够有效提升SOP的控制效果和自趋优能力。此外,研究在不同的运行场景下,将传统优化控制策略与基于数据驱动的优化策略相互配合,对提高配电网在复杂场景下的运行水平至关重要。

4 含SOP的配电网故障自愈

高度灵活可控的SOP与保护装置协同可以实现快速故障恢复,是配电网故障时快速故障隔离与供电恢复的关键设备^[73]。为充分发掘SOP的自愈控制支撑能力,需考虑SOP多端口间、多SOP间的配合,以及SOP与保护装置间的多步供电恢复操作协同。根据SOP端口连接馈线的电源情况及其自身运行方式等,制定供电恢复策略,合理切换运行模式。本章主要从基于SOP的配电网供电恢复机制及供电恢复策略方面展开阐述。

4.1 基于SOP的配电网供电恢复机制

基于全控型电力电子装置的SOP在系统故障下能快速闭锁,响应速度快于传统机械开关动作。故障发生后,SOP可迅速实现各端互联馈线间的电气隔离,防止失电范围扩大。

在供电恢复能力上,SOP可替代联络开关单独进行故障恢复,但SOP接入系统的位置与容量限制

了其供电恢复的有效作用范围。另外,由于SOP基本结构多由B2B VSC在直流侧相连组成,接地点既可以选取在换流器直流侧,也可以选择换流器交流侧^[74];馈线不对称故障下,零序与负序分量导致SOP流入电流不对称,可致使SOP内换流器桥臂过流、直流电压基频共模波动等问题^[75];系统发生故障时若接地电流过大,可导致设备损坏。由于当前SOP应用仍处于示范阶段,对SOP接地故障特性分析以及SOP与保护装置的协调方法研究较少。文献[74]考虑不同接地方式,提出一种可识别与隔离故障端的换流器交流侧接地故障保护方案;文献[75]分析了柔性互联装置的控制保护策略,并对柔性互联装置引起系统连锁故障进行了风险评估;文献[76]提出了一种基于SOP的主动故障定位方法;文献[77]利用SOP附加三相对称低频电压,设计了一种主动式故障区段定位方法,为解决谐振接地配电网单相接地的故障定位困难问题提供了新思路。SOP接地故障可能严重影响系统运行可靠性,SOP合理接地方式及与继电保护装置的协调保护方案仍有待深入研究。

在基于SOP的配电网供电恢复机制设计中,需关注以下方面:

1)对于B2B VSC型SOP,必须分析合理接地方式,并实现SOP与保护装置的整定值有效配合,避免影响系统安全运行;

2)SOP控制模式的切换需要与保护装置的动作次序配合,以确保故障经保护动作隔离后,系统正常运行区域不间断供电,失电区域获得电压支撑;

3)当SOP同时连接失电区域和未失电区域时,SOP可以对故障侧一端进行供电恢复,并对重要负荷进行快速供电恢复^[78];

4)若SOP不具备功率存储能力,则对故障侧的潮流转供能力有限,难以完全恢复失电负荷,应量化分析SOP转供能力,确定供电恢复范围^[79]。

针对上述问题,文献[80]提出一种兼顾评估速度与精度的可靠性评估方法,量化分析表明,SOP接于系统末端、靠近重要负荷以及接入容量较大时对系统可靠性的提升最大;文献[81]提出一种兼顾故障馈线失电负荷恢复与正常馈线电压安全的多端SOP快速在线负荷转供策略,采用多端SOP对多条馈线进行柔性互联,先利用正常馈线上节点电压与SOP端口输出的灵敏度系数约束SOP在供电恢复中的功率分配,再根据负荷重要等级优化负荷切除量,在保证供电质量的同时实现了故障端负荷全部恢复供电;文献[82]以系统故障后的总供电负荷最大化为目标,建立了SOP配置的鲁棒优化模型,通

过优化SOP的安装位置、容量与出力,使其能够对非故障的失电区域进行不间断供电,以缩短系统供电恢复时间,最大化地提升配电系统自愈能力;文献[83]建立了基于多阶段弹性力学映射的配电网模型,分析和探讨了SOP安装位置和容量对配电网弹性的影响;文献[84]提出采用SOP与常规开关并联的混合结构,在系统发生故障时通过联络开关进行负荷转供,由SOP提供辅助支撑,可降低故障场景下对SOP的容量需求。

4.2 基于SOP的配电网供电恢复策略

基于SOP的配电网故障隔离与恢复流程可概括为:在故障发生时SOP快速闭锁,而后配电网保护装置进行故障定位和隔离,形成失电区域;SOP连接失电区域一端的运行模式切换为电压-频率控制,SOP在维持自身稳定运行的同时为失电区域提供电压与频率支撑,根据所连馈线情况迅速转移功率,进行供电恢复。

供电恢复策略的制定需遵循上述基本流程,此外SOP可与多种设备协同运行,以提升故障隔离与供电恢复效果。例如,文献[74,82]将SOP与基于传统开关设备的网络重构相结合,在最大化恢复失电负荷的同时,减小了开关动作次数,延长了设备寿命;文献[85]提出一种考虑SOP、分布式电源和储能协同的孤岛运行优化策略,在孤岛运行中协调SOP、分布式电源和储能控制策略,以扩大供电恢复范围,并确保供电恢复的持续性与鲁棒性;文献[86]提出一种多SOP协同的有源配电网故障自愈方法,并为实际运行建立了SOP故障策略集;文献[87]针对新能源出力及负荷需求不确定性,进一步面向不对称配电网提出一种多端SOP与传统开关协同的数据驱动供电恢复方法,提高了对不确定性的应对水平。

当前,基于SOP的供电恢复策略多是直接给出SOP、开关等设备的最终运行状态,而SOP与多种设备的多时间尺度运行特性会影响配电网供电恢复期间的负荷并网状态与系统安全运行状态^[88]。因此,未来有待开展基于SOP的多阶段协同供电恢复策略研究。

5 含SOP的配电网配置规划

通过SOP的多端功率精细控制能力,可满足配电网多主体间的端对端电能交易与共享经济等新场景对传输功率高度可控的硬性需求,具有广阔的应用前景。但由于SOP建设成本较高,且接入数量与配电系统运行水平提升程度间具有边际递减效应,故合理规划配置SOP,确定最佳的接入位置、容量

和数量组合,成为SOP技术应用中亟待解决的问题。本章主要从含SOP的配电网规划场景生成、运行策略对SOP规划的影响方面展开阐述。

5.1 SOP规划问题的多场景生成

SOP通过提高配电网的运行灵活性来有效应对各种不确定性扰动。因此,其优化规划中必须首先对配电网中的不确定因素进行准确描述,包括分布式电源的空间分布和出力规律、配电网运行调控机制、用户侧用电特征及交易机制等。与此同时,SOP的应用价值体现在正常场景下的运行状态优化、故障场景下的供电恢复等多个方面,对SOP进行配置规划必须全面考虑其在不同场景下的综合价值,计及SOP柔性互联的综合技术效益。

针对SOP规划的场景设置问题,文献[89]根据资产绩效评估理论,从电网安全、经济效益、性能效用3个方面评估SOP对配电网的影响。其中性能指标包括SOP对配电网运行性能的提升作用,如可靠性提高、电压质量改善和分布式电源消纳能力提升等;经济效益考虑成本减小和收益增加2个部分,包括建设成本、网损减少和延缓升级改造收益等;文献[90]构建了计及配电网正常、故障运行效益的双层规划模型,正常运行层考虑SOP的潮流调节作用对系统的优化作用,故障运行层基于序贯蒙特卡洛模拟可靠性评估方法计算故障成本。

针对SOP规划场景中的不确定性要素,现有研究多采用不确定性建模或场景生成法对其进行描述。例如,文献[91-92]根据风、光历史数据得到分布式电源出力的概率密度分布函数,从而采用基于Wasserstein距离的最优场景生成技术进行典型场景构建;文献[93]采用K均值方法对分布式电源有功出力和负荷历史数据进行聚类,以减少场景数量和提取关键特征;文献[94]采用拉丁超立方抽样方法,随机生成分布式电源出力波动和负荷不确定性典型场景;文献[95]采用快速搜索和发现密度峰聚类方法对年负荷数据进行聚类,可以避免聚类结果陷入局部最优。

5.2 计及运行策略影响的SOP配置规划

由于SOP配置规划与系统运行优化策略存在强耦合性,不同运行优化目标下同一配置的优化效果差异很大。对此,常用的解决方法是建立多层优化模型,迭代求解SOP配置规划与运行优化2个子模型。其中,配置规划模型的控制变量包括SOP安装数目、安装容量等,运行优化模型控制变量包括SOP、分布式能源、储能等设备出力等。

针对上述问题,文献[96]建立了面向SOP、电容器组、分布式电源的双层配置规划模型,以多时间

断面的时序优化模型为基础,将机会约束算法嵌入模型上下层,在设定的置信水平下获得最佳结果;文献[97]提出SOP与分布式电源的3层协调规划模型,利用场景分析法量化分布式电源出力的随机性,上层对分布式电源配置进行规划,中层对SOP配置进行规划,下层以每个场景运行成本最小为目标对分布式电源与SOP进行运行优化;文献[98]考虑负荷侧响应,兼顾电源侧分布式电源不确定性、负荷侧响应及网络侧运行优化需求,构建了SOP三层时序规划模型,选取波动性源荷的典型场景,在网络层以系统总运行成本最小为目标优化SOP位置与容量,在负荷层考虑用户对电价波动的响应来调整负荷水平,在运行优化层基于SOP配置结果以最小化所有场景的运行成本为目标决定SOP出力,通过源网荷综合协调提高了SOP配置的经济性。

因此,SOP配置规划问题研究不仅要注重投资经济性分析,还要考虑SOP的接入位置、容量和数量组合对配电网整体运行的支撑能力等。同时,SOP选址定容规划尺度较长,需考虑以年为时间尺度的配电系统形态演变趋势影响等。

6 结语

SOP技术理念自提出以来,迅速成为国内外研究热点,得到了大量研究并取得了丰富成果。随着技术逐渐成熟,SOP逐步在国内外实际工程中得到应用,并因功能侧重不同而演化为交直流混合柔性互联、多端柔性互联、多电压等级柔性互联等不同的技术形态。本文总结了SOP的运行控制架构,由于进行全局集中信息采集、处理、分析和控制的难度增加,发展更加高效的SOP分布式运行控制新架构成为必然需求。本文进一步归纳了系统正常运行与故障运行下的SOP控制策略,利用大量可用历史数据并结合先进智能技术,提高复杂场景下的运行水平是未来趋势;针对SOP的规划研究,未来配电网将接入大量新型设备,以SOP为核心的配电网柔性化结构形态演变是未来的研究热点。

在应用实践中,既验证了一些前期的技术构想,又发现了一些新的共性问题。例如,在采用SOP代替联络开关时,为保证配电网的供电可靠性,往往要求SOP的容量能够独立承担一条馈线负荷,这使得建设投资大幅增加,同时也降低了正常运行时SOP的设备利用率;SOP的运行目标更多是侧重对系统运行损耗的降低和电压水平的优化,但与常规手段相比其技术优势不突出,技术的必要性尚未得到充分挖掘和体现。这些问题在一定程度上制约了SOP技术的实践推广,需要继续开展有针对性的研

究来加以解决。

为进一步促进SOP的发展和應用,需要重点开展以下3个方面的工作:1)发展新的SOP运行控制架构与方法,特别是面向未来配电网就地源荷平衡、柔性分区互联等新形态的协调运行方法,使容量有限的SOP发挥更大的优化调控作用;2)进一步降低SOP的投资成本,这不仅依赖于电力电子技术和SOP装置设计技术的发展,同时还应紧密结合SOP的应用场景需求,避免SOP配置盲目求全、求大,导致资源浪费;3)继续发掘SOP的技术潜力,将SOP与端对端交易、共享经济等新技术相结合,从而创造更多的附加效益。

参考文献

- [1] 李鹏,王瑞,冀浩然,等. 低碳化智能配电网规划思考与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 10-21.
LI Peng, WANG Rui, JI Haoran, et al. Research and prospect of planning for low-carbon smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 10-21.
- [2] 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.
- [3] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 168-175.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.
- [4] KASHANI M G, MOBARREZ M, BHATTARCHARYA S. Smart inverter volt-watt control design in high PV penetrated distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(2): 1147-1156.
- [5] HOSSAIN M A, POTA H R, HOSSAIN M J, et al. Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: challenges and opportunities [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 109: 160-186.
- [6] 何湘宁,宗升,吴建德,等. 配电网电力电子装备的互联与网络化技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5162-5170.
HE Xiangning, ZONG Sheng, WU Jiande, et al. Interconnection and networking technology of power electronic equipment in distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5162-5170.
- [7] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points [C]// IEEE PES General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, USA: 1-8.
- [8] 王成山,孙充勃,李鹏,等. 基于SNOP的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 82-87.
WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SNOP-based operation optimization and analysis of distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 82-87.
- [9] 贾冠龙,陈敏,赵斌,等. 柔性多状态开关在智能配电网中的应用[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1760-1768.
JIA Guanlong, CHEN Min, ZHAO Bin, et al. Application of flexible multi-state switch in intelligent distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1760-1768.
- [10] LI P, JI H, WANG C, et al. Optimal operation of soft open points in active distribution networks under three-phase unbalanced conditions [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 380-391.
- [11] LI P, JI H, YU H, et al. Combined decentralized and local voltage control strategy of soft open points in active distribution networks [J]. Applied Energy, 2019, 241: 613-624.
- [12] 苏嘉彬,陈斌,熊静,等. 基于模块化多电平换流器的背靠背柔性直流换流站绝缘配合方案研究[J]. 电气技术, 2020, 21(5): 84-89.
SU Jiabin, CHEN Bin, XIONG Jing, et al. Research on insulation coordination for back-to-back flexible modular multilevel converter-high voltage direct current converter station [J]. Electrical Engineering, 2020, 21(5): 84-89.
- [13] PEREDA J, GREEN T C. Direct modular multilevel converter with six branches for flexible distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1728-1737.
- [14] 杨欢,蔡云旂,屈子森,等. 配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 153-165.
YANG Huan, CAI Yunqi, QU Zisen, et al. Key technologies and development trends of flexible switchgear in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153-165.
- [15] LI M, YANG H, ZHAO R, et al. Comparative study on the operating area of M3C and B2B MMC for soft open point application [C]// 10th International Conference on Power Electronics, May 27-31, 2019, Busan, Korea: 1-8.
- [16] 许烽,陆翌,李继红,等. 无变压器非对称式柔性多状态开关的零序抑制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3084-3091.
XU Feng, LU Yi, LI Jihong, et al. Zero-sequence suppression strategy for transformer-free asymmetric flexible multistate switches [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3084-3091.
- [17] 高泽盟,葛菁,王剑锋,等. 具有故障隔离能力的柔性多状态开关拓扑及控制技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 48-54.
GAO Zemeng, GE Jing, WANG Jianfeng, et al. Topology and control technology of flexible multistate switches with fault isolation capability [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 48-54.
- [18] 杨勇,李继红,周自强,等. 智能配电网柔性多状态开关技术、装备及示范应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1105-1113.
YANG Yong, LI Jihong, ZHOU Ziqiang, et al. Intelligent distribution flexible multistate switch technology, equipment and demonstration application [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1105-1113.

- [19] 沈聪, 张国荣, 彭勃, 等. 具备干扰抑制能力的柔性多状态开关直流电压控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1198-1205.
SHEN Cong, ZHANG Guorong, PENG Bo, et al. Flexible multistate switching DC voltage control strategy with interference suppression capability [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1198-1205.
- [20] LI B, LIANG Y, WANG G, et al. A control strategy for soft open points based on adaptive voltage droop outer-loop control and sliding mode inner-loop control with feedback linearization [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 122: 1-12.
- [21] 张国荣, 沈聪, 彭勃, 等. 馈线故障下柔性多状态开关的平滑切换策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3050-3058.
ZHANG Guorong, SHEN Cong, PENG Bo, et al. Smooth switching strategy of flexible multistate switch under feeder fault [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3050-3058.
- [22] OKADA N, TAKASAKI M, SAKAI H, et al. Development of a 6.6 kV-1 MVA transformerless loop balance controller [C]// 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, USA: 1087-1091.
- [23] 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.
- [24] 肖峻, 余步鑫. 配电网接线模式的综合效率评价[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3769-3781.
XIAO Jun, SHE Buxin. Comprehensive efficiency evaluation of distribution network connection mode [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3769-3781.
- [25] 董旭柱, 刘志文, 李鹏, 等. 基于多端柔性多状态开关的智能配电网调控技术[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊1): 86-92.
DONG Xuzhu, LIU Zhiwen, LI Peng, et al. Smart distribution network control technology based on multi-terminal flexible multi-state switch [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Supplement 1): 86-92.
- [26] YANG M, PEI X, LI Y. Multi-port coordinated control strategy of SOP in distribution network [C]// IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 15-19, 2020, New Orleans, USA: 2333-2337.
- [27] ABDELRAHMAN M A, LONG C, WU J, et al. Optimal operation of multi-terminal soft open point to increase hosting capacity of distributed generation in medium voltage networks [C]// 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), September 4-7, 2018, Cardiff, UK: 1-6.
- [28] 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. Uninterruptible power exchanger based on flexible DC [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2914-2921.
- [29] 姚宗强, 赵长伟, 马世乾, 等. 含多端SOP的智能配电网运行优化及示范应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 66-72.
YAO Zongqiang, ZHAO Changwei, MA Shiqian, et al. Operation optimization and demonstration application of smart distribution network with multi-terminal SOP [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 66-72.
- [30] 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.
- [31] 董博, 李鹏, 富晓鹏, 等. 基于改进增广节点方程的柔性互联配电网统一潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 22-31.
DONG Bo, LI Peng, FU Xiaopeng, et al. Unified power flow calculation method of flexible interconnected distribution network based on modified augmented nodal equation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 22-31.
- [32] 徐全, 袁智勇, 于力, 等. 基于多端SOP的交直流混联配电网多目标运行优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 42-48.
XU Quan, YUAN Zhiyong, YU Li, et al. Multi-objective operation optimization method of AC-DC hybrid distribution network based on multi-terminal SOP [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(9): 42-48.
- [33] 白浩, 于力, 姜臻, 等. 基于四端E-SOP的有源配电网运行效率优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 89-98.
BAI Hao, YU Li, JIANG Zhen, et al. Operational efficiency optimization of active distribution network based on four-terminal E-SOP [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(3): 89-98.
- [34] 张学, 裴玮, 范士雄, 等. 含多端柔性互联装置的交直流混合配电网协调控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 185-191.
ZHANG Xue, PEI Wei, FAN Shixiong, et al. A coordinated control method for AC/DC hybrid distribution network with multi-terminal flexible interconnection device [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 185-191.
- [35] 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. Flexible DC distribution system design of Guizhou power grid [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 34-39.
- [36] 霍群海, 李梦菲, 栗梦涵, 等. 柔性多状态开关应用场景分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 13-21.
HUO Qunhai, LI Mengfei, SU Menghan, et al. Flexible multi-state switch application scenario analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 13-21.
- [37] COSTA L F, CARNE G D, BUTICCHI G, et al. The smart transformer: a solid-state transformer tailored to provide ancillary services to the distribution grid [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2017, 4(2): 56-67.
- [38] 梁得亮, 柳铁彬, 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.
- [39] SHE X, HUANG A Q, BURGOS R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 5(1): 186-198.
- [40] 瞿振宁,何永君,赵东元,等.新一代电力系统灵活柔性特征研究[J].电气工程学报,2019,14(3):1-8.
- ZI Zhenning, HE Yongjun, ZHAO Dongyuan, et al. Study on flexible characteristics of new generation power system [J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(3): 1-8.
- [41] 周京华,张荣,陈亚爱,等.张北数据港柔性变电站DC/AC变流器关键控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(11): 128-134.
- ZHOU Jinghua, ZHANG Rong, CHEN Yaai, et al. Key control strategy of DC/AC converter in Zhangbei data port flexible substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 128-134.
- [42] 王朝亮,吕文韬,许烽,等.柔性直流配电网MMC子模块级联数量优化设计[J].浙江电力,2019,38(4):8-12.
- WANG Chaoliang, LYU Wentao, XU Feng, et al. Optimum design of cascading number of MMC sub-modules in intelligent flexible DC distribution network [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(4): 8-12.
- [43] 傅守强,高杨,陈翔宇,等.基于柔性变电站的交直流配电网技术研究与工程实践[J].电力建设,2018,39(5):46-55.
- FU Shouqiang, GAO Yang, CHEN Xiangyu, et al. Research and project practice on AC and DC distribution network based on flexible substations [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(5): 46-55.
- [44] KYRIAKI E A, IASONAS N K. Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: models, methods, and future research [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2999-3008.
- [45] MOLZAHN D K, DÖRFLER F, SANDBERG H, et al. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2941-2962.
- [46] LONG C, WU J, 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.
- [47] 吴春潮,薛飞,徐晓彤,等.基于电气关联强度的虚拟微电网划分方法[J].电力系统自动化,2019,43(13):54-60.
- WU Chunchao, XUE Fei, XU Xiaotong, et al. Virtual microgrid partitioning method based on electrical correlation strength [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 54-60.
- [48] JI H, YU H, SONG G, et al. A decentralized voltage control strategy of soft open points in active distribution networks [J]. Energy Procedia, 2019, 159: 412-417.
- [49] BANI-AHMED A, RASHIDI M, NASIRI A, et al. Reliability analysis of a decentralized microgrid control architecture [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 3910-3918.
- [50] 贾善翔,彭克,李善东,等.基于智能软开关的柔性互联交直流配电系统分布式优化[J].电力系统自动化,2021,45(8): 95-103.
- JIA Shanxiang, PENG Ke, LI Shandong, et al. Distributed optimization of flexible interconnected AC/DC distribution system based on soft open point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 95-103.
- [51] LI P, JI H, SONG G, et al. A combined central and local voltage control strategy of soft open points in active distribution networks [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 2524-2529.
- [52] 丛鹏伟,唐巍,姜铖伟,等.含高渗透率可再生能源的主动配电网两阶段柔性软开关与联络开关协调优化控制[J].电工技术学报,2019,34(6):1263-1272.
- CONG Pengwei, TANG Wei, LOU Chengwei, et al. Two-stage coordination optimization control of soft open point and tie switch in active distribution network with high penetration renewable energy generation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1263-1272.
- [53] QI Q, WU J. Increasing distributed generation penetration using network reconfiguration and soft open points [C]// The 8th International Conference on Applied Energy, October 8-11, 2016, Beijing, China.
- [54] LI P, JI H, WANG C, 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.
- [55] 郑焕坤,石甜静.基于智能软开关和无功补偿装置的配电网双层优化[J].电力系统自动化,2019,43(19):117-123.
- ZHENG Huankun, SHI Tianjing. Bi-level optimization of distribution network based on soft open point and reactive power compensation device [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 117-123.
- [56] 孙峰洲,马骏超,于森,等.含多端柔性多状态开关的主动配电网日前-日内协调能量管理方法[J].中国电机工程学报,2020, 40(3):778-789.
- SUN Fengzhou, MA Junchao, YU Miao, et al. A day-ahead and intraday coordinated energy management method for active distribution networks based on multi-terminal flexible distribution switch [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 778-789.
- [57] SUN F, YU M, WU Q, et al. A multi-time scale energy management method for active distribution networks with multiple terminal soft open point [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 128(4): 106767.
- [58] JI H, WANG C, LI P, et al. An enhanced SOCP-based method for feeder load balancing using the multi-terminal soft open point in active distribution networks [J]. Applied Energy, 2017, 208: 986-995.
- [59] 赵金利,李雨薇,李鹏,等.基于二阶锥规划的有源配电网SNOP电压无功时序控制方法[J].高电压技术,2016,42(7): 2134-2141.
- ZHAO Jinli, LI Yuwei, LI Peng, et al. Sequential voltage regulation of soft normally open point in active distribution network based on second-order cone programming [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2134-2141.
- [60] JI H, WANG C, LI P, et al. Quantified flexibility evaluation

- of soft open points to improve distributed generator penetration in active distribution networks based on difference-of-convex programming[J]. *Applied Energy*, 2018, 219: 338-348.
- [61] CONG P, TANG W, LOU C, et al. Multi-stage coordination optimization control in hybrid AC/DC distribution network with high-penetration renewables based on SOP and VSC[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(16): 1-7.
- [62] SUN F, MA J, YU M, et al. Optimized two-time scale robust dispatching method for the multi-terminal soft open point in unbalanced active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(1): 587-597.
- [63] JI H, WANG C, LI P, et al. Robust operation of soft open points in active distribution networks with high penetration of photovoltaic integration[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(1): 280-289.
- [64] 王志强, 方正, 刘文霞, 等. 基于概率多场景的柔性配电网鲁棒运行优化[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(7): 37-44.
- WANG Zhiqiang, FANG Zheng, LIU Wenxia, et al. Robust operation optimization of flexible distribution network based on probabilistic multi-scenario [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(7): 37-44.
- [65] 马世乾, 赵长伟, 王旭东, 等. 基于机会约束的有源配电网智能软开关电压控制方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(9): 104-109.
- MA Shiqian, ZHAO Changwei, WANG Xudong, et al. Voltage control method of soft open point in active distribution network based on chance-constrained programming [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(9): 104-109.
- [66] KONSTANTELOS I, GIANNELOS S, STRBAC G. Strategic valuation of smart grid technology options in distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 1293-1303.
- [67] 孙充勃, 原凯, 李鹏, 等. 基于SOP的多电压等级混联配电网运行二阶锥规划方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(5): 1599-1605.
- SUN Chongbo, YUAN Kai, LI Peng, et al. A second-order cone programming method for hybrid multiple voltage level distribution networks based on soft open points [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1599-1605.
- [68] 刘文霞, 王凌飞, 徐艺铭, 等. 考虑节点运行风险差异的多端柔性配电网自适应潮流优化[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(5): 1-7.
- LIU Wenxia, WANG Lingfei, XU Yiming, et al. Adaptive power flow optimization of multi-terminal flexible distribution network considering voltage operation risk difference [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(5): 1-7.
- [69] 张今, 耿光超, 江全元, 等. 含柔性多状态开关的配电网多目标随机运行优化方法[J]. *高电压技术*, 2019, 45(10): 3140-3148.
- ZHANG Jin, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Multi-objective stochastic operation optimization for distribution network with flexible multi-state switches [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(10): 3140-3148.
- [70] QI Q, WU J, LONG C. Multi-objective operation optimization of an electrical distribution network with soft open point [J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 734-744.
- [71] 吕知彼, 裴雪军, 王朝亮, 等. 基于柔性多状态开关的配电网电压波动越限抑制方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(12): 150-157.
- LYU Zhibi, PEI Xuejun, WANG Chaoliang, et al. A voltage over-limit suppression method based on soft normally-open point in distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(12): 150-157.
- [72] HUO Y, LI P, JI H, et al. Data-driven adaptive operation of soft open points in active distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(2): 8230-8242.
- [73] AITHAL A, LI G, WU J, et al. Performance of an electrical distribution network with soft open point during a grid side AC fault[J]. *Applied Energy*, 2018, 227: 262-272.
- [74] 周永荣, 秦文康, 葛佳盛, 等. 柔性直流配电系统换流器交流侧接地故障的分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 160-167.
- ZHOU Yongrong, QIN Wenkang, GE Jiasheng, et al. Analysis of grounding fault on the AC side of converter station in a flexible DC distribution system [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 160-167.
- [75] 薛俞, 李月乔, 刘文霞, 等. 柔性互联配电系统连锁故障风险评估[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 112-119.
- XUE Yu, LI Yueqiao, LIU Wenxia, et al. Risk assessment of cascading failures in flexible interconnected power distribution system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 112-119.
- [76] LI Z, YE Y, MA X, et al. Single-phase-to-ground fault section location in flexible resonant grounding distribution networks using soft open points [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 122: 106198.
- [77] 叶雨晴, 马啸, 林湘宁, 等. 基于SOP的主动式谐振接地配电网单相接地故障区段定位方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(5): 1453-1465.
- YE Yuqing, MA Xiao, LIN Xiangning, et al. Active fault locating method based on SOP for single phase grounding faults in the resonant grounding distribution network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(5): 1453-1465.
- [78] 宋毅, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4390-4399.
- SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4390-4399.
- [79] 娄毓伟, 张筱慧, 丛鹏伟, 等. 含柔性软开关的有源配电网故障恢复策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(1): 23-31.
- LOU Chengwei, ZHANG Xiaohui, CONG Pengwei, et al. Service restoration strategy of active distribution network with soft open points [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(1): 23-31.
- [80] 刘文霞, 刘鑫, 王荣杰, 等. 含柔性多状态开关的多端互联配电系统可靠性评估与量化分析[J]. *高电压技术*, 2020, 46(4): 1114-1124.
- LIU Wenxia, LIU Xin, WANG Rongjie, et al. Reliability

- evaluation and quantitative analysis of multi-terminal interconnect power distribution system with flexible multi-state switch [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46 (4): 1114-1124.
- [81] 祝旭焕,童宁,林湘宁,等.基于柔性多状态开关的主动配电网负荷在线紧急转供策略[J].电力系统自动化,2019,43(24): 87-101.
ZHU Xuhuan, TONG Ning, LIN Xiangning, et al. Flexible multi-state switch based online emergency load transferring strategy for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 87-101.
- [82] 胡玉,顾洁,马睿,等.面向配电网弹性提升的智能软开关鲁棒优化[J].电力自动化设备,2019,39(11):85-91.
HU Yu, GU Jie, MA Rui, et al. SNOP robust optimization for distribution network resilience enhancement [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 85-91.
- [83] 秦清,韩蓓,李国杰,等.含智能软开关的配电网多阶段弹性力学映射与评估[J/OL].电工技术学报[2021-03-31].https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201319.
QIN Qing, HAN Bei, LI Guojie, et al. Multi-stage elastic mechanical modelling and evaluation of distribution networks with soft open point [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society [2021-03-31]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201319.
- [84] 葛雪峰.基于电力电子补偿设备的有源配电网运行与控制[D].济南:山东大学,2018.
GE Xuefeng. Operation and control of active distribution network based on power electronic compensation equipment [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [85] JI H, WANG C, LI P, et al. SOP-based islanding partition method of active distribution networks considering the characteristics of DG, energy storage system and load [J]. Energy, 2018, 155: 312-325.
- [86] LI P, JI J, JI H, et al. Self-healing oriented supply restoration method based on the coordination of multiple SOPs in active distribution networks[J]. Energy, 2020, 195: 116968.
- [87] WANG J, ZHOU N, WANG Q. Data-driven stochastic service restoration in unbalanced active distribution networks with multi-terminal soft open points[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 121: 106069.
- [88] 王颖,马佳骏,王小君,等.含智能软开关的配电网重要负荷恢复方法[J].电力系统自动化,2021,45(8):104-111.
WANG Ying, MA Jiajun, WANG Xiaojun, et al. Critical load restoration method for distribution network with soft open point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (8): 104-111.
- [89] 王志强,徐艺铭,刘文霞,等.柔性多状态开关优化接入的两步式决策方法[J].高电压技术,2019,45(10):3068-3075.
WANG Zhiqiang, XU Yiming, LIU Wenxia, et al. A two-step decision method for optimal access of flexible multistate switches [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3068-3075.
- [90] 葛少云,周晨曦,刘洪,等.考虑环间接入模式及可靠性影响的有源配电网软开关规划[J].电力系统自动化,2021,45(8): 120-128.
GE Shaoyun, ZHOU Chenxi, LIU Hong, et al. Soft switch planning of active distribution network considering the influence of loop indirection mode and reliability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 120-128.
- [91] 王成山,宋关羽,李鹏,等.考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关SOP规划方法[J].中国电机工程学报,2017, 37(7):1889-1897.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. An intelligent soft switch SOP planning method for active distribution network considering the operating characteristics of distributed power supply [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1889-1897.
- [92] WANG C, SONG G, LI P, et al. Optimal siting and sizing of soft open points in active electrical distribution networks [J]. Applied Energy, 2017, 189: 301-309.
- [93] WANG J, ZHOU N, CHUNG C Y, et al. Coordinated planning of converter-based DG units and soft open points incorporating active management in unbalanced distribution networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 2015-2027.
- [94] XIAO H, PEI W, KONG L. Optimal sizing and siting of soft open point for improving the three-phase unbalance of the distribution network [C]// 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), October 7-10, 2018, Jeju, Korea: 2080-2084.
- [95] 赵金利,陈昊,宋关羽,等.考虑可靠性收益的配电网智能软开关规划方法[J].电力系统自动化,2020,44(10):22-31.
ZHAO Jinli, CHEN Hao, SONG Guanyu, et al. Intelligent soft switch planning method for distribution network considering reliability benefit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 22-31.
- [96] ZHANG L, SHEN C, CHEN Y, et al. Coordinated optimal allocation of DGs, capacitor banks and SOPs in active distribution network considering dispatch results through bi-level programming [C]// The 9th International Conference on Applied Energy, August 21-24, 2017, Cardiff, UK.
- [97] 马丽,薛飞,石季英,等.有源配电网分布式电源与智能软开关三层协调规划模型[J].电力系统自动化,2018,42(11):86-93.
MA Li, XUE Fei, SHI Jiying, et al. Tri-level coordinated planning model of distributed generator and intelligent soft open point for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 86-93.
- [98] LU J, YANG H, WEI Y, et al. Planning of soft open point considering demand response [C]// IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), November 21-23, 2019, Beijing, China: 246-251.
- 王成山(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统安全性分析、城市电网规划、分布式发电系统与微电网。E-mail: cswang@tju.edu.cn
- 李 季(1989—),女,博士研究生,主要研究方向:柔性配电网运行控制。E-mail: ji_jie@tju.edu.cn
- 冀浩然(1991—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:智能配电系统运行优化。E-mail: jihaoran@tju.edu.cn

(编辑 章黎)

Technologies and Application of Soft Open Points in Distribution Networks

WANG Chengshan¹, JI Jie¹, JI Haoran¹, YU Hao¹, WU Jianzhong², LI Peng¹

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

2. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK)

Abstract: Flexible distribution networks are promising solutions to improve the operation performance by coordinating the diverse resources of distributed generators and loads. Soft open point (SOP) is considered as the essential equipment for realizing flexible distribution networks. In recent years, researches on the SOP operation control have been widely conducted and achieved abundant progress. This paper starts from the development trend of flexibility of the distribution network. The technical forms and application forms of SOP and its derived flexible interconnection concepts in multiple scenarios are reviewed and sorted out. On this basis, the key technical issues on SOP integration in flexible distribution networks for operation optimization, self-healing control, and configuration planning are explained, followed by a summarization of the current works. The development trend of SOP in the future is prospected, which provides ideas for the further expansion and deepening of the research and application of SOP technologies.

This work is supported by Joint Funds of National Natural Science Foundation of China (No. U1866207) and National Natural Science Foundation of China (No. 52007131).

Key words: soft open point (SOP); flexible distribution network; topology evolution; operation optimization; planning

