

智能配电柔性多状态开关技术、装备及示范应用

杨 勇¹, 李继红¹, 周自强², 黄晓明², 陆 翌², 赵荣祥³, 裴雪军⁴,
查晓明⁵, 田 杰⁶, 许 烽²

(1. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014;
3. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310007; 4. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074;
5. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072; 6. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211002)

摘 要: 柔性多状态开关是解决当前配电网所面临的用电需求多样化、分布式电源接入规模化、潮流协调控制复杂化等多方面挑战的关键技术。首先, 介绍了柔性多状态开关技术研究的体系架构。其次, 从技术内容、研究进展情况、存在问题等方面, 介绍了柔性多状态开关研究与示范中的关键技术, 包括拓扑选型及参数优化、接入模式、优化调控、装置研制、试验测试、集成示范等技术。最后, 从拓扑选型、装置制造、运行控制三方面分析了柔性多状态开关存在的问题与挑战, 并指出小体积、低成本、高效率是柔性多状态开关装置的发展方向。

关键词: 柔性多状态开关; 拓扑; 接入模式; 优化调控; 示范

Technology, Equipment and Demonstration Application of Flexible Multi-state Switch in Intelligent Distribution Network

YANG Yong¹, LI Jihong¹, ZHOU Ziqiang², HUANG Xiaoming², LU Yi², ZHAO Rongxiang³, PEI Xuejun⁴,
ZHA Xiaoming⁵, TIAN Jie⁶, XU Feng²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310027, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China; 4. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 5. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 6. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211002, China)

Abstract: Flexible multi-state switch is the key technology to solve challenges of the current distribution network, such as the diversification of electricity demands, the large-scale access of distributed power, the complexity of power flow coordination control and so on. Firstly, the research architecture of flexible multi-state switch technology is introduced. Then, in terms of technical contents, research progress and existing problems, the key technical problems in the research and demonstration of flexible multi-state switch are introduced, including topology selection and parameter optimization, access mode, optimal regulation, device development, test, integrated demonstration and so on. Finally, the problems and challenges of flexible multi-state switch are analyzed from three aspects, such as topology selection, device manufacturing and operation control. It is pointed out that small size, low cost and high efficiency are the development direction of flexible multi-state switch devices.

Key words: flexible multi-state switch; topology; access mode; optimal regulation; demonstration

0 引言

配电网处于电力系统的末端, 直接面向电力用户, 承担着分配电能、服务客户的重任^[1]。当前, 配电网建设滞后、结构不合理、调控手段有限, 制

约了配电网运行控制的灵活性, 造成了馈线负荷不平衡、供电恢复时间长等问题^[2]。另一方面, 配电网内非线性、冲击性负荷比重的增加, 以及新能源渗透率的不断提高, 对配电网电能质量和供电可靠性的保障手段提出了更高要求^[3]。现有配电网正面临用电需求定制化和多样化、分布式电源接入规模化、潮流协调控制复杂化等多方面的巨大挑战。这些问题采用常规开关等传统调控手段难以同时得到

基金资助项目: 国家重点研发计划(2017YFB0903100); 国家电网公司科技项目(521104170043)。

Project supported by National Key R&D Program of China (2017YFB0903100), Science and Technology Project of SGCC (521104170043).

有效解决。

柔性多状态开关(flexible multi-state switch, FMS)采用电力电子新技术,是一种安装在配电网中、连接在两条或多条馈线之间,调整馈线间有功功率流动的电力电子装置^[4]。与常规开关相比,不仅具备通和断两种状态,而且增加了功率连续可控状态,兼具运行模式柔性切换、控制方式灵活多样等特点,可避免常规开关倒闸操作引起的供电中断、合环冲击等问题,还能缓解电压骤降、三相不平衡现象,促进馈线负载分配的均衡化和电能质量的改善,为未来智能配电网的实施提供了关键技术与设备支撑。柔性多状态开关实现形式多样,可采用交交变换或交直交变换等方式。从实现基础而言,与软常开节点(soft normally open point, SNOP)^[5]、环网平衡控制器(loop balance controller, LBC)^[6]有部分相似之处。

当前,柔性多状态开关已成为电力系统,尤其是配电系统领域的研究热点。较早的研究工作集中于柔性多状态开关的概念^[7],以背靠背电压源型变换器为基础,延伸出了核心概念及初步实现方式。更进一步地,在拓扑形式、调控理论等方面,先后研究了交交变换器^[8-9]、矩阵变换器^[10]等在配电馈线联络方面的可行性,以及提高分布式电源消纳水平^[11]、多时间尺度优化运行^[12]、电压无功控制^[13]等策略方法。上述研究涵盖了柔性多状态开关的概念、拓扑、调控等多个方面,偏重于理论研究。

为了系统地针对智能配电柔性多状态开关技术、装备与示范应用展开研发与工程示范,国家重点研发计划在2017年“智能电网技术与装备”重点专项中特别支持了“智能配电柔性多状态开关技术、装备与示范应用”。本文介绍了柔性多状态开关的体系架构和关键技术,分析了柔性多状态开关在研究和应用过程中面临的问题与挑战,希望能为相关技术领域的科研人员提供参考,并推动柔性多状态开关技术的研究、发展与工程应用。

1 体系架构

智能配电柔性多状态开关技术实施具体涉及拓扑选型及参数优化、接入模式、优化调控、装置研制、试验测试、集成示范等6个方面,如图1所示。其中,拓扑选型及参数优化的研究成果为接入模式、优化调控和装置研制的研究提供可行的基础技术支撑;接入模式根据柔性多状态开关运行特性

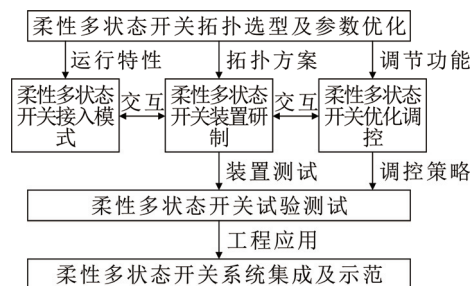


图1 柔性多状态开关研究体系架构

Fig.1 Research architecture of flexible multi-state switch

明确应用场景和技术要求;优化调控基于特定场景的接入模式和基于拓扑的优化调节功能,研究智能配网在稳态、暂态及故障恢复多时间尺度下的优化运行策略;装置研制在基于前三者理论研究的基础上,综合经济性、可靠性、紧凑性等要求,确定整机实现形式;试验测试则基于柔性多状态开关装置开展仿真测试和功率运行试验,为集成示范提供验证技术及保障;集成示范对上述内容实现工程现场应用,全面验证整体系统的功能与性能。

拓扑选型与参数优化实现了拓扑选型由孤立生成向有序推演、参数配置由粗放式向精细化的提升。对现有主电路拓扑集合进行梳理归类,根据控制复杂度、可靠性等指标展开评价。凝练抽象出复杂多变的配网环境对于拓扑的具体需求,以此为基础确定容量、电压等级,并进行功率模块、电抗等关键器件的选型及参数设计,进而计算出待选拓扑所需成本、占地面积等量化指标,方便研究人员因地制宜地选择拓扑形式。

接入模式主要由接入需求分析和接入优化两部分构成。接入需求分析用于找出传统配电网优化手段(如网络重构、无功优化)的不足之处,对柔性多状态开关新型调控手段和接入模式提出要求,并对柔性多状态开关的接入进行选址定容。接入优化的目标是通过配电网综合效益评价模型的研究,采用粒子群、二阶锥规划等优化算法,进一步优化接入的数量、位置和对应容量。

优化调控按照配电网的运行状态,可分为稳态运行调控、自愈控制和协调优化。在稳态运行调控方面,考虑分布式电源出力波动、负荷变化,灵活调节配电网的潮流分布,实现电压波动平抑,并改善配电网电能质量。在自愈控制方面,根据电网电压跌落的不同程度采取相应控制和保护策略,避免换流阀损坏的同时输出合适的电流支撑电网电压,

保证重要负荷不间断供电。在协调优化方面, 考虑不同时间尺度下的分布式优化策略, 实现配电网的经济运行。

装置研制的目标是在确保换流阀等核心部件可靠性的同时, 尝试从不同维度采用多种途径降低装置的成本、体积、安装难度等, 并研发多级控制保护设备, 互相配合, 使得装置可以在自身故障或配网故障下将损失降到最低。

试验测试是保障设备正常运行的关键步骤。根据一次设备和二次设备在试验基础、条件、环境、技术方面的差异, 搭建符合一、二次设备试验要求的实时闭环仿真平台和全电压、全电流试验平台, 并从模拟现场真实工况、严峻工况等可能发生的运行环境出发, 进行试验测试, 保障设备现场投运后的可靠、安全运行。

集成示范紧密围绕柔性多状态开关系统集成与示范应用展开, 为确保柔性多状态开关装置的顺利安装与运行, 同时发挥柔性多状态开关对所在配电网在馈线潮流均衡、电能质量治理、分布式电源消纳等方面的突出优势, 研究工程前期关于电气主接线、设备选型、参数选择等方面的成套设计技术, 工程中期柔性多状态开关装置现场安装完毕之后的系统联调技术以及现场运行与维护技术。在上述研究基础上, 建成示范工程, 并全面评价工程的综合性能及效益。

2 关键技术

2.1 拓扑选型及参数优化设计技术

将重点关注现有适配主电路拓扑集合、新型拓扑构造规律与拓扑推演方法、多约束条件下的主电路参数优化方法。研究适配多种接线方式与应用场景的主电路拓扑集合, 建立不同应用场景下各拓扑适用性的量化比较体系; 研究器件/模块的复用、组合, 构造体积更小的新型拓扑; 针对具有高压高频优势的宽禁带器件, 以及基于非晶/纳米晶等磁性材料的新型磁性元件, 研究适用于柔性多状态开关装置的潜在拓扑; 研究综合经济性、运行效率、可维护性等因素时装置的性能优化设计。

文献[14]从有功交换、无功支撑、故障穿越等角度对比了多种配电网电力电子装置, 并详细建模分析了各自的分布式电源消纳能力, 认为背靠背电压源型换流器综合效果最优; 文献[15]在 10 kV 的电压等级下, 针对背靠背模块化多电平变流器

(back-to-back modular multilevel converter, BTB-MMC)与模块化矩阵变流器两类拓扑, 探讨出稳态运行的约束条件, 并计算得出 $P-Q$ 图, 直观展示了两类拓扑在两端口电压等级相同、有无变压器等不同应用场景下的运行边界; 文献[16]提出了一种新型交交变换拓扑, 一侧交流系统的每一相与另一侧交流系统的两相相连, 相较于 BTB-MMC 减少了一半桥臂数目, 但未能改变传统交交变换拓扑的缺点, 目前尚处于起步阶段; 文献[17-19]提出无变压器的 BTB-MMC 拓扑, 以此减少装置体积、成本, 互联后所出现的环网零序电流可通过增加额外的零序电流控制模块消除。文献[20]提出将基于磁性元件的可调电抗器应用于柔性多状态开关, 利用其等效阻抗值连续可调的特点, 实现配电网存在电压差、相位差的馈线间柔性互联; 文献[21]则提出了在多种约束条件下选取主电路参数的优化流程。浙江大学团队综合国内外研究现状, 设计出一款面向中低压配电网柔性多状态开关的拓扑辅助选型软件, 可根据以最少规格满足最大应用需求的准则, 帮助用户选择最适合当前应用场景的拓扑结构。软件界面如图 2 所示。

配电网中, 电压等级多、接线方式复杂。柔性多状态开关不同拓扑形式可适用于不同应用场景[22]。如何根据场景的特点, 合理建立约束条件与目标, 客观地选择或优化兼具经济性与可靠性的拓扑, 将成为柔性多状态开关应用推广过程中的一个难点。此外, 现有拓扑方式可分为交直交变换与交交变换, 前者功率需经两级变换, 器件数目多[14], 而后者内部环流复杂, 控制难度较高[23], 因此, 需开发适用

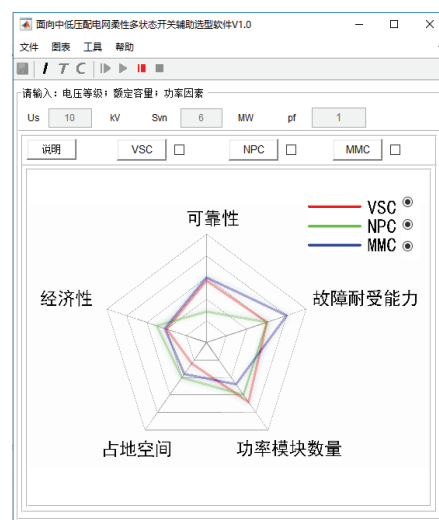


图 2 拓扑辅助选型软件界面

Fig.2 Interface of topology auxiliary selection software

于柔性多状态开关的新型拓扑。

2.2 接入模式优化技术

将重点关注智能配电网在有分布式电源接入的情况下柔性多状态开关的选址定容问题。研究基于场景生成与削减的配电网传统手段调控局限性；研究柔性多状态开关接入配电网的连接拓扑表达及其可行域；研究基于拓扑可行域的柔性多状态开关接入方式集；研究柔性多状态开关综合效益模型；研究考虑调控方式的柔性多状态开关接入优化配置方法。

针对新能源消纳和供电可靠性灵活性等定制电力需求，配电网存在着复杂多变的场景，虽然其自身具有一定的调节能力，但是基于网络重构和无功优化的传统调节手段在新能源接入的情况下具有一定的局限性^[24]。分布式电源的随机性与波动性的概率模型由于其连续的数学表达形式，很难在电力系统规划与运行的决策中直接使用，因此需要找到配电网的典型运行工况^[25]。配电网的灵活性既关系着当前配电网运行的效能，也关系着未来进一步发展的方向。输电网的定量评估已经有相对而言较为成熟的研究，例如爬坡资源不足期望值(insufficient ramping resource expectation, IRRE)、技术不确定性灵活性指标(technical uncertainty scenarios flexibility index, TUSFI)等指标已经得到广泛采用^[26]，也有些初步的指标体系可供参考，但在柔性多状态开关接入配电网方面的研究则少有提及。图3为柔性多状态开关接入配电网的典型接入方式。

接入模式的难点在于选址定容。现有的柔性多状态开关接入方法多为在配电网薄弱处直接替代联络开关^[27]，使配电网达到功率平衡，但对接入的数量和容量没有较多的研究。作为配电网应对扰动的评估指标^[28]，灵活性可以为柔性多状态开关接入配电网提供参考依据^[29]。对灵活性不足、灵活性充足等节点采用区别化的优化改善措施，实现面向配电网实际工程需求的柔性多状态开关选址定容方案。

2.3 优化调控技术

将重点关注柔性多状态开关的故障穿越、故障保护和重要负荷持续供电问题。研究柔性多状态开关稳态运行调控技术，包括分布式电源消纳策略和电能质量改善策略^[30-31]；研究基于柔性多状态开关的配电网自愈控制技术，包括柔性多状态开关的故障穿越策略^[32-33]，配电网电压支撑策略和重要负荷不间断供电策略；研究含多个柔性多状态开关的配

电网协调优化控制技术，包括含多个柔性多状态开关的配电网分区方法和多目标优化策略。

目前，在柔性多状态开关的稳态运行调控方面，国内外学者侧重于研究柔性多状态开关在实现配电网馈线均衡、网损优化、电压水平改善、新能源消纳等方面的作用^[34-37]。柔性多状态开关作为并联型入网设备在改善配电网电能质量方面的作用还未得到深入的研究。在含柔性多状态开关的配电网自愈控制技术方面，现有研究较少，相关的研究主要集中在柔性多状态开关的故障特性分析、故障穿越策略和负荷转供方面^[38]。而大部分的研究仅仅将输电网中的柔性电力电子设备的故障分析和故障穿越技术应用于配电网中的柔性多状态开关，例如依旧根据如图4所示的传统输电网中的无功电流注入曲线对故障电网进行电压支撑^[32]。实际上由于配电网的故障特征和网架结构与输电网差异较大，现有针对输电网中的故障分析和故障穿越技术无法直接应用于柔性多状态开关。

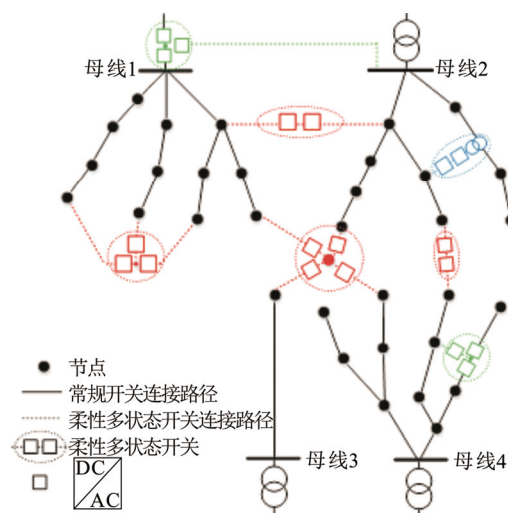


图3 柔性多状态开关的典型接入方式

Fig.3 Typical access mode of FMS

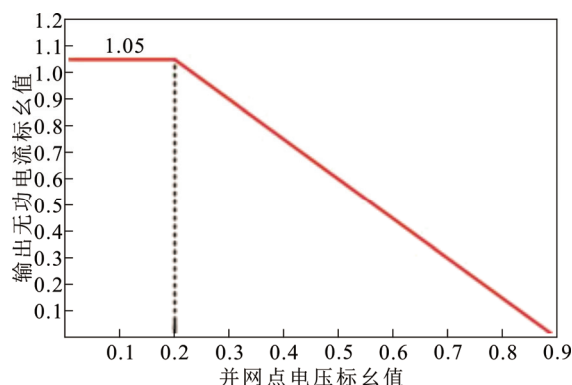


图4 无功电流注入曲线

Fig.4 Reactive current injection curve

配电网网架结构和接地方式多样, 故障特征较为复杂。同时, 配电网自动化水平较低, 导致柔性多状态开关的故障穿越、保护和重要负荷转供的技术实现难度较大。需要对配电网在各类网架结构和接地方式下的故障特征进行研究分析, 针对性地采用控制和保护策略实现含柔性多状态开关的配电网自愈控制。

2.4 装置研制技术

将重点关注紧凑化、少维护型换流器设备研制, 高集成度、可平行扩展的阀控设备研制, 与分层分布式控制保护设备研制。研究可单端带电隔离的预制舱式开关换流器设备, 开展整体散热优化设计与少维护冷却设计; 研究基于高速总线的阀控设备, 满足高速运行与无延时平行扩展要求; 研究系统各层级之间的功能划分及配合设计, 实现开关装置的无盲区可靠保护。

换流器设备方面, 柔性多状态开关的铁磁元件体积和重量较大, 为满足城市配电网设备紧凑化、轻量化和易于安装维护的要求, 必须采取合理的设计方案省去或者减小体积, 同时满足交直流电压匹配、故障隔离等需求。文献[39]介绍了桥臂串联阻尼模块的 MMC 拓扑可实现故障快速恢复; 文献[40]分析了应用该拓扑的柔性换流器不通过连接变压器直接接入 10 kV 交流电网的问题和解决方案。文献[41]介绍了一种无换流变压器混合子模块拓扑, 具有故障电流闭锁能力, 证明了柔性多状态开关去平波电抗器设计的可行性。控制保护系统方面, 文献[42-44]针对基于模块化多电平换流器的换流阀子模块数量多、通信量大等特点, 提出了 MMC 控制保护系统的三层架构, 如图 5 所示, 包括系统协调层、换流器级层和阀级层, 实现换流阀触发、监测和保护等功能。分层分布式控制结构减少了数据运算量, 提高了通信速度, 保证了运行可靠性。

现有中压大容量电力电子装置受限于功率模块的耐压性能, 多采用模块级联等方式, 导致设备占地大。城市区域土地资源有限, 因而对装置的体积和占地面积等提出了较高要求。因此, 需对装置的电抗器、换流阀、冷却系统等进行合理设计与布局, 提升整机的紧凑性。此外, 功率模块内部存在功率循环和热循环之间的耦合, 加之杂散参数的影响, 会对装置的安全运行造成一定程度的限制。应当探明系统物理运行极限, 进而实现装置的高集成度与高可靠性设计。

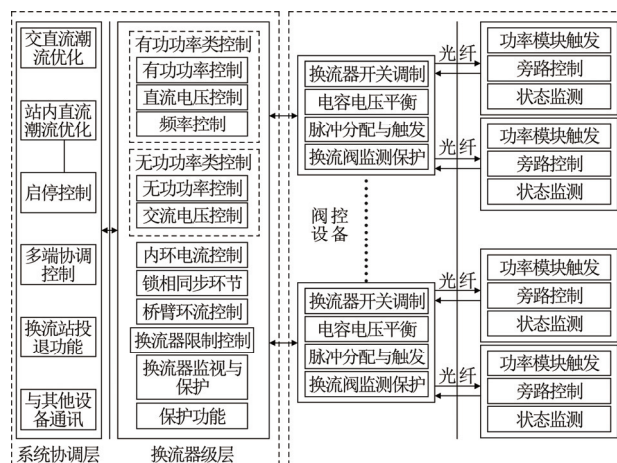


图5 分层分布式控制保护系统

Fig.5 Hierarchical distributed control and protection system

2.5 试验测试技术

将重点关注实时数字仿真平台和全工况试验平台的搭建。研究多状态开关建模与外特性; 研究数字建模仿真等效模型的建立; 研究数模混合闭环实时仿真验证技术; 研究基于实时数字仿真平台的自动化测试系统; 研究功率模块等效试验平台; 研究基于多物理场的运行试验技术; 研究柔性多状态开关试验测试等效机理及评价方法。

当前, 在电力电子化电力系统仿真、离线仿真建模、实时闭环仿真等方面已有长足发展, 图 6 给出了含电力电子设备的实时仿真系统结构图。在装置试验方面, 经历了全载试验、单一应力试验、合成试验等, 在全工况试验方法和平台搭建方面, 涉及较少。

高拟合度离线仿真技术能够较为完整地反映柔性多状态开关的特性, 但还不能完全等效其控制保护装置, 也不能对控制保护样机的主板、板卡 I/O、程序、连接线等进行全面的测试。基于柔性多状态开关的智能配电网含大量非线性设备以及高速电力电子装置, 为了准确测试柔性多状态开关装置及其区域配电网, 需要开发大规模、多时间尺度的数字实时仿真系统, 真实反映柔性多状态开关机理以及智能配电网运行和故障机理。

2.6 系统集成与示范应用技术

将重点关注柔性多状态开关装置工程化应用等问题。研究示范工程一、二次系统设计技术, 包括电气主接线、设备选型、控制架构、保护整定等; 研究工程联调测试技术, 包括分系统、站系统、系统调试; 研究满足多时间尺度要求的现场功率调节

技术; 研究控制方式、运行模式灵活切换技术; 研究实用化设备状态在线动态评估及检修决策技术; 基于系统架构和功能架构, 研究示范工程综合效益评估策略。

如前所述, 柔性多状态开关可以采用交交变换或交直交变换等方式实现。当前, 国内外相关工程均采用交直交形式, 且已建成多个示范工程。图 7 给出了杭州江东示范工程, 其中 S1—S5 表示交流开关, T1—T4 表示所处的安装位置。该工程新建 ± 10 kV 柔直换流站 1 座, 含 3 个交流端口和 1 个直流接口。其中 20 kV 直流换流阀 1 台, 10 kV 直流换流阀 2 台, 直流母线引出线经直流断路器和直流

变压器, 将 ± 10 kV 直流电压变压为 ± 375 V。工程实现了 20 kV 与 10 kV 电压等级母线的直流互联和存在 30° 相角差的 2 个 10 kV 母线的直流互联, 重点解决了供区间电能互济、潮流柔性控制、短路电流扩大等问题。该工程具备如下特点: (1)采用无变压器接入、标准化元器件、模块化设计、集装箱式安装, 有效减少了装置占地面积。(2)系统强迫停运等效率年可用率 $\geq 99\%$ 。(3)馈线负载均衡度 $\geq 90\%$ 。江东电网中 10 kV 的新湾变和长征变供区处于重负载状态, 而 20 kV 临欣变供区处于轻负载状态, 利用柔性多状态开关对有功功率的调节, 能够将原本 $< 50\%$ 的馈线负载均衡度提升至 $> 90\%$ 的水平。(4)有效提

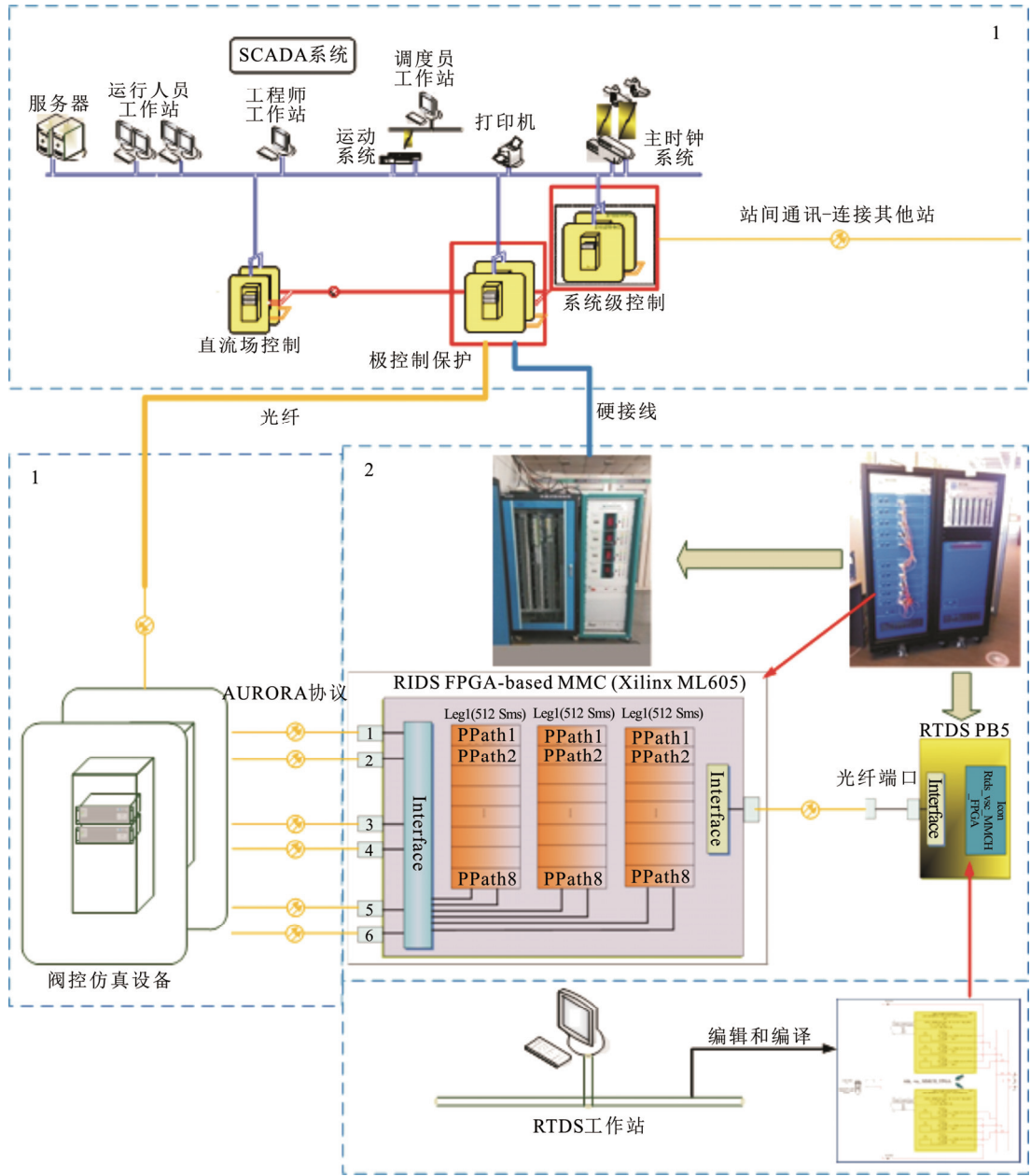


图 6 含电力电子设备的实时仿真系统结构图

Fig.6 Real-time simulation system structure with power electronic equipment

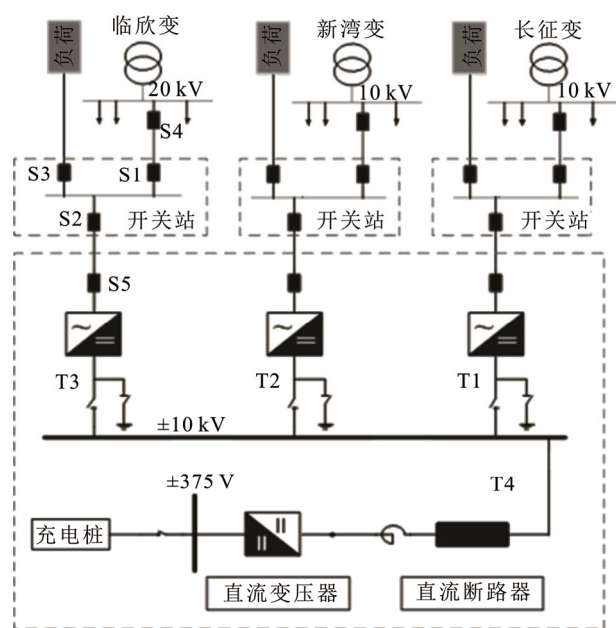


图7 杭州江东示范工程示意图

Fig.7 Schematic diagram of Jiangdong demonstration project in Hangzhou

升新能源的并网消纳能力和电能质量。配电网线路阻抗特性不再主要是感性, 即电阻/电抗的比值较大, 因而分布式电源间歇性的功率波动会引起馈线节点电压波动剧烈, 部分节点电压甚至会超出国标要求。利用柔性多状态开关的有功无功调节能力, 能够间接起到电压控制的目的, 缓解馈线电压波动。另外, 柔性多状态开关还能进行谐波补偿治理, 提升馈线电能质量。

2016 年, 英国配电网运营商 UK Power Networks 投资了 653 万英镑, 投资了城市柔性低压电网项目, 建成了两/三端 0.4 kV/400 kW 示范工程。项目通过两/三端电力电子设备实现了低压变电站间的柔性互联, 在不同配电网拓扑下进行了设备的测试和演示, 实现了相邻变电站的容量共享, 达到了低压配电网容量分配最优化以及平衡负载的目的。图 8 为工程现场布置图, 左图为户外式, 右图为户内式, 占地面积小, 安装便捷。

柔性多状态开关装置接入配电网投运后, 在运维检修方面, 采用与传统配电设备相同的方法, 即无人值守。但是, 柔性多状态开关涉及一、二次多个关键组件, 且运行方式更为复杂。因此, 需要在智能在线监控技术的基础上, 对设备进行状态预测, 提出适合柔性多状态开关的检修周期和策略, 突破运维的常规模式, 提供效率更高、更具针对性的检



图8 工程现场布置图

Fig.8 Project site layout

修方式, 保障装置的合理优化可靠运行。

3 问题与挑战

在拓扑选型方面, 为避免采用还不十分成熟的器件直接串联技术, 现有直流配电网等工程所使用的换流阀基本都采用 MMC。但是, MMC 包含的子模块数目较多, 换流阀体积大, 同时, MMC 的各组件, 如换流阀、磁性元件等缺乏统一的紧凑化设计, 导致整机占地面积大。2007 年, 日本电力工业中央研究院借助绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)直接串联技术与紧凑化设计研制了 LBC 并完成 6.6 kV/1 MVA 的装置示范应用, 占地面积仅为 6 m² 左右, 并可以安装在 H 型杆塔上, 从而节省占地空间并提高土地利用率。伴随相关技术的应用与成熟, 柔性多状态开关装置的小型化也是可以预期的。

在装置制造方面, 柔性多状态开关装置作为典型的电力电子装置, 可以有效提升配电网的经济性与可靠性, 但同时也存在成本较高的问题, 阻碍了柔性多状态开关的发展与推广。其中, 占据成本较大的是电力电子开关器件, 如 IGBT。随着电力电子器件制造技术的发展, IGBT 的价格不断下降, 近十年 IGBT 的单位价格下降一半以上。此外, 国产 IGBT 产品的出现与应用不仅有效降低了 IGBT 的价格, 更保障了未来 IGBT 价格不断降低的趋势。IGBT 成本的降低有利于柔性多状态开关装置综合成本的下降, 也为装置的推广应用提供助力。在运行控制方面, 柔性多状态开关需要依靠完善精确的控制与保护系统, 以实现柔性多状态开关内部及其与配电系统之间的协调运行, 因此, 对整体系统的通讯能力要求较高^[45-46]。为进一步优化柔性多状态开关, 减少其对通讯的要求, 需进一步研究少通讯或无通讯的控制运行方式, 便于系统扩展, 抵

御通讯故障。

4 结论与展望

智能配电柔性多状态开关技术的研究和实施对推进智能配电网的发展和实用化具有积极的作用。

1) 能够增强配电网运行控制的灵活性, 满足分布式电源消纳、高供电可靠性等定制需求, 在减少电网投资的同时, 降低配电网规划、运行等成本。

2) 能够促进能源互联网的发展, 改善电能质量, 实现电能的主动调控, 降低电能损耗, 进一步降低供电的成本。

3) 柔性多状态开关技术的突破和自主创新, 将带动我国相关产业的发展, 对我国产业结构调整和产业升级起到重要的促进作用。

4) 该技术的应用可以显著提升配电网对可再生能源的消纳能力, 从而减少化石资源的消耗量和温室气体排放, 这对于缓解我国能源需求增长与能源紧缺、能源利用与环境保护之间的矛盾具有重要意义。

未来, 在突破柔性多状态开关拓扑选型、接入模式、优化调控、装置研制等几个方面的基础上, 结合电力电子器件本体及其串并联技术的发展, 从交交变换、交直交变换等拓扑方式出发, 研究集小体积、低成本、高效率于一体, 具有多端口、高电压、大容量特性的电力电子设备, 进一步促进柔性多状态开关的推广和普及。

参考文献 References

- [1] 朱正, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 考虑新能源与电动汽车接入下的主动配电网重构策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 82-88.
ZHU Zheng, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Strategy of distribution network reconfiguration considering wind power and electric vehicle integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 82-88.
- [2] 丁明, 石雪梅. 新能源接入对主动配电网的影响[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 76-84.
DING Ming, SHI Xuemei. Effect of new energy paralleling to the active distribution networks[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 76-84.
- [3] 霍群海, 栗梦涵, 吴理心, 等. 柔性多状态开关新型复合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 166-170.
HUO Qunhai, SU Menghan, WU Lixin, et al. Compound control strategy for flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 166-170.
- [4] 杨欢, 蔡云蔚, 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): 1-13.
YANG Huan, CAI Yunyi, QU Zisen, et al. Research on key techniques and development trend of soft open points for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 1-13.
- [5] GE S Y, XU Z Y, LIU H, et al. Flexibility evaluation of active distribution networks considering probabilistic characteristics of uncertain variables[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2019, 13(14): 3148-3157.
- [6] NAOTAKA O, MASHIRO T, HIROMITUS S, et al. Development of a 6.6 kV-1 MVA transformerless loop balance controller[C]//International Conference on Power Electronics Specialists. Orlando, USA: IEEE, 2007: 1087-1091.
- [7] GLAAFFR A A, MYRZIK J M A, KLING W L, et al. Intelligent nodes in distribution systems-optimizing steady state settings[C]//IEEE Lausanne Power Technology Conference. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2007: 391-395.
- [8] BARUSCHK A L, MERTENS A. A new 3-phase AC/AC modular multilevel converter with six branches in hexagonal configuration[C]//2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, USA: IEEE, 2011: 4005-4012.
- [9] 刘勃, 孟永庆, 白森戈, 等. 一种新的Y型大功率模块化多电平交变流器及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1764-1776.
LIU Bo, MENG Yongqing, BAI Senge, et al. A novel high-power AC/AC modular multilevel converter in Y configuration and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1764-1776.
- [10] ERICKSONR W, AL-NASEEM O A. A new family of matrix converters[C]//Proceedings of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Denver, USA: IEEE, 2001: 1515-1520.
- [11] 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): 85-87.
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): 85-87.
- [12] 晏阳, 廖清芬, 胡静竹, 等. 基于SNOP的主动配电网多时间尺度优化策略[J]. 电力建设, 2016, 37(2): 125-131.
YAN Yang, LIAO Qingfen, HU Jingzhu, et al. Multi-time scale optimization strategy of active distribution network based on SNOP[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 125-131.
- [13] 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.
- [14] HEGGARTY T, BOURMAUD J Y, GIRARD R, et al. Multi-temporal assessment of power system flexibility requirement[J]. Applied Energy, 2019, 238: 1327-1336.
- [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]//2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia). Busan, Korea: IEEE, 2019: 1205-1212.
- [16] 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.
- [17] KHAMPHAKDI P, SEKIGUCHI K, HAGIWARA M, et al. A transformerless back-to-back (BTB) system using modular multilevel cascade converters for power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 1866-1875.
- [18] KHAMPHAKDI P, NITTA M, HAGIWARA M, et al. Zero-voltage ride-through capability of a transformerless back-to-back system using modular multilevel cascade converters for power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2730-2741.
- [19] 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 of transformerless asymmetric flexible multi-state switch[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3084-3091.
- [20] LIN Z, HU J, LI D, et al. A microgrid variable reactor with filtering function using transformer and inverter[C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju, Korea: IEEE, 2018: 1742-1746.
- [21] CHEN J C, LI D Y, WANG C, et al. Optimized design methodology of SNOP device circuit parameters[C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju, Korea: IEEE, 2018: 2403-2407.
- [22] 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.
- [23] MIURA Y, MIZUTANI T, ITO M, et al. A novel space vector control with capacitor voltage balancing for a multilevel modular matrix converter[C] // Proceedings of 2013 IEEE ECCE Asia Downunder. Melbourne, Australia: IEEE, 2013: 442-448.
- [24] KAILASH C S, PRERNA J, ROHIT B. Wind power scenario generation and reduction in stochastic programming framework[J]. Electric Power Components and Systems, 2013, 41(3): 271-285.
- [25] 王 群, 董文略, 杨 莉. 基于 Wasserstein 距离和改进 K-medoids 聚类的风电/光伏经典场景集生成算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2654-2661.
- WANG Qun, DONG Wenlue, YANG Li. A wind power/photovoltaic typical scenario set generation algorithm based on Wasserstein distance metric and revised K-medoids cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2654-2661.
- [26] MA J, SILVA V, BELHOMME R, et al. Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 200-209.
- [27] 詹勋淞, 管 霖, 卓映君, 等. 基于形态学分解的大规模风光并网电力系统多时间尺度灵活性评估[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3890-3898.
- ZHAN Xunsong, GUAN Lin, ZHUO Yingjun, et al. Multi-scale flexibility evaluation of large-scale hybrid wind and solar grid-connected power system based on multi-scale morphology[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3890-3898.
- [28] GAO S, LIU S, ZHAO X, et al. Flexible and economic dispatching of AC/DC distribution networks considering uncertainty of wind power[J]. IEEE Access, 2019, 7: 100051-100065.
- [29] TENG Y, WANG Z D, LI Y, et al. Multi-energy storage system model based on electricity heat and hydrogen coordinated optimization for power grid flexibility[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2): 266-274.
- [30] 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.
- [31] 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): 150-160.
- LÜ 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): 150-160.
- [32] LI Y, PEI X, CHEN Z, et al. The steady-state and fault ride-through control strategies of soft normally open point in distribution network[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, USA: IEEE, 2018: 1146-1150.
- [33] LI Y, PEI X, KANG Y, et al. Voltage support strategy of SNOP under fault circumstance[C] // 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anaheim, USA: IEEE, 2019: 1146-1149.
- [34] SHAFIK M B, CHEN H, RASHED G I, et al. Adequate topology for efficient energy resources utilization of active distribution networks equipped with soft open points[J]. IEEE Access, 2019, 7: 99003-99016.
- [35] 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, 2019: 1.
- [36] 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.
- [37] LI P, JI H R, WANG C S, 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.
- [38] 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.
- [39] 阙 波, 李继红, 汪楠楠, 等. 基于桥臂阻尼的柔性直流故障快速恢复方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 85-91.
- QUE Bo, LI Jihong, WANG Nannan, et al. Arm damping based quick recovery scheme for flexible HVDC fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 85-91.
- [40] 连建阳, 邱德锋, 姜田贵, 等. MMC 拓扑无变压器并网存在的问题和解决措施[J]. 浙江电力, 2019, 38(1): 53-57.
- LIAN Jianyang, QIU Defeng, JIANG Tianguai, et al. Existing problems and solutions to MMC topology without grid integration of transformer[J]. Zhejiang Electrical Power, 2019, 38(1): 53-57.
- [41] 高 凯, 阳岳希, 张艳军, 等. 适用于城市电网的柔性环网控制器拓扑方案研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 78-85.
- GAO Kai, YANG Yuexi, ZHANG Yanjun, et al. A topology research of flexible looped network controller suitable to urban power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 78-85.
- [42] 王守相, 刘 琪, 薛士敏, 等. 直流配电系统控制与保护协同关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 23-30.
- WANG Shouxiang, LIU Qi, XUE Shimin, et al. Key technologies and prospect for coordinated control and protection in DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 23-30.
- [43] LUO Y, YI P, XIONG X, et al. DC fault ride-through method for full-bridge MMC-based MTDC systems[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16(3): 3175-3179.
- [44] 杨卫刚, 宗文志, 姜喜瑞, 等. 厦门±320 kV/1 000 MW 柔性直流输电换流阀及阀控制保护系统设计和工程应用[J]. 智能电网, 2016, 4(3): 250-256.
- YANG Weigang, ZONG Wenzhi, JIANG Xirui, et al. Design and engineering application of IGBT valve and valve control and protection system for Xiamen ±320 kV/1 000 MW flexible HVDC[J]. Smart Grid, 2016, 4(3): 250-256.
- [45] 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 multi-state switch in the case of feeder fault[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3050-3058.
- [46] 张释中, 杨艳红, 裴 玮, 等. 不同端口柔性多状态开关对配电网运行调控能力的研究及对比分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3120-3129.
- ZHANG Shizhong, YANG Yanhong, PEI Wei, et al. Research and comparative analysis of different port flexible multi-state switches for regulation and control of distribution network operation[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3120-3129.



YANG Yong
Ph.D., Professor



XU Feng
Ph.D.
Senior engineer
Corresponding author

杨 勇

1968—, 男, 博士, 教授级高工
主要从事微电网、直流输电、直流配电等方面的研究工作

许 烽(通信作者)

1988—, 男, 博士, 高工
主要从事直流输电技术、大规模电力电子技术
在电网中的应用方面的研究
E-mail: xuf_1988@163.com