

含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述

李婷¹, 胥威汀¹, 刘向龙², 向月², 刘俊勇², 朱觅¹, 杨新婷¹, 李奥¹

(1. 国网四川省经济技术研究院, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了解决含高比例可再生能源的交直流混联电网供电问题, 提出了电网规划的研究框架。首先总结了含高比例可再生能源的交直流混联电网的结构形态特性, 围绕多重不确定性和电力电子化两个关键驱动因素, 指出了系统规划在场景提取、规划建模、优化策略和运行模拟等方面面临的新挑战。从五个方面评述了国内外研究成果, 包括源网荷储协同规划建模、不确定性场景构建、复杂交直流网架优化、换流设备配置优化以及潮流分析。最后, 结合交直流混联电网在能源市场交易中的优势, 展望了电网规划研究中的关键研究点。

关键词: 交直流混合; 高比例可再生能源; 规划; 潮流; 换流器

Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy

LI Ting¹, XU Weiting¹, LIU Xianglong², XIANG Yue², LIU Junyong², ZHU Mi¹, YANG Xinting¹, LI Ao¹

(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To solve the power supply problem of AC/DC hybrid power grid with high proportion of renewable energy, the research framework of power grid planning is proposed. It firstly summarizes the structure profile of the AC/DC hybrid power grid with high proportion of renewable energy. Considering uncertainty and more power electronics' integration, new challenges for planning in scenario extraction, planning modeling, optimization strategies and operational simulation are indicated. Five aspects on the research are discussed, including "generation-network-storage-load" collaborative planning, uncertain scenario construction, AC/DC grid optimization, converter equipment configuration and power flow analysis. Finally, with the advantages of AC/DC hybrid power grids in energy market transactions, the key research points are prospected.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSCJY00GHJS1800026).

Key words: AC/DC hybrid; high proportion of renewable energy; planning; power flow; converter

0 引言

推动清洁可再生能源逐步替代化石能源, 是人类社会实现能源与经济可持续发展的重大战略需求。清洁可再生能源普遍具有间歇性与波动性, 高比例接入时, 其不确定性与时空分布特性给传统交流系统的安全稳定运行带来了巨大的挑战, 同时也阻碍了清洁可再生能源的长距离外送及就地消纳。近年来, 随着电力电子技术的不断发展, 直流技术在可再生能源并网、传输、消纳等方面的优势不断

凸显。

在高压侧, 由于直流系统不存在功角稳定问题以及无功问题, 无需跟踪频率与电压相角变化, 柔性直流技术又可进一步实现有功功率和无功功率的快速解耦控制, 不增加系统短路容量且能迅速实现潮流反向, 已在大规模异步电网互联^[1]与电力交易^[2]、电能超远距离传输与调度^[3]、风电场/光伏阵列集中并网^[4]等方面取得了广泛应用。

在低压侧, 直流系统中电压源型换流器、直流软开关、电力电子变压器等柔直电力电子装置, 赋予了配电网灵活的分区潮流路由能力^[5], 可为负荷中心提供动态无功支撑^[6], 在应对分布式电源出力波动等方面优势明显。另外, 直流型电源和直流负

荷直接接入直流系统,可大幅减少转换损耗^[7],降低网架复杂度。

考虑到传统电力系统的交流电源以及交流负荷还将长期存在,从技术经济以及充分利用原有交流配电系统存量资产的角度出发,交直流混合将是电力系统适应未来可再生能源高比例接入的重要发展方向。然而,风能、太阳能等间歇性可再生能源的高比例接入将极大改变系统特性^[8],交直流混联电网的运行方式也与传统交流系统有本质区别,致使现有的规划技术面临巨大挑战,在可再生能源低渗透率接入、系统中直流成分少、电力电子化程度低时,电力系统的特性及稳定机理均有成熟的理论及实践基础,因此这种情况下电力系统配置规划需要解决的关键技术问题是:如何为可再生能源电力系统的随机性提供备用^[9]。然而由于分布式能源的时空分布特性^[10]、不确定性以及电力电子设备惯性小、控制模式多^[11]等特点,可再生能源高比例接入和高度电力电子化将使系统的特性、运行方式、稳定机理甚至继电保护机理等均发生巨大变化。随之而来的是电力系统灵活资源不足、源荷界限模糊控制难度大、电力电量平衡概率化、系统稳定性减弱等问题,另外在源端强波动性、随机性与荷端大量含源负荷的共同作用之下,输配电网络的规划与运行特征也将发生根本性变化,传统的规划设计原则、供电能力、可靠性和经济性评估方法已不再完全适用,需从交直流混合配电网的运行特点和相互影响关系出发,重点研究交直流混联电网规划的核心问题。

本文首先介绍了交直流混联电网相比于传统交流系统的结构形态特性和运行特征,结合可再生能源高比例接入给系统带来的强不确定性场景,指出了规划技术面临的新挑战;从源网荷储协同规划、交直流混合潮流分析、不确定性场景建模、交直流混联电网网架优化、换流设备选址定容四个方面分析了含高比例可再生能源的交直流混联电网规划的关键技术。

1 技术特征及挑战

1.1 系统结构形态特性

与传统交流系统相比,含高比例可再生能源的交直流混联电网最显著的特征是电力电子化,电力电子器件卓越的控制能力和灵活的电量转换特性,不但满足了可再生清洁能源大规模集中并网或高渗透率分散接入的要求,也迎合了未来用户电能质量和用电形式定制等多样化用电需求,因此除了各类并网装置,电能质量控制装置、固态开关、直流变

压器等也应用了电力电子技术。随着固体电子技术与碳化硅等宽禁带半导体新材料技术的快速发展,这些电力电子器件的集成化、模块化程度越来越高,如集合多种电能质量控制技术的统一电能质量控制器、分布式电源变流系统与电能质量控制相融合的逆控一体机、多功能逆变器以及电力电子变压器等^[12],电力系统的“源、网、荷、储”都不同程度地加速了电力电子化进程。

在可再生能源高渗透率接入和电力电子化的双重驱动下,交直流混合的电力系统结构形态发生了巨大的变化,主要表现为以下几点。

1) 自然潮流变为可控潮流:传统交流系统潮流按阻抗大小自然分布,系统中的机械、电磁设备对潮流分布的调节能力很弱;交直流混联电网中,由于柔直换流装置普遍具备有功、无功功率解耦控制、双向功率控制,并可实现一定程度的电能质量治理,系统可控性大幅提升,可通过调节各类换流设备的控制模式及控制量参考值改变潮流分布。

2) 源、荷界限模糊化:在供电侧,除传统电源和可再生能源之外,储能和电动汽车等具备双向功率互动能力的负荷也可作为柔性电源参与系统的运行调节;受电侧,具备主动响应能力的负荷也不断涌现,以满足用户参与电力市场和系统管理的新需求。

3) 输配系统功能边界趋同:交直流混联电网中,源、荷在各个电压等级均可实现集中式接入和分散式多点接入,潮流双向特征明显,与传统交流系统相比,输配电网络都能在更大范围内实现能源外送和就地消纳的灵活转变,输配电网络功能不再固定、边界模糊。

4) 多重强不确定性:交直流混联电网为分布式电源、各类新型负荷提供了即插即用接口,由于可再生能源的大规模分布式接入,电源出力波动超过负荷波动成为系统不确定性的最主要来源,同时,在市场因素影响下,需求侧响应、微网组网交易等负荷波动影响环节更加多样。另外,由于交直流混联电网的组网模式与换流设备的控制模式密切相关,设备特性的漂移和组网结构参数的变化也给系统带来了新的不确定性。

5) 系统稳定运行机理更加复杂:交直流混联电网中大量电力电子装置的使用,使得系统频带大幅拓宽,系统惯性变小、短路容量变小,功角稳定、电压稳定过程缩短,次同步振荡与超同步振荡也逐步显现,振荡频率由低频向高频移动,这主要是由电力电子设备控制响应时间普遍极短造成的。

6) 传统电力系统保护不适用:交直流混联电网

对提取故障特征、保护动作速度要求高,而电力电子装置短路后模型与现有交直流系统装置短路后模型差别大,现有算法与之不匹配;同时由于交直流混联电网的潮流双向可控,加大了保护选择性及保护配合的实现难度,导致部分现有保护装置不再适用^[14]。

1.2 传统规划技术面临的挑战

可再生能源高比例接入和交直流混合带来的电力电子化发展,使系统的能源格局和物理特性发生了深刻的变革,规划作为支撑系统可靠、安全、经济、灵活运行的基础性工作,需要充分考虑系统运行的各类工况及不确定性。基于运行环境、设备参数选项、负荷预测数据以及供电结构等已有的网络信息,综合考虑功率平衡、网络安全、发电机出力限制以及换流器自身约束等条件,对规划方案的经济性、可靠性、环境适应性和供电能力进行综合评估。通过优化配置方法从交直流输电线路的网架结构、分布式电源的容量和接入位置、换流设备的容量和接入位置以及多端口换流设备的端口参数等所有预选配置方案组合中确定最优的配置组合,达到获得最大的经济效益、损耗最小、清洁能源使用率最高等目标。在交直流混合的高比例可再生能源系统中,传统规划技术主要面临以下几个方面的挑战。

1) “源网荷储”互动耦合特性凸显,系统各部分规划需要协调进行:依靠交直流混联电网的可控性优势,电力系统可以实现源-网-荷-储协同优化运行,传统规划方法中电源与网架分开优化计算将导致电源与网架配置不匹配,实际运行时容易出现运行阻塞及弃光弃风现象,另外,储能和负荷侧的主动响应在电力电量平衡中的作用也不断凸显,对系统健康运行的影响更加复杂,需要研究源-网-荷-储协同规划方法。

2) 运行方式多样化,场景构建需要计及源荷不确定性:在波动性可再生资源高比例接入场景下,依靠选取特定极端工况、留足容量裕度的规划方法不能有效解决电力电量平衡概率化问题,而且所得方案未计及可再生能源波动性对电网运行成本的影响,最优方案的经济性和灵活性不足,传统的电力系统规划可以通过若干种典型的运行场景进行评估,而未来电力系统在强不确定性环境下,系统运行方式多样化,需要对系统运行场景进行全面评估,才能掌握电网规划方案的可靠性、经济性和适用性,因此需要研究计及多重不确定性场景的提取方法。

3) 系统可控性增强,运行模拟需要更加精细:交直流混联电网中潮流不再是简单的自然分布,受换流设备控制模式影响较大,运行状态和控制方式

对运行成本的影响增大,运行工况与规划方案的耦合更强,同时,可再生能源高比例接入场景下,系统多点潮流波动显著,规划方案需计及可再生能源波动性对电网运行成本的影响,因此需要研究计及换流设备控制模式影响的运行模拟。

4) 系统结构更加复杂,规划建模与求解需要更加灵活:交直流混合的可再生能源系统是一个结构复杂、变量影响因素及不确定性繁多的系统,而规划设计又需要满足多电源供电、多落点受电、直流线路之间可自由连接、互为冗余等条件,建立规划模型时需要处理不同范围内、不同时间尺度下、系统内外的大量数据,用以建立、修正数学模型、约束条件及目标函数。因此,如果在这种复杂系统的决策和优化中仍然使用整体、统一、无差别分析和求解方法,将导致系统优化和仿真的计算量过大、系统建模变量的维数灾等问题的出现,给求解计算带来巨大的难度。

2 关键技术及应用综述

2.1 源-网-荷-储协同规划

传统的电网规划是将电源优化与网架结构优化分开进行的,这是在源端波动性小的情况下为了减小模型规模的常见做法。然而,随着强不确定性可再生能源的高渗透率接入以及用户侧含源负载互动性的增强,电源配置优化与网架配置优化分开进行的问题逐渐凸显,文献[13]指出电源与网架分开优化的不匹配不协调是弃风弃光现象的重要原因,学者们已经意识到这一问题并进行了研究,如文献[14]提出了考虑分布式电源的网源协同规划模型,并在实际大规模系统中测试;文献[15]提出了考虑调节机组与电网规划相结合的网源协同规划模型。文献[16]提出了同时计及风电随机性和模糊性的源网荷协同规划模型。

“源-网-荷-储”协同规划也包括源-源协同与网-网协同,源-源协同规划即分布式电源间的互补配置优化,比如目前技术较成熟的风光互补规划,这种互补配置的基本思路是考虑分布式风电、光伏电池等间歇性分布式电源的输出功率及系统负荷功率的概率分布在时空范围内的差异性和互补性,采用解决包含随机变量的优化方法在一定时间段内实现电压波动量最小、分布式能源利用比例最高等目标,比如文献[17]基于拟牛顿法建立了微网风光互补的优化模型,文献[18]则通过划分时段并根据每个时段内间歇性分布式电源与系统负荷功率的概率分布,以间歇性分布式电源投资与售电、系统降损、电压质量以及废气减排量等综合效益为目标函数,

采用机会约束规划方法建立整个时段内间歇性分布式电源的最优配置模型。分布式电源协同规划可在提高可再生能源利用效率和节能减排的同时,使系统运行电压的稳定概率和经济性达到综合最优。源-储协同规划功能与之类似,也是为了减小分布式电源输出波动对电力系统的影响,比如文献[19]采用频谱分析法对目标输出功率进行了分析,考虑储能系统充放电效率与SOC约束,建立了以平抑波动和储能配置容量最小为目标的风-光-水-储互补配置模型。网-网协同规划主要指输电网与配电网的协同规划,目前中国各电压等级的所有者不同,输电网和配电网的管理部门不同,不同微网也不一定由相同所有者规划设计,而网络之间的协调程度是交直流混联电网安全性与经济性的重要基础,各级电网应相互支援,协调优化规划,确保电网的可靠性和经济性,避免不同电压等级电网之间容量不匹配、供电能力不协调等问题。在交直流混合框架下探索输配网协同规划的研究还比较少,更鲜有在交直流混和框架下研究微网间的协调规划,但是交流系统中输配网协同规划的一些方法和思想值得借鉴。如文献[20]将最短路遗传算法用于多个电压等级的纯开环输配电网进行综合规划,并给出了开环与非开环混合的输配电系统综合规划问题的近似解决方法。文献[21]提出以提高总体运行均衡性为目标的电网规划思想,其利用约束圆协调规划范围的方法改进了传统的选址优化方法。源-荷协同规划则主要研究需求侧响应或管理机制对负荷侧灵活性的激发效果,从而能够最大程度降低灵活性需求,减少灵活性资源规划的压力。

解决交直流混联电网中的源网荷储协同规划问题,一般有两种思路。

第一种是先将复杂大系统进行分区,对每个子系统进行规划求解,然后再协调子系统的优化结果得到大系统整体的最优配置,交直流混联电网中,可以通过节点等效实现交流子网和直流子网的解耦,进而分别独立研究交、直流子系统的网络结构优化、最优供电路径问题,对多目标组合规划问题进行分层,可以降低模型求解的计算难度,以交直流网络联络边界上的换流器电气量交换为桥梁,用交替求解法取代递阶模型中的协调方程实现交直流迭代计算,协调交、直流子系统优化结果得到混合系统整体最优配置。

第二类则是将优化问题视作嵌套的组合规划问题,根据规划问题的数学类型对整体规划问题进行分层分解,比如将交直流混合配网的优化配置问题分解为混合整数规划的最优线路组合问题与非线

性规划的最优潮流问题进行嵌套迭代。

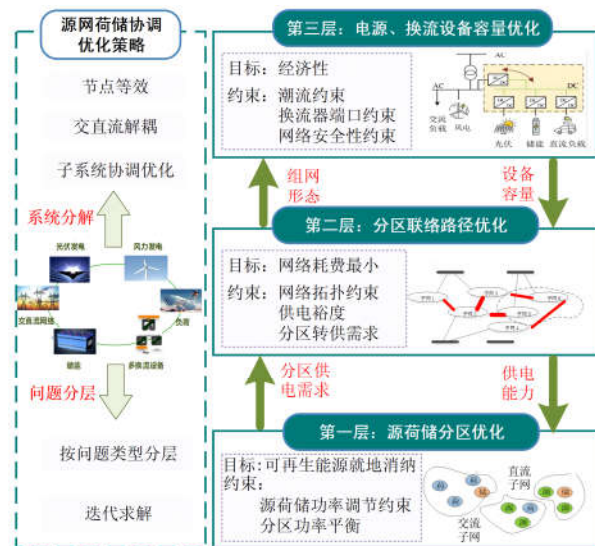


图1 交直流混联电网中源网荷储协调规划方案

Fig. 1 Scheduling scheme for source network storage and storage in AC/DC hybrid system

实际操作中,往往采取两种思路兼具的协调优化配置策略,即系统结构分解与优化问题分层相结合。如图1所示,可将交直流混联电网中的源网荷储协调配置模型分为以下几个层次:第一层模型以可再生能源就地消纳为目标,以源-荷-储的功率调控范围、分区内的功率平衡为约束,实现各分区内源-荷-储的优化组合;第二层模型以可再生能源在分区内互联系统中的消纳以及降低网损为目标,以分区转供需求、换流设备的功率控制范围和网络拓扑为约束,实现交/直流分区供电路径优化;第三层模型以经济性为目标,以潮流平衡、换流设备端口传输功率约束和网络安全条件为约束条件,实现可再生能源发电和换流设备的容量优化。基于该模型,考虑可再生能源及负荷的不确定性,建立规划场景集,结合启发式算法和智能优化算法,再各场景下对三层规划模型进行迭代求解,最后获得系统优化配置方案。

2.2 高比例可再生能源出力不确定性场景建模方法

处理电网规划中的不确定性因素主要有两类方法,随机规划方法和鲁棒规划方法。

随机规划方法主要通过建立规划场景集描述不确定性因素,一般步骤为首先根据功率预测误差的概率分布,使用蒙特卡洛、拉丁超立方等方法生成一系列可能的运行场景,最后对这些存在耦合约束的不确定性等价模型进行求解,优点是场景集可以描述多种不确定性之间的关联关系,缺点是低频事件

随机特性难以获取, 需要的输入条件多, 处理过程繁琐。

鲁棒规划主要通过不确定集合描述不确定性因素, 使用鲁棒优化方法的配置规划模型一般为三层: 上层目标函数为投资费用、运行费用最小, 决策变量为设备投资整数型变量, 以确定线路投资方案; 中层目标函数为运行费用最大, 以确定上层投资方案下的最差运行场景, 决策变量为分布式电源出力等不确定性因素; 下层目标函数为运行费用最小, 是确定在上层投资方案下的最差场景中最优潮流问题, 优点是不需要不确定参数的概率分布, 求解规模与随机规划相比相对较小, 而且鲁棒优化方法所得规划方案的鲁棒特性可抵抗恶劣场景, 但缺点是日前规划领域使用的鲁棒优化方法还处于初级阶段, 其不确定性集合还不能精确表征不确定因素之间的相关性。

处理交直流混合系统中可再生能源高渗透率场景下的不确定性问题时, 上述两类方法主要面临如下两个方面的问题。

1) 多种不确定性因素之间的关联耦合需要深度挖掘: 含高比例可再生能源的交直流混合系统, 运行方式多样, 同时由于交直流混合系统的控制特性, 多种不确定性因素之间的耦合关系更加复杂, 在源荷两端多重不确定性条件下, 需要研究高比例清洁能源出力的不确定性特征, 通过挖掘源荷波动数据建立发电出力典型场景, 研究电网“净负荷”特性, 建立高比例清洁能源接入下“源荷”关联与电力电量平衡定量评估模型。

2) 边界场景需要精细化表征: 不确定性较弱时, 选取极端工况作为规划边界场景, 既充分保证了规划方案的可靠性和鲁棒性, 同时使计算模型规模小、求解难度低, 而在可再生能源高比例接入的强不确定性环境中, 这种方法将导致方案经济性太差, 另一方面, 运行场景过多, 又会导致模型规模太大求解困难, 因此需要研究兼顾模型准确度和复杂度的场景提取方法, 更加精细地刻画规划边界。

基于以上两个方面的考虑, 随机规划的场景分析方法更适合在高比例可再生能源场景中处理不确定因素。同时, 也有不少研究对随机规划方法做了更多的改进, 如文献[22]使用蒙特卡洛方法对设备的随机故障进行了模拟, 进而将设备故障这一不确定因素转化为约束条件加入交直流混合微网的规划模型。文献[23-24]通过随机生成大量的运行场景再进行简化聚类, 获得各类运行场景的典型方式及运行时间, 精确描述了不确定性因素对运行费用的影响。文献[25]则在构建优化配置的目标函数时考虑

了不同场景出现的概率, 也有文献[26]使用机会约束规划方法解决考虑源荷不确定性的规划问题, 但是计算繁琐。

2.3 交直流混联电网潮流分析

交直流混联电网中, 运行控制模式对规划场景的运行成本影响增大, 不能简单地通过选取典型运行方式的方法作为规划场景, 而需要进行更加精细的运行模拟, 潮流分析是其中最重要的一环。

目前交直流混联电网的潮流算法可大致分为两类: 统一迭代法与交替迭代法, 前者是牛顿法在交直流系统中的延伸, 即把交流系统的修正方程与直流潮流方程作为一个整体进行牛顿法迭代, 最终统一得到交流变量与直流变量, 这种算法收敛性好, 但是由于迭代的每一步都要重新计算修正方程雅可比矩阵的每一个元素, 因此计算量很大且计算效率低。交替迭代法通过交流系统与直流系统解耦的方法, 实现了交流网络潮流方程与直流网络潮流方程分开求解、交替迭代, 明显降低了计算量, 但缺点是收敛性相比统一迭代法要差。

在这两种算法的基础上, 国内外学者在围绕提高算法准确度和收敛性的同时降低计算复杂程度而展开算法优化, 优化工作主要包括如下几个方面。

1) 换流器模型方面: 在多端直流的交直流混联电网中使用交替迭代法时, 通过诺顿法把换流器等效为一个电流源以实现用一个多端口直流输电网络代替一个多端直流网络, 而后者可利用电路多端口网络理论解决其潮流计算问题。文献[27]建立了含有多个交流网络和多个直流网络的多端VSC-HVDC网络模型, 并且在算法中考虑了换流器自身的功率损耗, 使其算法更接近实际的工程应用场景。文献[28]推导了VSC的三相不平衡潮流模型, 并以此为基础建立DC/DC转换器的潮流计算模型。

控制方程是换流器稳态模型的核心, 不同种类的换流器控制参数不同, 电流源型换流器的控制模式一般包括定电流控制、定电压控制、定功率控制、定控制角控制和定变比控制。文献[29]详细讨论了上述几种控制方式, 提出了能够解决电压越限并减少直流侧无功需求量的改进措施, 并且给出了控制策略转换时的潮流计算方法和处理方式。电压源型换流器的控制方式更加多样, 既可以实现给定控制目标运行即直流侧和交流侧各保证一项参数为恒定值, 也可以进行下垂控制即保持直流功率和直流电压或者直流电压与直流电流关系曲线为一条斜率不变的直线。合理选择换流器的控制方式组合, 有利于提高交直流互联系统的运行效率, 但是换流器控制策略越多, 潮流计算的程序设计也就越复杂, 这

主要是由于在不同的控制方式下, VSC 注入交流侧的功率计算方法也不相同。文献[30]梳理了 VSC 主要的四种控制策略, 并说明了每一种控制策略的接口方程, 即 VSC 注入交流系统功率在不同控制策略下相对应的求解方程。

2) 算法方面: 文献[31]提出的方法解决了在某些控制方式下直流系数矩阵不可逆的问题, 使得交替迭代法的应用场景得到推广。文献[32]通过增加不同控制方式下交直流系统互联的接口方程, 实现了基于等值功率注入的交直流系统解耦方案, 改善了交替迭代法由于忽略交直流系统耦合关系造成的潮流不收敛。也有学者围绕统一迭代法开展算法优化, 统一迭代法的主要缺陷是计算雅克比矩阵的过程复杂、计算量大; 而且当系统中含有多个换流器, 每个换流器又有多种控制方式时, 雅克比矩阵的计算量又会成倍增加, 针对这一问题, 文献[33]提出的部分消去法, 即把触发角作为唯一的直流变量, 且把流入直流侧的功率视为已知量, 有多少个换流器就增加相同数目触发角表示的计算方程, 由此解决了运行方式改变时, 修正方程需要重新列写的问题。文献[34]则采用了另外一种思路解决了这一问题, 即根据换流器不同的控制策略把所有的直流参数全部列入修正方程中, 这样, 当系统运行方式发生改变时, 修正方程对应的雅克比矩阵的维数不会发生改变, 只在特定位置修改其元素即可, 这种方法更易编程实现。

当满足输电线路电抗远远大于电阻、线路首末两端电压相位差不大且节点无功功率对应的导纳远小于该节点自导纳虚部时, 纯交流系统的潮流可采用由极坐标下牛顿法简化而来的 PQ 分解法进行计算。相比牛顿法, PQ 分解法内存占用少、计算效率高且改善了牛顿法对初值选取要求苛刻的缺陷。在交直流混联电网中, 如果系统参数也满足以上的简化条件, 则交直流潮流的纯交流部分也可以采用相同的简化方法, 使得交替迭代法的计算量进一步减小。文献[35]将布罗伊登法(Broyden)用于潮流计算, 显著提高了计算效率, 但是 Broyden 与潮流计算的结合需在已知潮流收敛的前提下进行, 而交替迭代法的收敛性受交直流耦合程度以及运行方式等影响, 因此在实际应用时有不少限制, 为了提高交替迭代法的收敛性, 文献[36]提出了最优乘子算法, 在交替迭代时引入了最优乘子修正步长。文献[37]也是用同样的方法较好地处理了一些病态潮流。

2.4 复杂交直流混合网架结构优化

直流系统的引入为源荷储的接入、互联方式提

供了更多的选择, 因此与传统交流系统相比, 交直流混联电网的网架结构也更加多样。在高压侧, 由于 HVDC(High Voltage Direct Current Transmission)系统传输容量大、占用通道小的特点, 输电网由网对网式互联向通道式互联转变, 简化了网架拓扑, 提高了传输效率; 低压侧, 交直流混联电网中源荷储的分区供电结构和接入方式更加丰富, 文献[38]列出了低压侧交直流混联电网的主要网架结构, 详细对比了这些结构的优缺点。

交直流混联电网网架结构优化的研究框架如图 2 所示。首先, 需要对交直流基本组网模式和系统源荷不确定性进行建模, 源荷储的接入方式和分区供电结构是网架配置优化的基础条件, 即在确定网架拓扑之前需要解决源荷储通过交流接入还是通过直流接入、通过微网接入还是直接接入、接入何种交/直流电压等级的问题, 交流子网与直流子网之间的互联方式也成为新的变量。不同的负荷对于供电能力、电能质量以及可靠性的要求不同, 文献[39]指出, 不同的负荷对于供电能力的要求不同。一般来说, 直流负荷相较交流负荷对电能质量和可靠性的要求更高, 而不同种类的直流负荷(交流负荷)对供电能力的要求又不尽相同, 另外, 不同种类的分布式电源对接入系统的要求也不尽相同; 源荷储优化分区就是在功率平衡的基础上, 考虑各区电能交互需求、供电方式与电能质量需求以及系统转供能力, 确定最佳的电压等级、源荷储分布位置以及配电网分区结构。

网架结构的建模则主要描述系统中每个节点每条支路的交/直流配置, 需要结合源荷储的分区情况, 利用网络图论将网架抽象为顶点与边集合组成的有向加权网络图, 并通过关联矩阵等数学语言进行描述^[24,40]。比如文献[24]中作者利用关联矩阵、节点类型(交流/直流)向量、支路类型(交流/直流)矩阵三个二进制矩阵描述交直流网络配置。也有文献[40]用关联矩阵、传输需求矩阵、路径损耗与输电量向量更全面地描述了直流子系统的网络结构配置, 直流子系统中, 换流站或直流开关站均记为节点, 由此引出了直流供电路径的定义, 即按照传输方向从起始节点到终止节点, 由直流节点与端对端线路组成的一条传输通路, 直流供电路径的实数权则为输电正方向上的线路耗费和输电量, 都用向量表示, 线路耗费包括线损、运行维护费用、过网费用等, 输电量包括实时传输功率、交易电量等。然后, 考虑分布式电源和负荷的预测与概率分布, 用随机规划的方法结合聚类技术建立规划场景集。

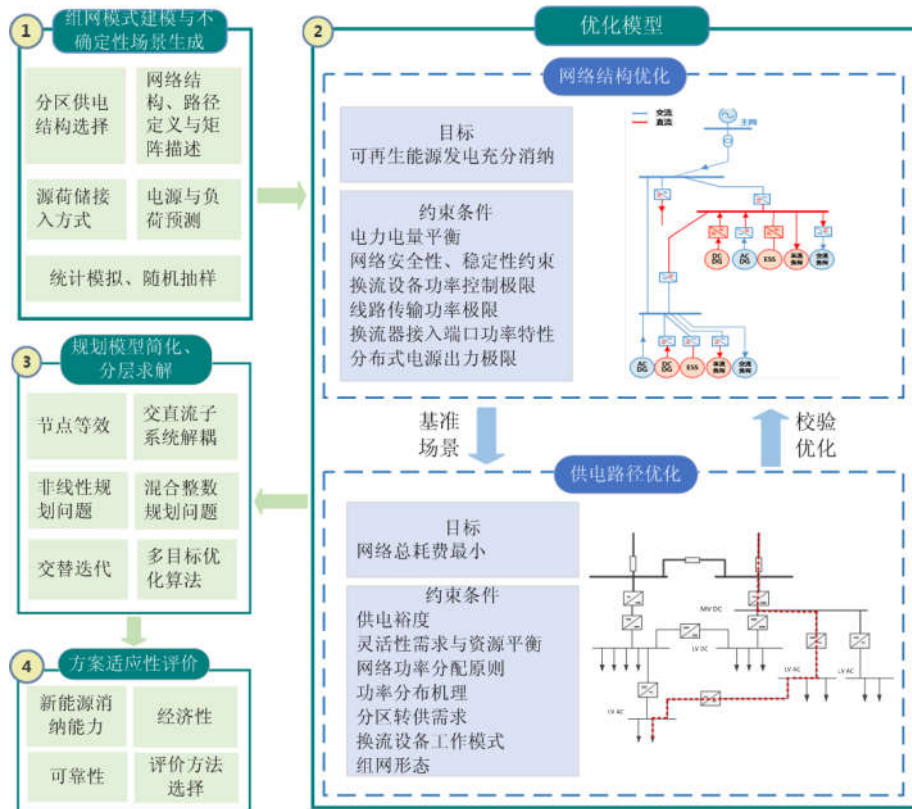


图 2 交直流混联电网网架结构优化研究框架

Fig. 2 Research framework for grid structure optimization of AC/DC hybrid system

同时,以交直流混联电网建设运行的总成本最小以及可再生能源使用比例最高为目标,考虑节点连接数量、发电设备输出功率限制、网络安全约束、换流器自身约束等条件建立优化模型;供电路径优化是嵌套在网络结构优化中的子优化问题,在交直流混合网络中,由于电力电子的换流设备可以主动分配端口功率从而影响网络功率分配,所以运行优化的操作对象不再是简单的分段开关与联络开关,还应考虑换流设备端口的工作状态。因此,交直流混联电网规划层面的路径优化就是计算在不同的时序概率场景下,满足网络运行经济性目标的一组最优开关、换流设备端口工作状态组合。本质上是通过运行模拟为网络结构优化配置提供运行场景校验的过程,供电路径优化以网络流量最优网络运行耗费最小为目标,即考虑供电裕度、分区转供需求、网络功率分配策略以及组网形态建立供电路径优化模型。

不管是网络结构优化模型还是供电路径优化模型,都是含有离散量的复杂混合优化问题。因此需要使用禁忌搜索算法、蚁群算法、基本教学优化算法等搜索效率高的智能算法对模型进行求解,或根

据规划问题类型的不同对优化模型进行分层迭代求解,也有学者^[41]提出可以根据节点等效对系统实现子系统解耦并分解协调计算,达到简化模型的目的。最后,需要对网架结构配置方案进行综合评价,继而做出决策。

2.5 换流设备优化配置

换流设备在交直流混联电网中承担了交直流电量转换和电能路由的关键角色,是交直流混联电网能够实现灵活组网、高效接入新能源的重要原因。因此,换流设备的配置也是交直流混联电网规划的核心内容,换流设备的种类众多,大致可分为电流源型(Current Source Converter, CSC)和电压源型(Voltage Source Converter, VSC),前者只具备单一的整流功能和逆变功能,而后者将整流逆变功能集成并可实现双向自由转换。文献[42]梳理了换流设备的发展脉络,随着脉宽调制技术、固态开关技术、多端口多级联变换器协调控制技术、分级通信以及端口即插即用技术的发展,柔直装置演化出了更多的形态和功能,比如智能软开关(Soft Open Points, SOP)、电力电子变压器(Power Electronic Transformers, PET)、能量路由器(Intelligent Energy Management,

IEM),从新能源并网装置到网络柔性互联装置再到能量管理的主要调控设备,换流设备在交直流混合DER系统中的角色也不断丰富,形态上,换流器也从双端口向多端口演化。

目前换流设备优化配置采用的方法主要借鉴变电站选址定容、中压柔性直流环网控制装置选址定容、直流落点选择等领域的方法,比如文献[43-45]将多馈入直流短路比引入多端口换流器的规划综合评价指标体系进行选址定容配置;文献[46-47]则忽略换流器的控制特性,将交直两侧均视作普通节点进行换流器的连续型选址。

然而这些方法都不能完全适应交直流混合的分布式可再生能源系统中的换流设备配置,主要原因是交直流混联电网中新型换流设备的配置考虑因素更多,包括与端口控制方式的耦合、与源-荷-储接入的协调、供电结构以及多换流设备之间组合配置策略等。交直流混合的分布式可再生能源系统中,换流设备的配置问题就是换流设备型号、接入方式、接入位置、端口容量和端口控制参数的最优选择,如图3所示,大致内容包括三个方面。

1) 设备的选型:即在设备安全性、可控性、效率、扩展性等方面综合择优选择。

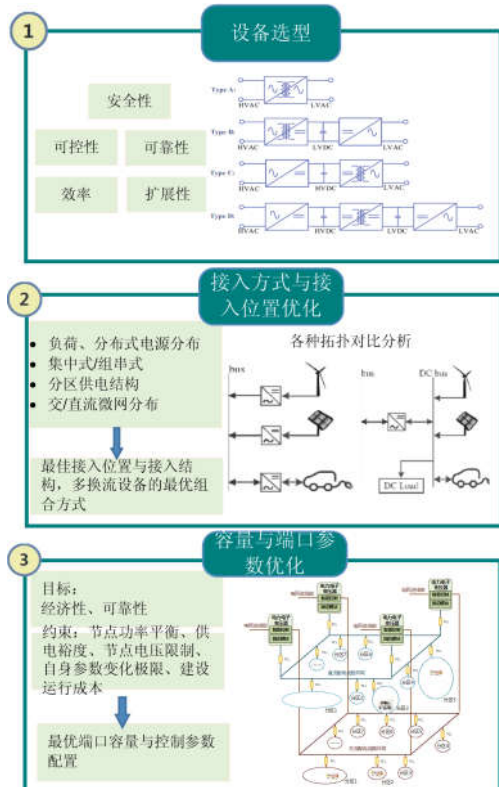


图3 换流设备配置优化研究框架

Fig. 3 Research framework for converter equipment configuration optimization

2) 接入方式与接入位置优化:即考虑网络电力电量平衡、分布式电源与负荷分布情况、交/直流子网的分布情况、换流节点分布式电源与负荷的接入方式(组串式/集中式)、分区供电结构,确定多换流设备接入位置、接入结构的最优组合。

3) 容量与端口参数配置:即考虑节点功率平衡、供电裕度、节点电压限制、建设运行成本、自身参数变化极限等约束,计算符合经济性、可靠性目标的各端口最优容量和控制参数配置。需要指出的是,这三部分并不是分步独立进行的,而是紧密耦合,需要全面考虑。

3 结论与展望

交直流混合的可再生能源系统主要结构形态特征可以归纳为两个方面,一是多重不确定性,二是电力电子化。在规划阶段,前者要求在规划建模时考虑源网荷储的协调,后者则要求在配置优化时考虑规划模型与运行控制方式的关联交互。围绕这两方面的挑战,本文从场景提取、规划建模、优化策略和运行模拟几个角度探讨了交直流混合可再生能源系统规划面临的主要挑战,从源网荷储协同规划建模、不确定性场景构建、复杂交直流网架优化、换流设备配置优化以及潮流分析五个方面,梳理了交直流混合的可再生能源系统优化配置研究的技术发展脉络。

随着可再生能源渗透率的进一步提高和电力电子设备在系统中的持续推广应用,更多规划技术需要被挖掘,比如考虑多重不确定性的系统柔性资源规划、考虑多换流器控制策略组合的精细化运行模拟、基于时序模拟的潮流自动生成、典型运行场景筛选提取算法等。

同时,随着电力能源交易市场机制的不断健全,配置规划过程中需要更多考虑不同利益主体之间的博弈。市场框架下交直流可再生能源系统规划方法的研究或将成为热点。

参考文献

- [1] NANOU S I, PAPATHANASSIOU S A. Frequency control of island VSC-HVDC links operating in parallel with AC interconnectors and onsite generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 454-457.
- [2] LOTFI H, KHODAEI A. AC versus DC microgrid planning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 296-304.
- [3] 翟海保, 李兆伟, 黄慧, 等. 特高压直流分层接入电网的落点选择研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 65-71.

- ZHAI Haibao, LI Zhaowei, HUANG Hui, et al. Terminal location selection study for UHVDC hierarchical connection to power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 65-71.
- [4] WANG L, GAO H, ZOU G. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [5] 张博, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 基于 SOP 和 VSC 的交直流混合配电网多时间尺度优化控制[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(9): 11-19.
- ZHANG Bo, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Multi-time-scale optimization control of AC-DC hybrid distribution network based on SOP and VSC[J]. New Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(9): 11-19.
- [6] 张璐, 唐巍, 梁军, 等. 基于 VSC 的交直流混合中压配电网功率-电压协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6067-6075.
- ZHANG Lu, TANG Wei, LIANG Jun, et al. Power-voltage coordinated control of AC-DC hybrid medium voltage distribution network based on VSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6067-6075.
- [7] HE Y, CHEN Y, YANG Z, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.
- [8] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
- KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework of high proportion renewable energy power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [9] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.
- LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility planning and challenges for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.
- [10] 朱克平, 江道灼, 胡鹏飞. 含电动汽车充电站的新型直流配电网研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 35-41.
- ZHU Keping, JIANG Daozhuo, HU Pengfei. Research on new DC distribution network with electric vehicle charging station[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 35-41.
- [11] 孔力, 裴玮, 叶华, 等. 交直流混合配电系统形态、控制与稳定性研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(9): 1-10.
- KONG Li, PEI Wei, YE Hua, et al. Study on morphology, control and stability of AC/DC hybrid power distribution system[J]. New Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(9): 1-10.
- [12] 赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 等. 电能路由器的发展及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3823-3834.
- ZHAO Zhengming, FENG Gaohui, YUAN Liqiang, et al. Development of power router and its key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3823-3834.
- [13] 程浩忠, 李隽, 吴耀武, 等. 考虑高比例可再生能源的交直流输电网规划挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 19-27.
- CHENG Haozhong, LI Wei, WU Yaowu, et al. Challenges and prospects of AC/DC transmission network planning considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 19-27.
- [14] ROUHANI A, HOSSEINI S H, RAOOFAT M. Composite generation and transmission expansion planning considering distributed generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 62(60): 792-805.
- [15] AGHAEI J, AMJADY N, BAHARVANDI A, et al. Generation and transmission expansion planning: MILP-based probabilistic model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1592-1601.
- [16] 张宁, 胡兆光, 周渝慧, 等. 计及随机模糊双重不确定性的源网荷协同规划模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 39-44.
- ZHANG Ning, HU Zhaoguang, ZHOU Yihui, et al. Source network-loaded collaborative programming model considering random fuzzy double uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 39-44.
- [17] 朱芳, 王培红. 风能与太阳能光伏互补发电应用及其优化[J]. 上海电力, 2009(1): 23-26.
- ZHU Fang, WANG Peihong. Application and optimization of wind energy and solar photovoltaic complementary power generation[J]. Shanghai Electric Power, 2009(1): 23-26.
- [18] 邓威, 李欣然, 李培强, 等. 基于互补性的间歇性分布式电源在配网中的优化配置[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 216-225.
- DENG Wei, LI Xinran, LI Peiqiang, et al. Optimal configuration of intermittent distributed power supply based on complementarity in distribution network[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 216-225.
- [19] 曹蓓. 多能源互补微网的综合优化配置[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- CAO Wei. Comprehensive optimization configuration of multi-energy complementary microgrid[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.
- [20] 段刚, 余贻鑫. 输配电系统综合规划的全局优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 109-113.
- DUAN Gang, YU Yuxin. Global optimization algorithm for integrated planning of transmission and distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 109-113.
- [21] 张勇军, 刘瀚林, 蒋金良, 等. 主网与配电网协调规划的评价指标和规划方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 37-41.
- ZHANG Yongjun, LIU Hanlin, JIANG Jinliang, et al. Evaluation index and planning method for coordination planning of main network and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 37-41.
- [22] 丁明, 史盛亮, 刘新宇, 等. 交直流混合微网优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 17-25.
- DING Ming, SHI Shengliang, LIU Xinyu, et al. Research on optimal configuration of AC/DC hybrid microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 17-25.
- [23] BABOLI P T, SHAHPARASTI M, MOGHADDAM M P, et al. Energy management and operation modelling of hybrid AC-DC microgrid[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8(10): 1700-1711.
- [24] YANG Y, WANG X, LUO J, et al. Multi-objective coordinated planning of distributed generation and AC/DC hybrid distribution networks based on a multi-scenario technique considering timing characteristics[J]. Energies, 2017, 10(12): 2137.
- [25] AHMED H M A, ELTANTAWY A B, SALAMA M M A. A planning approach for the network configuration of AC-DC hybrid distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2203-2213.
- [26] 冯延明. 含分布式电源的直流配电网及储能规划[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- FENG Yanming. DC distribution network and energy storage planning with distributed power supply[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [27] 王振浩, 由作宇, 黄亚磊, 等. 基于连续潮流法的含双端 VSC-HVDC 交直流系统负荷裕度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 9-15.
- WANG Zhenhao, YOU Zuoyu, HUANG Yalei, et al. Load margin analysis of hybrid AC/DC system with two terminal VSC-HVDC using continuous power flow method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 9-15.
- [28] 杨艳红, 裴玮, 邓卫, 等. 计及换流站运行方式的交直流混合配电系统潮流计算方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2149-2157.
- YANG Yanhong, PEI Wei, DENG Wei, et al. Power flow calculation method for AC/DC hybrid power distribution system considering the operation mode of converter station[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2149-2157.
- [29] 刘崇茹, 张伯明. 交直流输电系统潮流计算中换流器运行方式的转换策略[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 17-21.
- LIU Chongru, ZHANG Bomeng. Conversion strategy of converter operation mode in power flow calculation of AC/DC transmission system[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 17-21.
- [30] FUDEH H, ONG C M. A simple and efficient AC-DC load flow method for multiterminal DC Systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 2010, PER-1(11): 19-19.
- [31] 王家融, 艾欣, 王坤宇, 等. 基于增广雅可比矩阵的交直流解耦潮流新算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1382-1389.
- WANG Jiarong, AI Xin, WANG Kunyu, et al. A new AC/DC decoupling power flow algorithm based on augmented Jacobian matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1382-1389.
- [32] 沈彦伟, 张玮, 陈嘉妮, 等. 计及换流站运行方式的交直流混合配电系统潮流计算方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2149-2157.
- SHEN Yanwei, ZHANG Wei, CHEN Jiani, et al. Power flow calculation method for AC/DC hybrid power distribution system considering the operation mode of converter station[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2149-2157.
- [33] 庄慧敏, 肖建. 用于 AC-MTDC 系统的新潮流计算方法[J]. 中国电力, 2008, 41(2): 21-25.
- ZHUANG Huimin, XIAO Jian. New power flow calculation method for AC-MTDC system[J]. Electric Power, 2008, 41(2): 21-25.
- [34] 吴素农, 于金镒, 田庄, 等. 基于扩展节点法的交直流混合电网统一潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 40-47.
- WU Sunong, YU Jinyi, TIAN Zhuang, et al. Unified power flow algorithm for AC/DC hybrid power grid based on extended node method[J]. Power System

- Protection and Control, 2018, 46(14): 40-47.
- [35] 曾超. 基于改进布罗伊登法的交直流混合系统潮流计算[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
ZENG Chao. Power flow calculation of AC/DC hybrid system based on improved Broyden method[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [36] 胡泽春, 严正. 带最优乘子牛顿法在交直流系统潮流计算中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 26-31.
HU Zechun, YAN Zheng. Application of Newton method with optimal multiplier in power flow calculation of AC/DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 26-31.
- [37] 蔡红艳, 卢锦玲, 周明, 等. 基于最优乘子快速解耦法的交直流混合系统潮流计算[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(3): 5-9.
CAI Hongyan, LU Jinling, ZHOU Ming, et al. Power flow calculation of AC/DC hybrid system based on optimal multiplier fast decoupling method[J]. Electric Power Science & Engineering, 2010, 26(3): 5-9.
- [38] 刘健, 魏昊焜, 张志华, 等. 未来配电网的主要形态——基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 11-16.
LIU Jian, WEI Haokun, ZHANG Zhihua, et al. Future architecture of power distribution network — low-voltage direct current micro-grids based on energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 11-16.
- [39] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Comparison of AC and DC distribution network reliability[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [40] 刘云, 荆平, 李庚银, 等. 直流电网网络输电模式及其输电分配技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊 1): 25-35.
LIU Yun, JING Ping, LI Gengyin, et al. Research on transmission modes of DC grid and its transmission distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 25-35.
- [41] 覃智君, 侯云鹤, 吴复立. 大规模交直流系统潮流计算的实用化模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 95-101.
TAN Zhijun, HOU Yunhe, WU Fuli. Practical model of large-scale AC/DC system power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 95-101.
- [42] 盛万兴, 段青, 孟晓丽, 等. 电力电子化进程下的交直流无缝混合灵活配电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1877-1888.
SHENG Wanxing, DUAN Qing, MENG Xiaoli, et al. Research on AC-DC seamless hybrid flexible distribution system under power electronics process[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1877-1888.
- [43] 惠飞翔. 中压柔性直流环网控制装置选址定容技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
HUI Feixiang. Research on site selection and constant volume technology of medium voltage flexible DC ring network control device[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [44] 张伟, 崔艳妍, 韦涛, 等. 柔性环网控制装置选址定容方法[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 48-54.
ZHANG Wei, CUI Yanyan, WEI Tao, et al. Location selection and volume control method of flexible ring network control device[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 48-54.
- [45] 郭小江, 郭剑波, 马世英, 等. 基于多馈入短路比的多直流落点选择方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 36-42.
GUO Xiaojia, GUO Jianbo, MA Shiyang, et al. Multi-DC drop point selection method based on multi-feed-to-short ratio[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 36-42.
- [46] 胡晓博. 含分布式能源的交直流混合配电网规划[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
HU Xiaobo. Planning of AC-DC hybrid distribution network with distributed energy[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [47] GHADIRI A, HAGHIFAM M, LARIMI S M M. A novel approach for hybrid AC/DC distribution network planning using genetic algorithm[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(16): 3892-3902.
-
- 收稿日期: 2018-11-13
作者简介:
李 婷(1979—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向电网规划、电力市场;
胥威汀(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向电网规划、能源战略和电力市场;
刘向龙(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为交直流混合系统规划和运行分析。E-mail: liuxianglongscu@foxmail.com
- (编辑 许 威)