

DOI: 10.7667/PSPC160985

基于柔性直流技术的一种交直流混合配电网可行性研究

严道, 焦彦军, 杜哲

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000)

摘要: 随着配电网中负荷的快速增长和分布式电源迅速发展, 传统配电网需要进行一定的升级改造才能满足新增负荷和分布式电源的需求。立足于“手拉手”式接线的传统中压配电网结构, 提出了利用柔性直流技术构建交直流混合配电网的改造方案, 对其网架结构和控制策略进行了介绍分析。之后, 以辽宁省某供电区域为例, 对建设交直流混合配网、增建交流配电网和增建直流配电网三种配电网改造方案的经济性进行了对比分析。分析证明交直流混合配电网具有最低的系统运行损耗, 当配电网运行年数超过5年时, 建设交直流混合配电网具有最低的总投资费用。最后, 分析总结了交直流混合配电网的综合优势和发展前景, 证明了交直流混合配电网能够成为配电网改造的可行方案。

关键词: 柔性直流; 交直流混合; 配电网; 可行性

Feasibility study of AC/DC hybrid distribution network using VSC-based DC technology

YAN Xiao, JIAO Yanjun, DU Zhe

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: With the rapid growth of load and prompt development of distribution generations (DG) in distribution network, traditional distribution network requires to be upgraded to meet the needs of new added load and DG. Based on the traditional medium voltage distribution network with hand in hand wiring method, the reformation scheme of AC/DC hybrid distribution network is proposed using voltage source converter (VSC)-based DC technology. In addition, the structure and control strategy of AC/DC hybrid distribution network are introduced. Taking a power supply region in Liaoning province as an example, the economics of three kinds of reformation schemes, i.e. constructing AC/DC hybrid distribution network, building up AC distribution network, and building up DC distribution network, are compared and analyzed. Analysis proves that AC/DC hybrid distribution network has the lowest operating loss. When operating years of the distribution network is more than 5 years, constructing AC/DC hybrid distribution network has the lowest total investment cost. In the end, the paper summarizes the comprehensive advantages and development prospect of AC/DC hybrid distribution network and then manifests that the AC/DC hybrid distribution network can be a feasible reformation scheme of the distribution network.

Key words: VSC-based DC technology; AC/DC hybrid; distribution network; feasibility study

0 引言

传统的城市中压配电网多数是按“手拉手”接线方式进行规划建设的, 这种接线方式结构简单、投资少, 操作及维护清晰、容易, 实现配电自动化难度小。但是“手拉手”接线在正常情况下需要每条线路预留50%的线路容量, 资源浪费较大^[1]。另外, 随着城市规模的快速增长和分布式发电技术的高速发展, 传统交流配电网将面临线路损耗大、供电走廊紧张以及供电质量下降的问题^[2]。

为了改进已有的接线方式, 提高配电网的供电质量和负荷承载能力, 国内外一些专家学者提出了利用柔性直流技术构建直流环节的改造方案^[3-5]。文献[3]提出了利用电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)构造直流环节来代替常开联络开关的构想, 将两条或多条馈线通过直流环节连接起来, 文章通过理论分析和软件仿真证明该方法可以有效提高配电网的负荷承载能力和对分布式电源的接纳能力。文献[4]则在文献[3]的基础上, 提出了多端柔性直流环节的控制策略, 并在实验室搭建了小型配

电网模型进行分析, 验证了直流环节对原交流配电网电压分布的改善和灵活的潮流控制。文献[5]提出了在直流环节加入分布式电源以及储能设备的构想, 并提出利用储能设备维持直流环节电压, 进一步提高了配电网对负荷和分布式电源的承载能力。

随着电力电子技术的快速发展, 直流负荷和带换流器的交流负荷(AC loads with Converters, ACwC)不断增加, 正逐渐成为配电网负荷组成的主体部分^[6]。在分布式电源中, 光伏电池板和燃料电池的输出都是直流电, 需要经过 DC/AC 逆变器并网, 而风力涡轮发电机发出的电能则需要经过 AC/DC/AC 变换才能并网^[7-8]。因此, 已有的利用柔性直流技术在配电网中增加直流环节的方案, 并没有解决大量直流负荷、ACwC 负荷以及分布式电源造成的换流过程繁多的问题。据此, 本文结合直流母线向直流负荷供电和接纳分布式电源的优势, 充分发挥已有研究中直流环节的供电潜力, 提出利用柔性直流技术构建交直流混合配电网的配电网改造方案, 并从网络结构、控制策略和经济性等方面对其可行性进行研究。

1 交直流混合配电网网络结构

将原中压交流配电网中进行“手拉手”连接的两条馈线视为一个“交流单元”, 参照文献[3-5]的研究, 可以利用柔性直流技术构建直流环节来取代“交流单元”中的常开联络开关。本文考虑到直流母线连接直流负荷、分布式电源以及储能系统的优势, 利用直流环节构建小型的直流配电区域来连接分布式电源、新增直流负荷和储能电池。“交直流混合单元”由“交流单元”中的两条馈线加上新增的直流环节构成, 多个未改造的“交流单元”与改造后的“交直流混合单元”结合起来, 就构成了本文提出的交直流混合配电网。“交直流混合单元”的结构示意图如图 1 所示。

在“交流单元”两条馈线的末端分别连接有一个 VSC, VSC#1 和 VSC#2 的直流侧通过直流母线相连。VSC#1 和 VSC#2 负责调节直流环节与原交流配电网两条馈线之间的功率交换, 并对原交流配电网提供合适的无功补偿。VSC#3 则负责维持直流母线的电压稳定, 并通过与上级电网进行功率交换保持直流环节的功率平衡。为了满足交直流混合配电网的“N-1”原则, 本文对新增的直流环节进行了如下要求:

(1) VSC#1 和 VSC#2 的额定容量应大于所连接馈线的最大总负荷功率。

(2) 直流母线采用环形结构, 直流母线应能承受

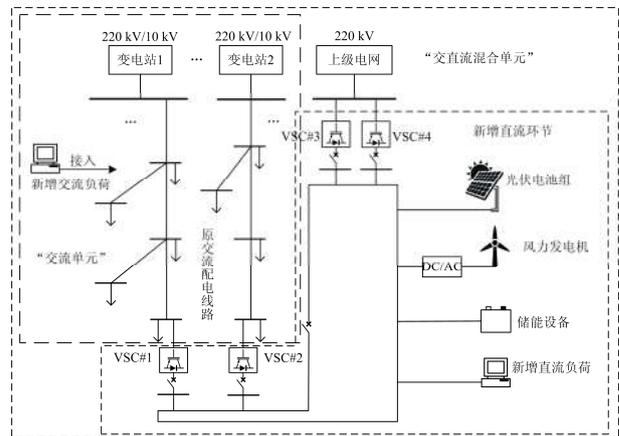


图 1 “交直流混合单元”结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of “hybrid AC-DC unit”

任意位置出现故障时的最大电流。

(3) 变电站 3 与直流环节的连接应加设 VSC#4, VSC#3 与 VSC#4 互为备用, 正常运行时, 其最大传输功率为额定功率的 50%。

假设原配电网中每条馈线所连接的负荷容量大致相等, 为了满足配电网设计的“N-1”原则, 原配电网中每条馈线的主变已经预留了 50%左右的容量。因此, 只要 VSC#1 和 VSC#2 的容量选择得当, 就可以在所连接的馈线任意位置发生故障时, 仍能保证线路上两倍于现所有负荷总和的供电。即每条馈线不用继续保证 50%的预留容量, 而可以继续接入等同于已有负荷总容量的新增负荷, 相当于原配电网的负荷承载能力提升了一倍, 这能够十分有效地缓解配电网中负荷快速增长所带来的中压配电网增容改造压力。

目前, 中压配电网几乎已经覆盖了城市的每一个区域, 所以交流馈线覆盖区域内新增交流负荷都可以就近接入该馈线。若新增交流负荷超过了原交流配电线路的承载能力, 则通过逆变器接入直流环节。新增的直流负荷、分布式电源以及储能设备则不需要换流过程或通过少量换流过程接入直流环节。因此, 图 1 所示的“交直流混合单元”能够使配网范围内新增的交直流负荷、分布式电源以及储能设备, 以尽量少的换流过程接入到配电网中。

综上, 图 1 所示的交直流混合配电网改造方案, 既能够提高原交流配电线路的负荷承载能力和供电质量, 又能够有效减少系统中的换流过程。

2 交直流混合配电网控制策略分析

交直流混合配电网运行状态多变且功能结构复杂, 除考虑交流系统潮流外, 还需考虑多个 VSC 的

换流约束以及直流环节所连接的负荷随机性用电、分布式电源的不确定性出力以及储能系统的充放电行为。

交直流混合配电网的能量管理系统作为交直流混合配电网控制系统的最高一级，可以通过智能电表获得配电网中负荷、线路和分布式发电的实际运行状态参数，选取恰当的优化目标以及适用于交直流混合系统的最优潮流算法进行最优潮流计算^[9-12]。最优潮流计算结果将作为调度指令传达到各 VSC 处，其中包括直流环节通过各 VSC 传输到交流系统或从交流系统获取的有功功率的大小，以及各需要对各自连接的交流线路进行无功补偿的大小。

在图 1 所示的交直流混合配电网结构示意图中，VSC#1, VSC#2 是控制直流环节与原交流系统间有功功率的流动，并通过为交流线路提供无功来改善原有交流线路的电压分布，故采取 PQ 控制方式。VSC#3 和 VSC#4 的作用则是维持直流环节的母线电压，保持直流环节的功率平衡，故采取定直流电压控制方式。VSC 的 PQ 控制方式和定直流电压控制方式在输电领域已经有了比较成熟的研究，其具体控制策略可以参见文献[13-15]。

3 交直流混合配电网经济性分析

本文以一个“交流单元”及其覆盖的负荷区域为研究对象，对以下三种配电网改造方案的经济性进行分析：1) 将“交流单元”改造为“交直流混合单元”；2) 增建交流配电网；3) 增建直流配电网。其中，增建交流和直流配电网时，配电线路均认为采用“手拉手”的接线方式。其中，改造方案 1) 的接线示意图如图 1 所示，方案 2) 和方案 3) 的接线示意图如图 2 和图 3 所示。

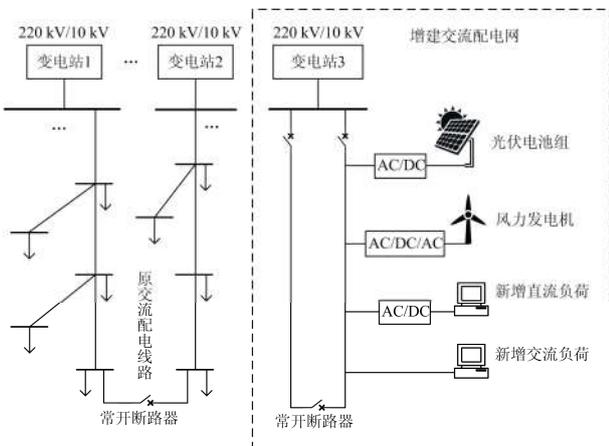


图 2 增建交流配电网方案接线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of building-up AC distribution network

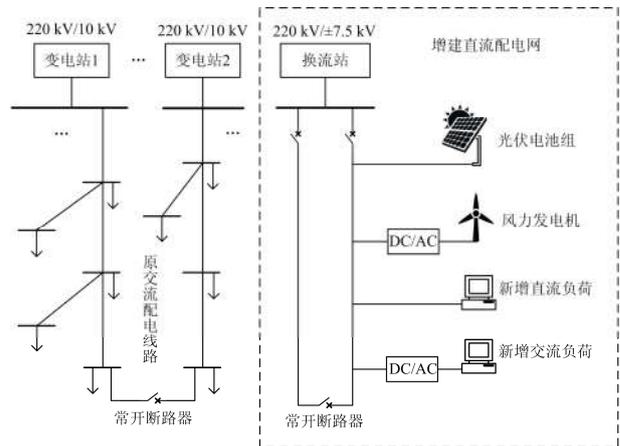


图 3 增建直流配电网方案接线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of building-up DC distribution network

3.1 实例介绍

本文选取文献[16]中介绍的辽宁省某供电区域为原始“交流单元”，该供电区域含有两条配电线路，分别对两个小分区进行供电，两条线路采取“手拉手”方式进行连接。线路额定电压为 10 kV，“交流单元”总负荷为 3.84 MW，总线损为 15 kW，两条线路的长度分别为 4.38 km 和 2.79 km。

在对该区域进行配电网改造时，要考虑该地区未来数年甚至十年以上的负荷预测数据。本文参考文献[1]中对配电网负荷总量增长趋势的分析，假定该地区十年内的年负荷总量增长率为 6%，即十年后该地区负荷总量为当前的 1.8 倍。考虑到文献[1]中对配电网负荷增长进行分析时并没有将快速发展的电动汽车充电设施考虑在内，因此本文假定该地区十年后负荷总量为当前负荷总量的 2 倍。其中，直流负荷与交流负荷的比例参照文献[17]设定为 3:2。

根据国家发改委公布的 2015 年辽宁省发用电情况，风力发电量占全年用电量的 5.6%，同比增长 8.02%；光伏发电量占全年用电量的 0.68%，同比增长 103.02%。假设在本文所选取的供电区域中，风力发电与光伏发电占用电量的比例与全省平均水平相同，且风力发电与光伏发电在未来数年内按照同样的增长速度发展，于 2020 年达到饱和，则可以计算得到十年后该地区风力发电与光伏发电全年平均发电功率分别为 0.63 MW 和 1.8 MW。综上，该区域相关数据整理如表 1 所示。

3.2 三种方案一次投资成本

3.2.1 换流站和变电站投资

如图 1 所示，方案 1) 需要 VSC 换流站 4 座，其中 VSC#1 和 VSC#2 的容量需按照各自连接线路的总负荷选定，分别为 1.84 MW 和 2 MW。VSC#3

表 1 辽宁省某供电区域相关参数
Table 1 Parameters of the power supply area
in Liaoning province

参数	数值
配电网电压等级/kV	10
两条线路长度/km	4.38/2.79
两条线路总负荷/MW	1.83/2.01
区域总负荷/MW	3.84
十年后区域总负荷/MW	7.68
十年后区域新增交流负荷/MW	1.53
十年后区域新增直流负荷/MW	2.31
十年后区域内风力发电 年平均功率/MW	0.63
十年后区域内光伏发电 年平均功率/MW	1.8

和 VSC#4 互为备用,其容量按照直流环节最大负荷来选定,故其容量为 2.31 MW。但为了保证原交流单元任一线路始端出现故障时,直流环节能够通过 VSC 保证故障线路负荷的正常用电,因此将 VSC#3 和 VSC#4 的容量上调为 4.31 MW。方案 2)的变电站和方案 3)的换流站均应满足所有新增负荷的需求,且为了满足“N-1”准则的要求,变压器和换流器应有容量相同的两组互为备用,故方案 2)和方案 3)新建变电站和换流站的容量均选为 7.68 MW。

由文献[18]可知,±80 kV 换流站的单位综合造价约为 1000 元/kW,电压等级越高换流站造价越高,故本文假设方案 1)和方案 3)中换流站造价为 500 元/kW。参照文献[19]可知,交流变电站的造价约为 300 元/kW。通过计算可以得到三种方案换流站或变电站的造价分别为 623 万元、230 万元和 384 万元。

3.2.2 线路电缆投资

由于城市的快速发展,线路走廊日益紧张,因此 3 种方案的配电线路均采用地下电缆。由前文分析可知,方案 1)和方案 3)均采用直流电缆,方案 2)采用交流电缆。在绝缘水平相同的情况下,电缆承受直流电压的能力是交流相电压的 1.5~2 倍,因此在目前中压直流电缆还未实现大规模生产应用的情况下,可以选用交流电缆代替直流电缆使用,并将单相交流电缆的报价翻倍作为双极直流电缆的估价^[17]。

方案 1)中,当交流线路出现故障时,直流环节可能承受的最大电流为 290 A,故选用 YJV-95 型铜芯交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆,其允许的持续载流量为 330 A,报价为 140 元/m,常温下导体直流电阻为 0.193 Ω/km。为了保证新增直流负荷可以更方便地接入直流环节,需使直流环节覆盖

范围尽量与原交流单元接近,故选取电缆长度为 9 km。计算可得方案 1)电缆总投资为 252 万元。

方案 2)中,交流线路需满足所有新增负荷的供电要求,线路可能承受的最大相电流为 220 A,故选用 YJV-70 型电力电缆,其允许的持续载流量为 275 A,报价为 110 元/m,常温下导体直流电阻为 0.153 Ω/km。考虑到交流电缆的磁感应损耗、介质损耗等额外损耗与其电阻损耗基本相等^[20],可认为其常温下交流等效电阻为 0.306 Ω/km。同样,选取电缆长度为 9 km 计算可得方案 2)电缆总投资为 297 万元。

方案 3)中,直流线路需满足所有新增负荷的供电要求,线路可能承受的最大电流为 260 A,故选用 YJV-70 型电力电缆,其允许的持续载流量为 275 A,报价为 110 元/m,常温下导体直流电阻为 0.153 Ω/km。选取电缆长度为 9 km,计算可得方案 2)电缆总投资为 223 万元。

3.2.3 断路器投资

方案 1)共需要 15 kV 直流断路器 5 个,其中 4 个为 VSC 断路器,1 个为直流环网线路开闭环断路器;方案 2)共需要 10 kV 交流断路器 3 个,其中一个为“手拉手”连接断路器;方案 3)共需要 15 kV 直流断路器 3 个,其中一个为“手拉手”连接断路器。由文献[17]可知,±7.5 kV 直流断路器价格约为 45 万元/台,10 kV 交流断路器价格约为 2 万元/台。计算可得三种方案所需的断路器投资分别为 225 万元、6 万元和 135 万元。

3.2.4 整流逆变器投资

方案 1)中,新增交流负荷接入交流线路,新增直流负荷和光伏电池接入直流环节,风力发电机通过整流器接入直流环节,故需求的整流器容量为 0.63 MW。方案 2)中,所有的新增负荷和分布式电源均接入交流线路,其中新增直流负荷需要整流器,光伏电池需要逆变器,风力发电机则需要整流器和逆变器,故需求的整流逆变器总容量为 5.37 MW。方案 3)中,所有的新增负荷和分布式电源均接入直流线路,其中新增交流负荷需要逆变器,风力发电机需要整流器,故需求的整流逆变器总容量为 2.16 MW。

应用于中压配电网的整流器和逆变器的造价略低于换流站的造价,取为 400 元/kW,则三种方案整流逆变器的投资分别为:50.4 万元、429.6 万元和 172.8 万元。

3.2.5 三种方案一次投资总成本

将三种配电网改造方案的一次投资成本进行估算,结果如表 2 所示。

表2 三种方案一次投资成本
Table 2 Investment cost of three projects

项目	方案1 投资/万元	方案2 投资/万元	方案3 投资/万元
换流站/变电站	623	230	384
线路电缆	252	297	223
断路器	225	6	135
整流器、逆变器	25	215	86
总计	1125	748	828

从表2中可以看出,将“交流单元”改造为“交直流混合单元”的一次投资最高,增建直流配电网次之,增建交流配电网的一次投资最低。在方案1)中,VSC换流站的投资占了总投资的50%以上。一方面是因为方案1)需要考虑原有负荷的供电导致所需的换流站容量较大,与方案1)能够增强原有交流线路供电能力和供电质量的特点相符,而其他两种改造方案则不会对原有的交流配电系统起到促进作用;另一方面是因为受限于目前的电力电子技术水平,换流站的造价还比较高,因此随着电力电子技术的不断发展,方案1)和方案3)的一次投资仍有下降的空间。另外,随着直流断路器制造技术的不断进步,以及配电网中直流负荷和分布式电源的增多,方案1)和方案3)在一次投资方面与传统方案2)的差距会不断减小,甚至可能具有更低的一次投资成本。

3.3 三种方案系统电能损耗

3.3.1 换流器和变电站电能损耗

由文献[21]可知,换流站与变压器的效率约为98.4%和98%。对三种方案中的新建换流站和变压器进行分析,方案1)还需考虑新增交流负荷接入原交流线路后带来的原变压器负载上升的影响。计算可得三种改造方案换流器和变电站的总损耗功率分别为67.6 kW, 76.8 kW和61.4 kW。

3.3.2 整流器和逆变器电能损耗

取三种改造方案中整流器平均效率为95%,逆变器平均效率为97%^[17]。对三种改造方案中的新增交直流负荷以及分布式电源的损耗功率进行分析,可以计算得到三种改造方案整流器和逆变器的总损耗功率分别为:31.5 kW, 173.4 kW和108.6 kW。

3.3.3 线路电能损耗

三种改造方案中所用的电缆型号以及导体电阻如前文所述,电缆长度均为9 km。假设所有负荷都沿线路均匀分布,则其线路电能损耗为负荷集中在线路末端情况的1/3^[22]。对于方案1),还需考虑原“交流单元”由于负荷加重导致线损增加的影响,原交流线路采用的LGJ-70, LGJ-50和LGJ-35型架空线的常温下导体直流电阻分别为0.414 Ω/km,

0.569 Ω/km和0.823 Ω/km,认为其常温下交流等效电阻分别为0.828 Ω/km, 1.138 Ω/km和1.646 Ω/km,线路具体分段情况参见文献[16],此处不做详细说明。计算可得三种改造方案的线路损耗功率分别为66 kW, 135 kW和60 kW。

3.3.4 三种方案系统电能损耗

将三种配电网改造方案的系统电能损耗进行估算,结果如表3所示。

表3 三种方案系统电能损耗
Table 3 Electric energy loss of three projects

损耗类型	方案1 损耗功率/kW	方案2 损耗功率/kW	方案3 损耗功率/kW
换流器和变电站损耗	67.6	76.8	61.4
整流器和逆变器损耗	31.5	173.4	108.6
线路损耗	66.1	135.3	60.9
系统总损耗	165.2	385.5	230.9

从表3中可以看出,将“交流单元”改造为“交直流混合单元”的方案系统总损耗是最小的,其中整流器和逆变器的损耗明显小于其他两种方案,这也体现了方案1)能够减少系统中换流过程的运行特点和设计初衷。

3.4 三种方案经济性比较

本文忽略了较为复杂的运行维护费用,选取一次投资成本和系统电能损耗两个指标,对三种配电网改造方案进行经济性比较。三种方案的一次投资成本和系统电能损耗分别如表2和表3所示。

三种方案的建设和运行总费用为

$$C_i = T_i + 8760nSP_i \quad (1)$$

式中: C_i 为第*i*种方案的建设和运行总费用; T_i 为第*i*种方案的一次投资费用; n 为配电网运行年数; S 为当地售电电价; P_i 为第*i*种方案的系统电能损耗。其中, T_i , S 和 P_i 为已知量,式(1)即为配电网改造方案总费用与运行年数的一次函数。

取 S 为0.6元/kWh,结合表2和表3中数据,可以得到三种配电网改造方案总费用曲线,如图4所示。从图4可以看出,当配电网运行年数在1年以内时,增建交流配电网的总费用最低;当运行年数在1年到5年之间时,增建直流配电网的总费用最低;当运行年数在5年以上时,将“交流单元”改造为“交直流混合单元”的总费用最低。而一般配电网的运行年限均在5年以上,因此对于传统“手拉手”式配电网,将“交流单元”改造为“交直流混合单元”最为经济。

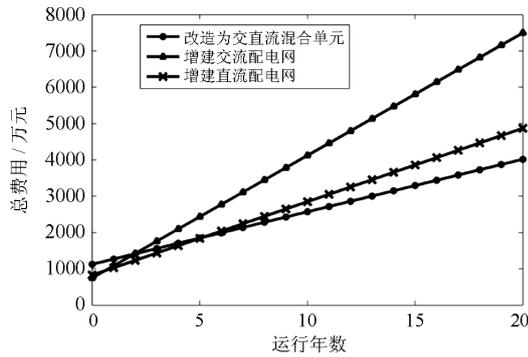


图 4 配电网改造方案总费用曲线

Fig. 4 Curves of total cost of rehabilitation programs of distribution network

在实际的配电网规划中,不同地区的配电网具有不同的线路结构和不同的负荷大小与类型,因此本文针对辽宁省某供电区域进行的经济性分析只能作为参考,在进行配电网改造方案选择时还需要根据实际情况进行分析。

4 结论

本文针对“手拉手”式接线的传统交流配电网,提出了将“交流单元”改造为“交直流混合单元”的交直流混合配电网建设方案,对其网络结构和控制策略进行了介绍和分析。最后,以辽宁省某供电区域为例,对将“交流单元”改造为“交直流混合单元”、增建交流配电网和增建直流配电网三种配电网改造方案的经济性进行了分析对比,结果显示当配电网运行年数超过 5 年时,建设交直流混合配电网的改造方案具有更小的总投资费用。

综合分析,建设交直流混合配电网的改造方案具有以下优势:

1) 可以有效改善原有交流线路的电压分布和负荷承载能力,提高供电质量,缓解配电网增容时供电走廊紧张的问题。

2) 可以减少配电系统中的换流过程,提高能源利用率,利用柔性直流技术可以实现对线路潮流的灵活控制,实现全系统能源的高效合理分配利用。

3) 由于减少了系统中的电能损耗,当配电网运行年数较长时,建设交直流混合配电网的改造方案将具有更好的经济性。

目前,柔性直流技术的相关研究尚未完全成熟,随着电力电子技术和直流断路器等相关研究的不断发展,建设交直流配电网的配电网改造方案将具有更低的投资成本和运行损耗。综上,交直流配电网具有巨大的综合优势和发展潜力,能够成为传统配

电网进行升级改造时的可行方案。

参考文献

- [1] 程浩忠, 陈章潮, 傅正财, 等. 城市电网规划与改造[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] HAMMERSTROM D J. AC versus DC distribution systems did we get it right?[C] // Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE: IEEE, 2007: 1-5.
- [3] ROMERO-RAMOS E, GÓMEZ-EXPÓSITO A, MARANO-MARCOLINI A, et al. Assessing the loadability of active distribution networks in the presence of DC controllable links[J]. IET generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(11): 1105.
- [4] BARRAGAN M, MAURICIO J M, MARANO A, et al. Operational benefits of multiterminal DC-links in active distribution networks[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE: IEEE, 2012: 1-6.
- [5] CHAUDHARY S K, GUERRERO J M, TEODORESCU R. Enhancing the capacity of the AC distribution system using DC interlinks — a step toward future DC grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1722-1729.
- [6] SALOMONSSON D, SANNINO A. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1620-1627.
- [7] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [8] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [9] 卫志农, 季聪, 孙国强, 等. 含 VSC-HVDC 的交直流系统内点法最优潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 89-95.
WEI Zhinong, JI Cong, SUN Guoqiang, et al. Interior-point optimal power flow of AC-DC system with VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 89-95.
- [10] 卫志农, 季聪, 郑玉平, 等. 计及 VSC-HVDC 的交直流系统最优潮流统一混合算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 635-643.

- WEI Zhinong, JI Cong, ZHENG Yuping, et al. Optimal power flow of AC-DC systems with VSC-HVDC based on a novel unified hybrid algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 635-643.
- [11] BEERTEN J, COLE S, BELMANS R. Implementation aspects of a sequential AC/DC power flow computation algorithm for multi-terminal VSC HVDC systems[C] // AC and DC Power Transmission, 2010. ACDC. 9th IET International Conference on: IET, 2010: 1-6.
- [12] 黄俊辉, 汪惟源, 王海潜, 等. 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 37-43.
HUANG Junhui, WANG Weiyuan, WANG Haiqian, et al. Study of hybrid genetic algorithm and annealing algorithm on reactive power optimization and voltage control in AC/DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 37-43.
- [13] 梁海峰, 李庚银, 李广凯, 等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 45-50.
LIANG Haifeng, LI Gengyin, LI Guangkai, et al. Simulation study of VSC-HVDC system connected to passive network[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 45-50.
- [14] ETXEBERRIA-OTADUI I, VISCARRET U, CABALLERO M, et al. New optimized PWM VSC control structures and strategies under unbalanced voltage transients[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2902-2914.
- [15] 明战起, 石新春, 周国梁. 有功功率无功功率独立控制的 VSC-HVDC 系统仿真研究[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(4): 9-12.
MING Zhanqi, SHI Xinchun, ZHOU Guoliang. Simulation and analysis for VSC-HVDC independently controlling active power[J]. Electric Power Science and Engineering, 2008, 24(4): 9-12.
- [16] 朴在林, 孟晓芳. 配电网规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [17] 郑欢, 江道灼, 杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3368-3374.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3368-3374.
- [18] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 柔性直流输电不同电压等级的经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 98-102.
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Economy comparison of VSC-HVDC with different voltage level[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 98-102.
- [19] 赵清声, 王志新, 张华强, 等. 海上风电场轻型直流输电的经济性分析[J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 94-98.
ZHAO Qingsheng, WANG Zhixin, ZHANG Huaqiang, et al. Economic analysis on HVDC-light for off-shore wind farm[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(5): 94-98.
- [20] WANG F, PEI Y, BOROYEVICH D, et al. AC vs. DC distribution for off-shore power delivery[C] // Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE: IEEE, 2008: 2113-2118.
- [21] STARKE M R, OLBERT L M, OZPINECI B. AC vs. DC distribution: a loss comparison[C] // Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Bogota, Colombia: IEEE, 2008: 1-7.
- [22] 牛迎水. 配电网能效评估与降损节能[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

收稿日期: 2016-07-01

作者简介:

严 道(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为交直流混合配电网; E-mail: 953692753@qq.com

焦彦军(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动保护;

杜 哲(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微网容量优化配置。

(编辑 魏小丽)