

DOI: 10.7667/PSPC171002

交直流混合微网优化配置研究

丁明¹, 史盛亮¹, 刘新宇¹, 潘浩¹, 周金辉², 余杰³, 顾一丰⁴

(1. 安徽省新能源利用与节能重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009; 2. 国网浙江省电力公司
电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 3. 国网浙江省电力公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000;
4. 国网浙江绍兴市上虞区供电公司, 浙江 上虞 312314)

摘要: 交直流混合微网结合了交流微网与直流微网的优点, 其优化配置问题是当前研究的热点。围绕包含风力发电、光伏发电和储能电池的交直流混合微网系统, 综合考虑了换流器配置、设备的随机故障、微网的运行模式、子微网间的交互功率和微网与主网的交互功率波动约束, 建立了以安装成本、运行成本和可靠性成本之和为目标的优化模型, 运用混合整数线性规划求解。讨论了不同直流负荷比率下的合理配置, 并传统交流微网进行了对比分析。算例表明: 交直流混合微网在成本和可靠性方面有一定优势, 并随着直流负荷比率的增大优势更加明显。
关键词: 交直流混合微网; 换流器; 随机故障; 直流负荷比率; 混合整数线性规划; 优化配置

Study of optimal configuration of a hybrid AC/DC microgrid

DING Ming¹, SHI Shengliang¹, LIU Xinyu¹, PAN Hao¹, ZHOU Jinhui², YU Jie³, GU Yifeng⁴

(1. Anhui New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 3. Shaoxing Power Supply Company,
State Grid Zhejiang Electric Power Company, Shaoxing 312000, China; 4. State Grid Zhejiang Shangyu
Region Power Supply Company, Shangyu 312314, China)

Abstract: Hybrid AC/DC microgrid combines the advantages of AC microgrid and DC microgrid, its optimal planning problem is a hotspot of current research. Taking into account the inverter configuration, stochastic failure of equipment, operating state of microgrid, constraints of interactive power fluctuation between submicrogrid and the fluctuation between microgrid and main grid, this paper establishes an optimal planning model in hybrid AC/DC microgrid system with wind turbine generators, photovoltaic generation and energy storage battery. In this model, mixed integer programming method is used to solve the objective function with the summation of installation cost, operation cost and reliability cost. Optimal planning is carried out under different DC load ratios and is compared with AC microgrid. The case study indicates that hybrid AC/DC microgrid has advantages in both configuration cost and reliability, and the advantages become more obvious as the change of DC load ratio.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050104).

Key words: hybrid AC/DC microgrid; inverter; stochastic failure; DC load ratio; mixed integer programming; optimization configuration

0 引言

微网作为可再生能源和负荷一体化运行的小型发、配、用电系统^[1], 具有网架结构灵活、电源类型多样、控制方式复杂、运行模态多的特点, 对其优化配置的研究具有重要的学术意义和工程价值^[2-3]。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA050104)

交直流混合微网^[4]结合了交流微网和直流微网的特点, 受到各界广泛关注。其具备多重优点: 1) 交流子微网更适合与配电网间进行能量交互; 2) 直流子微网减少了能量传输过程中换流器的数量和损耗, 有利于分布式能源的接入^[5]; 3) 交、直流负载可以分别接入交、直流子微网, 减少了换流器的数量和损耗。

目前对交直流混合微网的研究集中于运行控制方面^[6-8], 但研究成果较少的优化配置近年来逐渐

引起学术界关注。文献[9]考虑了光伏、风电、负荷不确定性下的交直流混合微网规划；文献[10]研究了风光互补独立微网的优化配置；文献[11]研究了综合约束条件下的并网型微网优化配置，并进行了评估分析；文献[12]以逆变器损耗为目标函数，提出了相应的交直流混合微电网运行控制策略并进行优化配置；文献[13]比较了交流微网与直流微网的配置成本，并分析了不同直流负荷比率、电价、逆变器效率下的最优配置结果。目前优化配置研究方面尚存在的问题是：1) 没有考虑微网设备的随机故障及其对微网优化配置的影响；2) 换流器配置模型有待进一步细化；3) 微网在不同运行模式下对优化配置的综合影响；4) 直流负荷比率的变化对优化配置的影响。

本文分析了交直流混合微网与交流微网在结构和运行模式上的区别。建立了考虑换流器配置和微网与大电网交互功率波动约束的交直流混合微网模型，从微网的经济性角度出发构建优化模型的目标函数。在优化变量选取上，针对各种分布式电源装机容量、微网与主网的交互功率和子微网间的交互功率同时进行优化设计。在算法实现上，利用蒙特卡洛模拟了微网设备的运行状态。算例讨论了交直流混合微网优化配置的特点和不同直流负荷比率下的优化配置结果，并与不同直流负荷比率下交流微网的优化配置进行了对比分析。

1 交直流混合微网结构与运行模式

交直流混合微网包括两个部分，如图 1。交流子微网分别与配电网和直流子微网相连，包括风机、储能和交流负荷。直流子微网与交流子微网经双向 AC/DC 换流器相连。直流子微网内分布式电源有风机、光伏、储能和直流负荷。风机经单级变换接入直流母线^[14]，其他分布式电源和负荷直接与直流母线相连。模型中主要考虑了分布式电源和负荷接入母线时的换流环节(AC-DC 和 DC-AC)，微网中电压等级较低的情况下，变压环节(DC-DC 和 AC-AC)相比换流环节损耗少、成本低，所以没有考虑，并且电压等级选择合理的情况下，可省去部分变压环节。与图 2 的传统交流微网相比，相同容量的分布式电源接入交直流混合微网时，节省了分布式电源和直流负荷接入时的换流器配置成本，提高了能量的传输效率。

交直流混合微网的运行模式也区别于传统交流微网。从整体上看，交直流混合微网的能量流动是微网与主网的能量交互。从局部来看，交直流混合微网的能量流动是交流子微网与直流子微网的能

量交互。微网所面临的孤岛问题也区别于普通交流微网：微网与电网的公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)故障导致交直流混合微网整体处于孤岛运行状态；交直流微网间双向 AC/DC 换流器故障导致直流子微网处于孤岛运行状态；若 PCC 和双向 AC/DC 换流器都故障，则交流子微网与直流子微网都处于孤岛运行状态。因此，交直流混合微网中两个子微网的各种分布式电源容量如何确定，交直流子微网间的能量如何流动，微网与主网间能量如何交互，成为优化配置时需要考虑的主要问题。

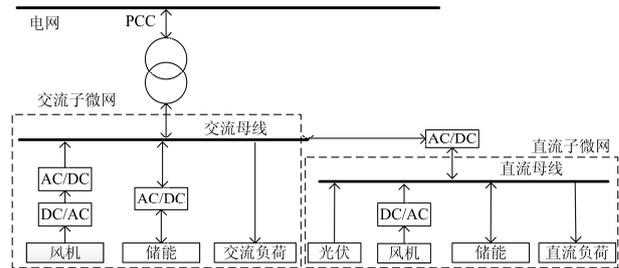


图 1 交直流混合微网结构

Fig. 1 Structure of a hybrid AC/DC micro-grid

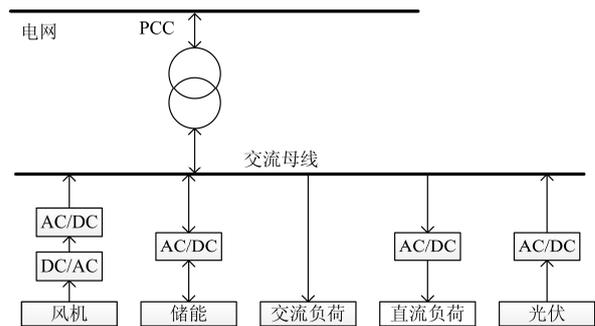


图 2 传统交流微网结构

Fig. 2 Structure of a traditional AC micro-grid

2 交直流混合微网容量优化配置模型

2.1 目标函数

根据并网系统内风力资源、光照资源、设备随机故障和负荷需求情况，以及相关设备的投资、运行和失负荷惩罚等经济性指标，对微网内设备和联络线交互功率进行优化设计。建立了包含安装成本(Installation Cost, IC)、运行成本(Operation Cost, OC)和可靠性成本(Reliability Cost, RC)的总成本最小目标函数，通过 CPLEX 求解。

$$\min = IC + OC + RC \quad (1)$$

1) 安装成本

分布式电源的装机成本与具体的项目密切相关，本文采用等年值法对微电网中的分布式电源和换流器的装机成本进行计算^[15]。

$$IC = \sum_{i=1}^M N_m C_{ICm} \frac{r(1+r)^{Y_m}}{(1+r)^{Y_m} - 1} \quad (2)$$

式中: M 为微网设备的种类; N_m 、 C_{ICm} 、 Y_m 分别为第 m 类微网装置的安装台数、单台设备安装成本及寿命年限; r 为折现率, 本文取为 8%。

2) 运行成本

运行成本包括了分布式电源的发电运行成本、储能电池的运行成本、换流器的运行成本和微网与配电网间能量的交互成本。

$$OC = \sum_{i=1}^M \sum_{b=1}^{N_m} \sum_{t=1}^T k_i p_{ibt} + \sum_t k_t P_t^M \quad (3)$$

式中: T 为微网运行总时长; k_i 为第 i 类微网设备的运行管理系数; p_{ibt} 为第 i 类设备的第 b 台机组在 t 时刻的输出功率; k_t 为 t 时刻配电网与微网间能量交互的价格, k_t 的值不仅取决于时刻, 还取决于微网与配电网间功率传输的方向; P_t^M 为 t 时刻配电网与微网间的交互功率, 微网购电时 P_t^M 为正值, 微网售电时 P_t^M 为负值。

3) 可靠性成本

微网在故障或者某些极端情况下, 会切除部分非重要负荷。本文用负荷损失价值(Value of Load Loss, VOLL)来表示微网供电可靠性成本^[16]。

$$RC = \sum_t V_a L_{fa}^{\text{loss}} + \sum_t V_d L_{fd}^{\text{loss}} \quad (4)$$

式中: V_a 为交流子微网的失负荷惩罚值; L_{fa}^{loss} 为交流子微网 t 时刻的失负荷; V_d 为直流子微网的失负荷惩罚值; L_{fd}^{loss} 为直流子微网 t 时刻的失负荷。

2.2 约束函数

1) 分布式电源出力约束

风机和光伏的出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^w \leq P_t^{w \max} \\ 0 \leq P_t^{pv} \leq P_t^{pv \max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_t^w 为 t 时刻风机的功率; $P_t^{w \max}$ 为 t 时刻风机的最大可输出功率; P_t^{pv} 为 t 时刻光伏的功率; $P_t^{pv \max}$ 为 t 时刻光伏的最大可输出功率。

2) 储能电池约束

(1) 储能电池电量约束

$$Q_t^{\text{Emin}} \leq Q_t^{\text{E}} \leq Q_t^{\text{Emax}} \quad (6)$$

式中: Q_t^{E} 为 t 时刻储能电池的电量; Q_t^{Emax} 为储能电池电量上限; Q_t^{Emin} 为储能电池电量下限。

(2) 储能电池充放电功率约束

$$\begin{cases} -sE_n \leq P_t^c \leq 0 \\ 0 \leq P_t^d \leq sE_n \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_t^c 为 t 时刻储能电池充电功率; P_t^d 为 t 时刻储能电池放电功率; E_n 为储能电池额定容量; s 为充放电比例系数, 一般取 20%^[17]。

(3) 储能电池电量与充放电关系

$$Q_t^{\text{E}} = E_{\text{ini}} - \int (p_t^d / \eta_d) dt - \int (\eta_c p_t^c) dt \quad (8)$$

式中: E_{ini} 为储能电池初始电量; η_d 为储能电池放电效率; η_c 为储能电池充电效率。

3) 配电网与微网间交互功率波动约束

配电网与微网在单位时间内交互功率的波动不能过大, 以免对配电网和微网本身造成冲击^[18]。因此对交互功率波动加以约束。

$$\begin{cases} P_t^M = P_t^{\text{buy}} - P_t^{\text{sell}} \\ |P_t^M - P_{t-1}^M| \leq S\% S_n \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_t^M 为 t 时刻主网与微网间的交互功率; P_t^{buy} 、 P_t^{sell} 为 t 时刻微网的购电和售电功率; $S\%$ 为电网能承受的最大功率变化率, 即微网与主网间的最大交互功率与微网中分布式电源总容量的比值; S_n 为微网中分布式电源总容量。

4) 交直流混合微网功率平衡约束

交直流混合微网的功率平衡包括交流子微网和直流子微网的功率平衡。功率平衡函数考虑了能量传输过程中换流器的损耗。

(1) 交流子微网功率平衡约束

$$\eta_{wa} P_{fa}^{\text{wsum}} - \frac{P_{fa}^{\text{csum}}}{\eta_{Ea}} + \eta_{Ea} P_{fa}^{\text{dsum}} + P_t^M - \quad (10)$$

$$P_t^{\text{ac-dc}} + \eta_{\text{dc-ac}} P_t^{\text{dc-ac}} = (1 - \alpha) L_t^{\text{load}} - L_{fa}^{\text{loss}}$$

式中: η_{wa} 为交流子微网中风机换流器能量传输效率; P_{fa}^{wsum} 为 t 时刻交流子微网中风机发电总功率; η_{Ea} 为交流子微网中储能换流器能量传输效率; P_{fa}^{csum} 、 P_{fa}^{dsum} 为 t 时刻交流子微网中储能电池充放电总功率; $P_t^{\text{ac-dc}}$ 为 t 时刻交流子微网传输至直流子微网的功率; $P_t^{\text{dc-ac}}$ 为 t 时刻直流子微网传输至交流子微网的功率; $\eta_{\text{dc-ac}}$ 为微网间换流器能量传输的效率; α 为直流负荷占总负荷比率, 本文中假设直流子微网中的负荷与交流子微网中的负荷变化趋势完全相同, 所占比例不同, 即直流负荷比率; L_t^{load} 为 t 时刻微网的总负荷功率; L_{fa}^{loss} 为 t 时刻交流子微网中用户切负荷功率;

(2) 直流子微网功率平衡约束

$$\eta_{wd} P_{rd}^{wsum} + P_{rd}^{pvsum} - P_{rd}^{csum} + P_{rd}^{dsum} + \eta_{ac-dc} P_t^{ac-dc} - P_t^{dc-ac} = \alpha L_t^{load} - L_{rd}^{loss} \quad (11)$$

式中： η_{wd} 为直流子微网中风机换流器能量传输效率； P_{rd}^{wsum} 为 t 时刻直流子微网中风机发电总功率； P_{rd}^{pvsum} 为 t 时刻直流子微网中光伏发电总功率； P_{rd}^{csum} 、 P_{rd}^{dsum} 为 t 时刻直流子微网中储能电池充放电总功率； L_{rd}^{loss} 为 t 时刻直流子微网中用户切负荷功率。

5) 微网设备故障

交直流混合微网中各个元件都可能随机故障^[19-20]。运用蒙特卡洛抽样判断 t 时刻微网中分布式电源和联络线是否故障，根据抽样结果考虑以下约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^w \leq f_t^w P_t^{wmax} \\ 0 \leq P_t^{ac-dc} \leq f_t^{ac-dc} P^{ac-dcmax} \\ 0 \leq P_t^M \leq f_t^M P^{Mmax} \\ -f_t^c s E_n \leq P_t^c \leq 0 \\ 0 \leq P_t^d \leq f_t^c s E_n \\ 0 \leq P_t^{pv} \leq f_t^{pv} P_t^{pvmax} \end{cases} \quad (12)$$

式中： f_t 为状态系数， f_t 为 0 表示 t 时刻某台设备故障， f_t 为 1 表示 t 时刻某台设备运行； P^{Mmax} 为微网与主网交互的最大功率； $P^{ac-dcmax}$ 为两个子微网间最大传输功率。

6) 供电可靠性约束

本文使用电力不足概率(Loss of Energy Probability, LOEP)来表征供电可靠性。

$$L_{OEP} = \sum_{t=1}^T L_t^{loss} / \sum_{t=1}^T L_t^{load} \leq L_{max} \quad (13)$$

式中， L_{max} 为微网允许最大缺电概率。

3 优化模型求解

上述模型的求解是一个混合整数规划问题。模型在 Java 程序中搭建，应用 CPLEX 的内置分支割平面算法求解。算例中给出了待选的分布式电源和换流器类型，待优化变量：有交流子微网的风机台数 N_{wa} 、交流子微网的储能电池台数 N_{ea} 、交流子微网与主网间联络线的最大传输功率 P_{Mmax} 、直流子微网的风机台数 N_{wd} 、直流子微网的光伏台数 N_{pv} 、直流子微网的储能电池台数 N_{ed} 、交直流子微网间的双向换流器的最大传输功率 $P_{ac-dcmax}$ 。

由于模型中考虑了微网设备的随机故障，本文采用蒙特卡洛模拟法抽样模拟了微网设备故障，将其转化为约束条件之后代入优化模型进行求解。求解流程图如图 3 所示，优化求解流程由两部分组

成。先进行流程 1 求解，再进行流程 2 求解。流程 1 通过蒙特卡洛模拟随机故障求得分布式电源的期望值并进位取整。流程 2 把流程 1 得到的分布式电源优化配置结果带入微网模型，求解得到包含安装成本、运行成本和可靠性成本组成的经济性成本期望值和联络线功率期望值。

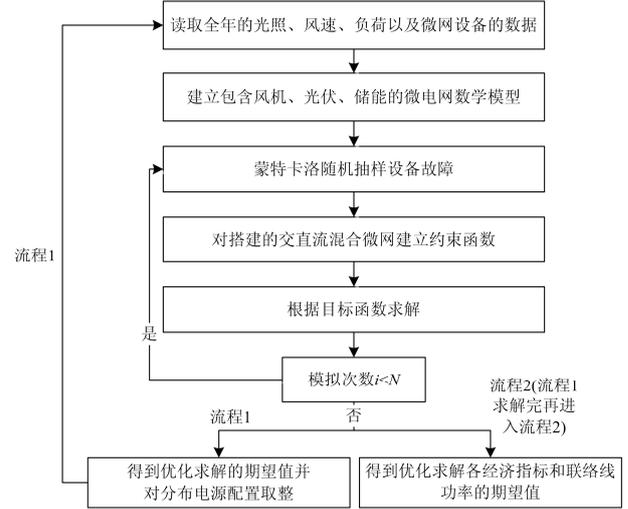


图 3 优化求解流程图

Fig. 3 Flow chart of optimization

4 算例分析及讨论

4.1 算例系统参数

本文基于交直流混合微电网实际工程，其微网架构如图 1 所示。其中包含了光伏机组、风电机组和储能电池的分布式能源。所研究的时间周期为 1 年，单位时间间隔为 1 h。本文采用实时电价，具体数据参见文献[21]，电源(风机、光伏、储能电池)和换流器的技术和经济参数^[11]如表 1、表 2 所示。

表 1 分布式电源参数

项目	单机容量	安装成本	运行管理系数	使用年限
风机	10 kW	9 400 元/kW	0.029 6	20 年
光伏电池	1 kW	9 000 元/kW	0.009 6	20 年
储能电池	24 kWh	1 000 元/kWh	0.009	10 年

表 2 换流器参数

项目	单机容量/kW	安装成本/(元/kW)	换流效率	使用年限
光伏并网换流器	1	1 000	0.98	10
交流侧风机并网换流器	10	2 300	0.94	10
直流侧风机并网换流器	10	1 200	0.97	10
双向 AC/DC 换流器	1	2 000	0.94	10

某地区历史年度负荷及气象数据如图 4 所示。该地区全年用电量为 1 986.61 MWh。气象数据显示该地区四季分明, 夏季光照强度明显增强, 但风速相对偏小。

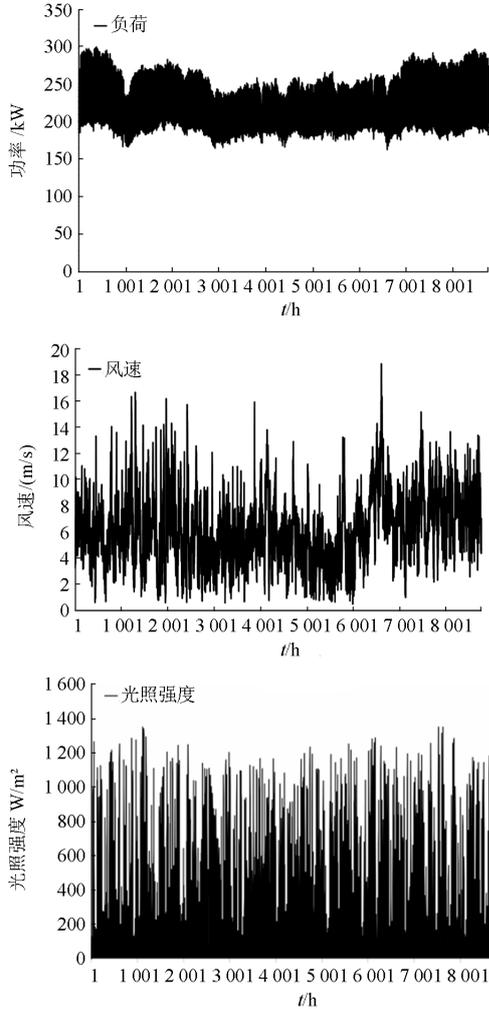


图 4 负荷、风速及光照年数据曲线

Fig. 4 Parameters of load, wind speed and irradiance in a year

表 3 为算例中各设备的可靠性参数^[22]。

表 3 元件可靠性参数

Table 3 Reliability data of components

项目	故障概率
风电系统	0.04
光伏系统	0.003
储能电池	0.05
PCC	0.02
交直流换流器	0.04

4.2 蒙特卡洛抽样的收敛性

通过蒙特卡洛抽样具有波动性, 需确定合理的抽样次数。图 5 为目标函数及各成本求解结果随抽

样次数变化曲线, 分别为总成本、安装成本、运行成本和可靠性成本目标函数收敛性。这些函数在循环求解 5 000 次时都能达到稳定的求解结果。因此, 后续的讨论均以 5 000 次抽样为准。

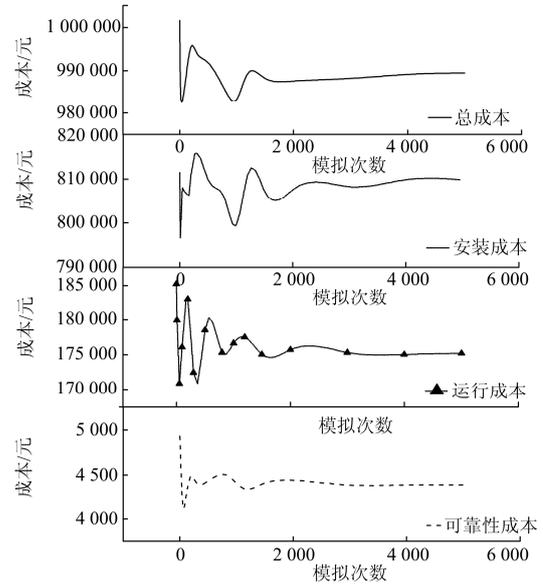


图 5 各目标函数收敛性

Fig. 5 Convergences of each objective function

4.3 算例讨论

4.3.1 交直流混合微网模型的优化配置(Case1)

在 Case1 中给定交直流微网的直流负荷比率为 0.5, 即交流子微网侧与直流子微网侧负荷相同, 交互功率变化率为 0.3。表 4 所示为 CPLEX 求解的优化结果。

表 4 交直流混合微网优化配置结果

Table 4 Optimal result of hybrid AC/DC microgrid

总成本	安装成本	运行成本	可靠性成本	交流侧风机	光伏
968 554 元	793 282 元	166 001 元	9 271 元	16 台	167 台
交流侧储能	主网交互最大功率	直流侧储能	微网间交互最大功率	直流侧风机	—
0 台	113 kW	24 台	163 kW	32 台	—

根据优化结果可知, 高昂的装机成本是现阶段微网经济效益差的主要原因。可靠性成本很小, 这是由于失负荷惩罚很大, 随机故障下的失负荷量很小。在直流负荷比率为 0.5 的交直流混合微网中, 分布式电源发电总量占总负荷量的 87.7%, 其中风电机组接入容量占总容量的 74.2%。风电机组接入直流子微网的容量大于其接入交流子微网的容量, 这是因为风电机组接入直流微网与交流微网相比减

少了能量传输损耗和换流器的安装成本。储能电池全部接入了直流微网，储能电池接入直流微网不仅更经济而且与大多数分布式电源同在一个直流子微网中，减少了传输损耗。

4.3.2 不同直流负荷比率下的交直流混合微网优化配置(Case2)

Case2 在 Case1 的基础上改变了直流负荷比率的取值，即微网的总负荷量不变，直流子微网的负荷比率从 0.1 到 0.9 之间变化，求解结果如表 5 所示。

表 5 不同直流负荷比率下交直流混合微网优化配置结果

Table 5 Optimal result of hybrid AC/DC microgrid in different DC load ratios

直流负荷比率	交流侧风机/台	光伏/台	交流侧储能/台	主网交互最大功率/kW	直流侧储能/台	直流侧风机/台	微网间交互最大功率/kW
0.1	41	163	0	165	24	7	181
0.2	35	161	0	148	24	13	164
0.3	29	154	0	131	24	19	166
0.4	23	161	0	114	24	25	160
0.5	16	167	0	113	24	32	163
0.6	10	182	0	117	23	38	170
0.7	4	205	0	120	23	44	183
0.8	0	229	0	123	23	47	179
0.9	0	246	0	126	22	48	158

由表 5 可以看出，在交直流混合微网中随着直流负荷比率的提高，风机接入交流子微网的容量逐渐减小，而风机接入直流子微网的容量逐渐增加。风机作为主要的分布式电源其总容量基本维持不变，而在直流负荷比率 0.7~0.8 时总容量略有减小，因为直流子微网侧负荷增多后，光伏装机容量增大，且直流子网侧传输效率高，使得风机装机容量减小，当直流负荷比率 0.9 时总容量略有增加，是因为配置更多的风机用于售电。光伏电池接入的容量先减小后增大，这是因为光伏电池容量小且运行成本相比风机低，有利于调节不同负荷比率变化引起的微网间能量流动。因此直流负荷比率刚增大时，光伏电池减少，但当直流负荷比率很大时，光伏增多用来供给直流负荷。随着直流负荷比率提高，储能接入容量稍微变小。由于直流负载接入直流子微网增多，减少了储能能量传输的损耗，所以接入容量减小。

图 6 给出了不同直流负荷比率下交直流混合微网与主网的交互总电量。能量的交互主要是微网向主网购电，购电成本占运行成本的 80% 以上，分布式电源发电和储能的运行成本较低。随着直流负荷比率不断提升，购电的总电量逐渐减小，售电的总

电量逐渐增加。这是因为随着直流负荷比率的提高，直流子微网侧配置更多的分布式电源，而且能量的传输效率相比交流子微网侧更高，更多的分布式能源供给负荷，微网对大电网的购电依赖减小。

图 7 给出了不同直流负荷比率下子微网间的交互总电量，微网间的能量交互主要由直流子微网向交流子微网传输。随着直流负荷比率不断提高至 0.5，交流子微网侧需要的能量减小，因此直流子微网向交流子微网传输的能量逐渐减小。直流负荷比率在 0.5~0.9 时，直流子微网需要更多的分布式电源来支撑直流子微网负载，并且此时微网向主网售电逐渐增多，但在 0.7~0.9 有所下滑，这是因为此时交流子微网风机发出的电能很小，50% 以上的交流负荷靠微网间传输的能量来支撑，随着交流负荷减少，微网间的能量传输减小。随着直流负荷比率不断提高，交流子微网向直流子微网传输的能量逐渐增大，因为交流负荷逐渐减少使得微网向主网购买的电能更多地用于直流子微网侧。

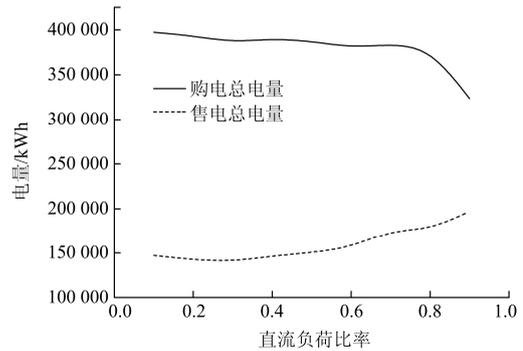


图 6 交直流混合微网购电售电总电量
Fig. 6 Total purchasing and sales power of hybrid AC/DC microgrid

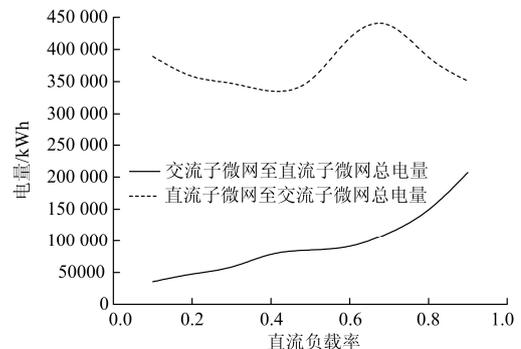


图 7 交直流混合微网子微网间交互总电量

Fig. 7 Total interactive power of hybrid AC/DC submicrogrid

4.3.3 不同直流负荷比率下的交直流混合微网与交流微网优化配置分析比较(Case3)

Case3 比较了不同直流负荷比率下交直流混合

微网与交流微网的优化配置, 所搭建的交流微网模型如图 2 所述。表 6 给出了不同直流负荷比率下交流微网优化配置结果。图 8—图 10 分别给出了不同负荷比率下交直流混合微网与交流微网的总成本、安装成本和运行成本。

在不同负荷比率下, 交直流混合微网的总成本低于交流微网的总成本。随着负荷比率的提高, 两者间总成本的差距越来越大。直流负荷比率 0.9 时, 交直流混合微网相比交流微网成本减少了 13.6%。从图 9 中可以看出, 交直流混合微网比交流微网的安装成本低, 交直流混合微网有利于分布式电源的接入, 使其安装成本更少。从图 10 中可以看出, 在直流负荷比率 0.1~0.7 交直流混合微网运行成本较高, 交直流混合微网中配置了更多的储能电池用于与主网的交互和微网间的交互。因此, 交直流混合微网向主网购电较多, 总运行成本有所增加。但当直流负荷比率在 0.8~0.9 时, 交直流混合微网运行成本低于交流微网, 此时直流子微网侧分布式电源发电量占负荷比例 90%以上, 微网从主网购电减少, 总运行成本降低。

图 11 给出了交直流混合微网与交流微网的可靠性成本, 交直流混合微网的可靠性成本分为交流

表 6 不同直流负荷比率下交流微网优化配置结果

Table 6 Optimal result of AC microgrid in different DC load ratios

直流负荷比率	风机/台	光伏/台	储能/台	主网交互最大功率/kW
0.1	46	244	15	118
0.2	46	245	15	119
0.3	46	246	15	119
0.4	46	246	15	121
0.5	47	247	16	122
0.6	47	248	16	122
0.7	47	249	16	123
0.8	47	249	16	124
0.9	47	250	16	124

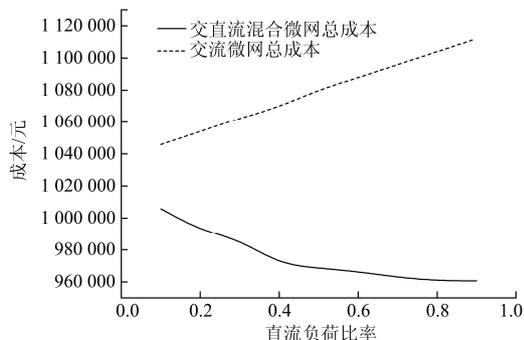


图 8 交直流混合微网与交流微网总成本

Fig. 8 Total cost of hybrid AC/DC microgrid and AC microgrid

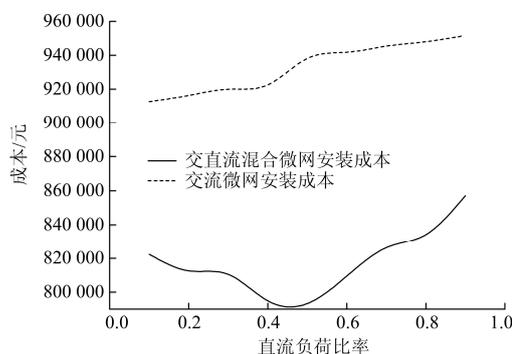


图 9 交直流混合微网与交流微网安装成本

Fig. 9 Installation cost of hybrid AC/DC microgrid and AC microgrid

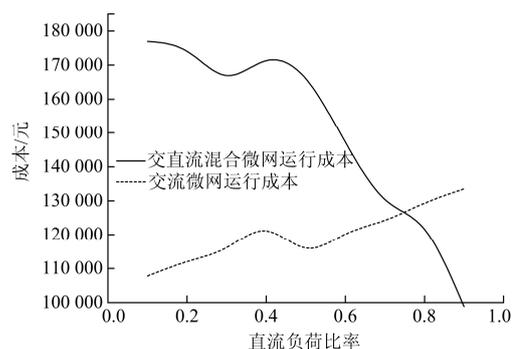


图 10 交直流混合微网与交流微网运行成本

Fig. 10 Operation cost of hybrid AC/DC microgrid and AC microgrid

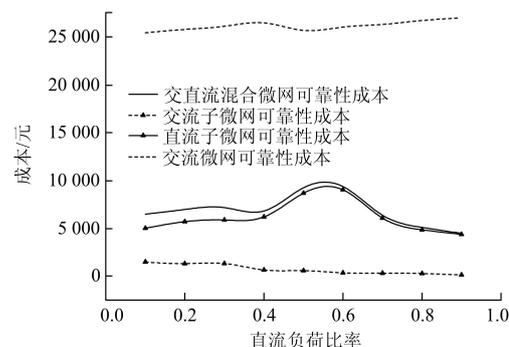


图 11 交直流混合微网与交流微网的可靠性成本

Fig. 11 Reliability cost of hybrid AC/DC microgrid and AC microgrid

子微网可靠性成本和直流子微网可靠性成本。交流子微网的可靠性成本相比直流子微网的可靠性成本低, 这是因为交流子微网既与主网相连也与直流子微网相连, 其可靠性较高。交流子微网随着交流负载的减小, 失负荷量也不断减小, 其可靠性成本逐渐降低。而直流子微网的可靠性成本先增加后减小。这是因为刚开始随着直流负载增多失负荷量增大,

其可靠性成本增大,但是随着直流子微网分布式电源容量占微网总容量的比例越来越大,其对交流子微网的依赖越来越小,直流子微网的孤岛能力提高,所以其可靠性成本逐渐减小。在不同负荷比率下,交直流混合微网的可靠性成本只有交流微网的可靠性成本 30%左右。这是因为交直流混合微网由两个子微网组成,能量供给更加灵活,分布式电源输送效率更高,失负荷相比交流微网更少。

5 结论

本文建立了能够反映交直流混合微网特性的优化配置模型。基于该模型,开展了不同场景下优化配置的研究。结果分析表明:

1) 高昂的装机成本是现阶段微网经济效益差的主要原因。因为直流子微网的优势,风电机组作为分布式电源的主要形式更多地接入了直流子微网。

2) 在不同直流负荷比率下,风电机组仍是微网的主要分布式电源,光伏机组容量小运行成本低,有利于调节子微网间的能量流动。随着直流负荷比率的提高,更多的分布式能源供给负荷,微网对大电网的购电依赖减小。

3) 随着直流负荷比率的提高,交直流混合微网的总成本逐渐减小,与交流微网相比优势更加明显。交直流混合微网相比交流微网能量供给更加灵活,失负荷更少,可靠性更高。

参考文献

- [1] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [2] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微电网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 6-11.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 6-11.
- [3] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [4] LIU X, WANG P, LOH P C. A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 278-286.
- [5] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
- LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [6] MA T, CINTUGLU M H, MOHAMMED O A. Control of hybrid AC/DC microgrid involving storage, renewable energy and pulsed loads[C] // 2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 18-22, 2015, Addison, USA: 1-8.
- [7] 任志航, 李民, 马凯琪, 等. 交直流混合微电网微元建模与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 44(21): 82-88.
REN Zhihang, LI Min, MA Kaiqi, et al. Modeling & control of hybrid AC/DC micro-grid micro components[J]. Power System Protection and Control, 2017, 44(21): 82-88.
- [8] 陆晓楠, 孙凯, GUERRERO J, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 35-42.
LU Xiaonan, SUN Kai, GUERRERO J, et al. DC hierarchical control system for microgrid applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 35-42.
- [9] TEIMOURZADEH B P, SHAHPARASTI M, PARS A M M, et al. Energy management and operation modelling of hybrid AC-DC microgrid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(10): 1700-1711.
- [10] 谭颖, 吕智林, 李捷. 基于改进 ELM 的风/光/柴/储独立微网分布式电源多目标容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 63-70.
TAN Ying, LÜ Zhilin, LI Jie. Multi-objective optimal sizing method for distributed power of wind-solar-diesel-battery independent microgrid based on improved electromagnetism-like mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 63-70.
- [11] 薛美东, 赵波, 张雪松, 等. 并网型微网的优化配置与评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 6-13.
XUE Meidong, ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, et al. Integrated plan and evaluation of grid connected microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 6-13.
- [12] 汪湘晋, 赵波, 吴红斌, 等. 并网型交直流混合微电网优化配置分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 55-62.
WANG Xiangjin, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal sizing analysis of grid connected hybrid AC-DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 55-62.
- [13] LOTFI H, KHODAEI A. AC versus DC microgrid

- planning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 296-304.
- [14] 张美琪. 兼容分布式电源的直流配电系统的分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
ZHANG Meiqi. Analysis and research of DC distribution system compatible with distributed generation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [15] 胡骅, 徐冲, 吴汕, 等. 影响用户侧分布式发电经济性因素分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 29-33.
HU Hua, XU Chong, WU Shan, et al. Analysis of factors influencing economy of customer side distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 29-33.
- [16] 欧林, 赵晓龙, 段祥骏, 等. 计及信息系统故障的配电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 104-111.
OU Lin, ZHAO Xiaolong, DUAN Xiangjun, et al. Reliability analysis of distribution network considering the fault of information system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 104-111.
- [17] YANG Hongxing, ZHOU Wei, LU Lin, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm[J]. Solar Energy, 2008, 82(4): 354-367.
- [18] 张明锐, 陈洁, 杜志超, 等. 考虑交互功率控制的微网经济运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1013-1023.
ZHANG Mingrui, CHEN Jie, DU Zhichao, et al. Economic operation of micro-grid considering regulation of interactive power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1013-1023.
- [19] 刘坤, 王克文, 祁小鹏. 基于元件故障率曲线的配电网可靠性评估和配电终端优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 49-56.
LIU Kun, WANG Kewen, QI Xiaopeng. Reliability evaluation and distribution terminal optimal configuration of power distribution system based on bathtub curve of component failure rate[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 49-56.
- [20] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.
BIE Zhaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.
- [21] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [22] 丁明, 楚明娟, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行优化建模与不确定性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 1-8.
DING Ming, CHU Mingjuan, PAN Hao, et al. Operation optimization modeling and uncertainty analysis for hybrid AC DC microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 1-8.

收稿日期: 2017-07-06; 修回日期: 2017-08-17

作者简介:

丁明(1956—), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划及其可靠性、新能源技术及其应用; E-mail: mingding56@126.com

史盛亮(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源发电及微网优化配置。E-mail: ssl123wangyi@163.com

(编辑 葛艳娜)