

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.015

离网直流微网群混合储能容量优化配置方法

阮绵晖¹, 郑建平², 刘尧¹, 廖毅³, 曹安琪¹, 张跃⁴, 甘德树¹

(1. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519000; 2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510000; 3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510000; 4. 广东电网有限责任公司, 广东 广州 510000)

摘要:为了优化储能系统容量配置,提高直流微网群的供电可靠性和经济性,文中提出了一种考虑各子微网互为备用的独立型直流微网群混合储能联合优化配置方法。首先,以直流微网群混合储能整体投资运维等年值成本最低为优化目标,建立混合储能容量配置模型;其次,在不失各个子微网混合储能容量配置独立性的前提下,进一步降低混合储能的配置成本;最后,以双直流微网群为算例对象,通过对比独立优化与联合优化的配置结果说明了利用微网群功率互联的特点能够大幅降低混合储能系统投资成本,提高微网群运行稳定性,从而证明文中所提配置方法的优越性。该方法后期可为独立型直流微网群的规划建设提供依据。

关键词:直流微电网群;混合储能;容量配置;粒子群算法;联络线能量约束

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)03-0099-07

0 引言

储能系统作为微电网^[1-2]中必不可少的重要组成部分,承担着平抑分布式电源功率波动以及削峰填谷等任务。随着直流微电网^[3]规模和数量的不断增加,地理位置毗邻的多个直流微电网可联结成直流微网群,以增强微电网对小概率极端事件的紧急应对能力。

当前,国内外针对微电网储能优化配置问题的研究已经取得了不少的成果。文献[4]提出一种优化微网群联络线功率的混合储能容量优化方法;文献[5]建立以全生命周期费用理论为基础的储能容量优化配置模型;文献[6]提出一种基于改进粒子群算法的储能容量生命周期费用优化配置方法;文献[7]提出一种基于机会约束规划的混合储能优化配置方法。文献[4-7]均注重单一微电网的电源优化配置研究。当直流微网数目增多时,直流微网之间互联的特性有利于进一步优化储能的容量配置,降低直流微网群整体的建设投资成本。文献[8]建立两阶段优化模型,考虑了多主体微电网中用户的电价激励需求响应,实现了微电网风-光-柴-储的容量优化配置。文献[9]以系统成本最小为优化目标函数,对风光蓄发电系统容量进行初级优化,从而获得最优系统的容量优化配置。文献[10]基于动态规划方法求解储能容量配置的双层决策

收稿日期:2020-11-23;修回日期:2020-12-31

基金项目:国家能源局首批“互联网+”智慧能源(能源互联网)示范项目“支持能源消费革命的城市—园区双级”

模型。此外,部分研究多着眼于多目标优化,如经济效益最优、提高可再生资源利用率^[11]、降低污染物排放^[12]、提高供电可靠性^[13]。

文中提出了一种离网运行条件下直流微网混合储能容量优化配置方法。首先,考虑到微网群功率互联互济这一特点,制定了一种适用于独立型直流微网群的运行策略,通过低通滤波器算法实现净负荷功率的分解以及混合储能系统的功率分配;然后,以混合储能系统投资总成本最小为目标函数,建立独立型直流微电网群混合储能系统的容量优化配置模型,并利用改进型自适应粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)对模型进行优化求解;最后,以某地的独立型直流多微网群作为算例,通过对比设计方案的结果,分析验证了文中所提方法的有效性。

1 直流微网群

1.1 直流微网群的拓扑结构

直流微电网通过公共连接点与配电网相连接,可根据运行模式分为并网型和独立型,其中独立型是指断开与配电网的连接,通过自身分布式电源和储能系统来实现功率平衡,并网型是指保持与配电网的连接,依靠大电网惯性来实现功率平衡。直流微电网一般由分布式电源(如风力发电机和太阳能电池等),混合储能系统,能量转换装置以及本地负荷组成。

直流微网群则是通过直联络线将地理位置上毗邻的多个直流微电网互联,通过群内子微网之

间的能量调度和互济,进一步增强微网群的供电可靠性和稳定性,提高分布式能源的利用率。常见的独立型直流微网群联结拓扑如图 1 所示。

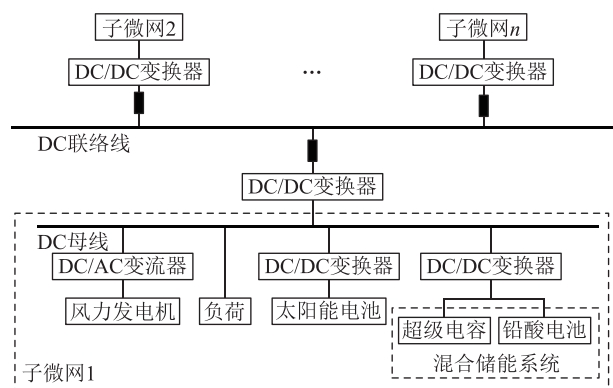


图 1 常见的独立型直流微网群拓扑

Fig.1 Common topology of DC microgrid cluster

1.2 混合储能系统

1.2.1 混合储能系统简介

在独立型直流微电网中,由于风电和太阳能发电等分布式电源的输出功率具有间歇性和随机性的特点^[14],且负荷变化存在波动性,因此须提供储能系统以保证独立型直流微电网可持续稳定运行。储能系统可在风光出力不足时为负荷提供所需功率,在风光出力过剩时储存多余能量。储能装置可分为功率型储能和能量型储能^[15],功率型储能的装置常采用超级电容器,而能量型储能可采用铅酸电池。相对于单一储能,采用混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)可大幅提高系统的可靠性和经济性,且可延长能量型储能的使用寿命,避免频繁充放电。

因此,文中针对超级电容器和铅酸电池相结合的混合储能系统容量优化配置问题进行研究。

1.2.2 混合储能系统的功率分配

根据两者不同的特性,超级电容器和铅酸电池可分别提供混合储能系统总功率的高频和低频分量,即功率型分量和能量型分量。文中采用低通滤波器算法进行混合储能功率分配,其计算公式为:

$$\begin{cases} P_b = P_H \frac{1}{T_L s + 1} \\ P_s = P_H - P_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为拉式变换的复变量; P_s, P_b 分别为超级电容和铅酸电池需提供的功率^[16]; P_H 为混合储能系统的输出总功率; T_L 为低通滤波器的时间常数, T_L 的取值必须满足采样定理的约束条件,可表示为:

$$T_L = \frac{1}{2\pi f_p} > \frac{T_s}{\pi} \quad (2)$$

式中: f_p 为分解频率; T_s 为采样时间。

2 独立型直流微网群储能系统控制策略

文中制定了一种独立型直流微网群的运行控制策略,优化了微网群内各子微网混合储能系统之间的能量调度和互济,以维持微网群的功率平衡,实现微网群的稳定运行,策略流程如图 2 所示。

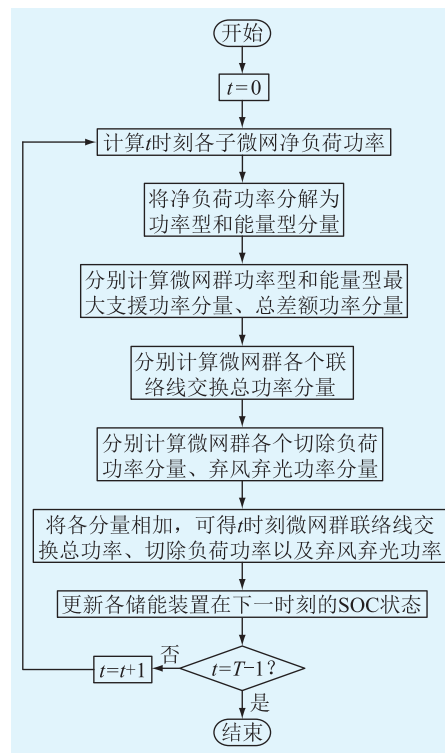


图 2 微网群运行控制策略流程

Fig.2 Microgrid cluster control strategy

首先假设一个独立型直流微网群含有 n 个子微网,且已知第 i 个子微网的超级电容和铅酸电池容量分别为 $E_{s,i}$ 和 $E_{b,i}$,额定功率分别为 $P_{s,i}$ 和 $P_{b,i}$,各储能装置的电池剩余电量(state of charge, SOC)初始值均为 50%。以下是运行控制策略的详细步骤说明。

(1) 载入各子微网所在地的风力、光照强度数据以及负荷曲线数据,分别计算在 t 时刻各子微网的净负荷功率 $P_i(t)$,其计算公式为:

$$P_i(t) = P_L(t) - P_p(t) - P_w(t) \quad (3)$$

式中: $P_L(t), P_p(t), P_w(t)$ 分别为 t 时刻的本地负荷需求功率、太阳能电池组输出功率和风电机组输出功率。当 $P_i(t) > 0$ 时,混合储能系统放电为负荷提供能量;当 $P_i(t) < 0$ 时,混合储能系统充电以存储风光发电过剩能量。

(2) 分解净负荷功率。各子微网的净负荷功率将优先考虑由自身的混合储能系统来补偿,若存在功率缺额再考虑寻求微网群内其他子微网的功率

援助。

利用 1.2.2 节所述方法先将各子微网的净负荷功率分解为功率型分量 $P_{i,s}$ 和能量型分量 $P_{i,b}$, 并由超级电容器和铅酸电池分别负责平衡。计算 t 时刻各净负荷功率分量的功率缺额 $\Delta P_s(t), \Delta P_b(t)$, 为方便下文描述, 文中将用 E 统一指代下标符号 s 或 b, 并用 $\Delta P_E(t)$ 表示, 如下式所示。

$$\Delta P_E(t) = P_E(t) - |P_{i,E}(t)| \quad (4)$$

式中: $P_E(t), P_{i,E}(t)$ 分别为 t 时刻超级电容或铅酸电池提供的最大功率及其期望补偿的净负荷功率分量。当 $\Delta P_E(t) > 0$ 时, 储能装置不仅能完成自身净负荷功率平衡任务, 还可以向其他子微网支援功率 $\Delta P_E(t)$; 当 $\Delta P_E(t) < 0$ 时, 储能装置不能完全平衡自身净负荷功率分量。

(3) 根据 $\Delta P_E(t)$ 值对储能装置分类讨论。

对于 $\Delta P_E(t) > 0$ 的储能装置, 分别计算 t 时刻微网群所能提供的功率型和能量型最大支援功率分量 $P_{S,E}(t)$, 即:

$$P_{S,E}(t) = \sum_{i=1}^k \Delta P_{E,i}(t) \quad (5)$$

式中: k 为 $\Delta P_E(t) > 0$ 的储能装置总个数。

对于 $\Delta P_E(t) < 0$ 的储能装置, 根据净负荷功率分量 $P_{i,E}(t)$ 可分为如下两类: $P_{i,E}(t) > 0$ 的储能装置, 需要其他子微网支援功率 $-\Delta P_E(t)$; $P_{i,E}(t) < 0$ 的储能装置, 需要向其他子微网释放功率 $-\Delta P_E(t)$ 。分别累加可得 $\Delta P_{E+}(t)$ 和 $\Delta P_{E-}(t)$, 并可得到两总功率之差 $\Delta P_{T,E}(t)$, 即:

$$\Delta P_{T,E}(t) = P_{E+}(t) - P_{E-}(t) \quad (6)$$

式中: $\Delta P_{T,E}(t)$ 为 t 时刻微网群的功率型和能量型储能总差额功率分量; $\Delta P_{E+}(t), \Delta P_{E-}(t)$ 分别为微网群内所需支援总功率和所需释放总功率。

(4) 分别计算微网群通过联络线的功率型和能量型交换功率分量 $P_{L,E}(t)$, 并根据功率平衡约束制定切除负荷或弃风弃光策略。

若 $P_{S,E}(t) > |\Delta P_{T,E}(t)|$, 则说明微网群在 t 时刻能通过联络线互联实现该功率分量的平衡, 此时 $P_{L,E}(t) = |\Delta P_{T,E}(t)|$;

若 $P_{S,E}(t) < |\Delta P_{T,E}(t)|$, 则说明微网群仍然不能在 t 时刻通过联络线互联达到功率平衡, 此时 $P_{L,E}(t) = P_{S,E}(t)$ 。为了实现该功率分量平衡, 需要根据此时总差额功率分量 $\Delta P_{T,E}(t)$ 确定以下策略: 若 $\Delta P_{T,E}(t) > 0$, 直流微网群应切除负荷功率分量 $P_{11,E}(t)$ 值为 $\Delta P_{T,E}(t) - \Delta P_{S,E}(t)$; 若 $\Delta P_{T,E}(t) < 0$, 直流微网群应弃风弃光, 其功率分量 $P_{12,E}(t)$ 大小为 $-\Delta P_{T,E}(t) - \Delta P_{S,E}(t)$ 。

(5) 分别计算出 $P_L(t), P_{11}(t)$ 以及 $P_{12}(t)$, 即:

$$\begin{cases} P_L(t) = P_{L,s}(t) + P_{L,b}(t) \\ P_{11}(t) = P_{11,s}(t) + P_{11,b}(t) \\ P_{12}(t) = P_{12,s}(t) + P_{12,b}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_L(t), P_{11}(t), P_{12}(t)$ 分别为 t 时刻直流微网群通过联络线的交换总功率、切除负荷总功率、总弃风弃光功率; $P_{L,s}(t), P_{11,s}(t), P_{12,s}(t)$ 分别为 t 时刻直流微网群通过联络线的交换总功率高频分量、切除负荷总功率高频分量、总弃风弃光功率高频分量; $P_{L,b}(t), P_{11,b}(t), P_{12,b}(t)$ 分别为 t 时刻直流微网群通过联络线的交换总功率低频分量、切除负荷总功率低频分量、总弃风弃光功率低频分量。

(6) 更新各子微网的混合储能系统 SOC 值, 得到下一时刻的 SOC 初始状态。进入下一时刻, 重复各步骤, 直至循环结束。

3 独立型直流微电网群混合储能系统的容量优化配置模型

文中建立了一种独立型直流微电网群混合储能系统的容量优化配置模型, 并利用改进型自适应粒子群算法对该模型进行优化求解。

3.1 优化变量

文中设定所有直流子微网的混合储能系统均由超级电容器和铅酸电池组成。假设一个直流微网群内有 n 个子微网, 则模型决策变量分别为超级电容的额定容量 $E_{s,i}$ ($0 < i \leq n$), 额定功率 $P_{s,i}$ ($0 < i \leq n$), 铅酸电池的额定容量 $E_{b,i}$ ($0 < i \leq n$), 额定功率 $P_{b,i}$ ($0 < i \leq n$)。

3.2 目标函数

文中综合考虑直流微电网群的混合储能系统投资运行成本, 从而实现直流微电网群的经济效益最大化, 由此可得模型目标函数为:

$$\min C \quad (8)$$

式中: C 为混合储能系统的投资运行成本, 可以分为超级电容器和铅酸电池的购置成本、运行维护成本和更换成本。

由于超级电容器和铅酸电池的寿命各不相同, 为避免不同储能装置寿命周期差异性所带来的影响, 文中采用净年值法将购置成本费用折算成等年值。则可以得到直流微电网群的混合储能系统总年均投资运行成本为^[17]:

$$C = \sum_{i=1}^n (C_{s,s,i} + C_{s,b,i} + C_{r,s,i} + C_{r,b,i} + C_{o,s,i} + C_{o,b,i}) \quad (9)$$

式中: n 为直流微网群内子微网的数量; $C_{s,s}, C_{s,b}$ 分

别为超级电容器和铅酸电池的购置成本; $C_{r,s}, C_{r,b}$ 分别为超级电容器和铅酸电池的更换成本; $C_{0,s}, C_{0,b}$ 分别为超级电容器和铅酸电池的运行维护成本。

3.2.1 购置成本

超级电容器和铅酸电池的购置成本 $C_{s,s}, C_{s,b}$ 由其额定容量, 额定功率以及必要的辅助设施成本来决定, 其计算公式如下:

$$\begin{cases} C_{s,s} = \left(C_{E,s} \frac{E_s}{\eta_s} + C_{p,s} P_s \right) R \\ C_{s,b} = \left(C_{E,b} \frac{E_b}{\eta_b} + C_{p,b} P_b + C_{B,b} E_b \right) R \end{cases} \quad (10)$$

式中: $C_{E,s}, C_{E,b}$ 分别为超级电容和铅酸电池的单位能量价格; η_s, η_b 分别为超级电容和铅酸电池的能量转换效率; $C_{p,s}, C_{p,b}$ 分别为超级电容和铅酸电池的单位功率价格; $C_{B,b}$ 为辅助设施的单位能量成本; R 为等年值折算系数, 等年值折算系数的计算公式如下:

$$R = \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \quad (11)$$

式中: r 为年利率; Y 为项目寿命周期。

3.2.2 更换成本

当储能设备的寿命周期小于项目的实际寿命周期时, 就需要对储能设备进行更换, 超级电容和铅酸电池的更换成本 $C_{r,s}, C_{r,b}$ 计算如下:

$$\begin{cases} C_{r,s} = C_{E,s} \frac{E_s R}{\eta_s} \sum_{\beta=1}^{k_s} \frac{0.95^{\beta q}}{(1+r)^{\beta q}} \\ C_{r,b} = C_{E,b} \frac{E_b R}{\eta_b} \sum_{\beta=1}^{k_b} \frac{0.95^{\beta q}}{(1+r)^{\beta q}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: q 为储能装置的寿命周期; β 为储能装置的更换序数; k_s, k_b 分别为超级电容和铅酸电池的更换次数。

3.2.3 运维成本

超级电容和铅酸电池的运维成本 $C_{0,s}, C_{0,b}$ 包括人力和管理成本, 主要与其额定功率有关, 而与其运行过程无关, 其计算公式为:

$$\begin{cases} C_{0,s} = C_{f,s} P_s \\ C_{0,b} = C_{f,b} P_b \end{cases} \quad (13)$$

式中: $C_{f,s}, C_{f,b}$ 分别为超级电容和铅酸电池在单位功率下的运行维护成本。

3.3 约束条件

3.3.1 功率平衡约束

对于任意时刻 t , 微电网群都必须保证功率平衡, 需要满足以下公式:

$$\sum_{i=1}^n [P_{L,i}(t) - P_{P,i}(t) - P_{W,i}(t)] = \sum_{i=1}^n P_{i,i}(t) \quad (14)$$

式中: $P_{L,i}(t), P_{P,i}(t), P_{W,i}(t), P_{i,i}(t)$ 分别为在 t 时刻下, 第 i 个子微网的负荷功率、太阳能电池组出力、风力发电机组出力、净负荷功率。

3.3.2 储能系统约束

在任意 t 时刻, 超级电容器和铅酸电池的充放电功率均不能超过其额定功率, 可表示为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{s,i}(t) \leq P_{s,i} \\ 0 \leq P_{b,i}(t) \leq P_{b,i} \end{cases} \quad 0 < i \leq n \quad (15)$$

式中: $P_{s,i}(t), P_{b,i}(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个子微网的超级电容器、铅酸电池的充放电功率; $P_{s,i}, P_{b,i}$ 分别为 t 时刻第 i 个子微网的超级电容器、铅酸电池的额定功率。

为了确保储能装置的寿命和运行安全, 防止其过充或过放, 必须对超级电容器和铅酸电池的 SOC 值进行约束, 不能超过其最大值和最小值, 表示为:

$$\begin{cases} S_{\min,s} \leq S_{s,i}(t) \leq S_{\max,s} \\ S_{\min,b} \leq S_{b,i}(t) \leq S_{\max,b} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $S_{\min,s}, S_{\max,s}$ 分别为超级电容器的 SOC 最小值、最大值; $S_{\min,b}, S_{\max,b}$ 分别为铅酸电池的 SOC 最小值、最大值; $S_{s,i}(t), S_{b,i}(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个子微网的超级电容器和铅酸电池的 SOC 值。

3.3.3 缺电概率约束

由于缺电概率 (loss of load probability, LOLP) 与微电网群的运行可靠性有直接的关系, 因此缺电概率不能超过一定限值, 否则会影响到负荷的正常供电。缺电概率可表示为:

$$L = \frac{\sum_{t=0}^{Z-1} P_{ll}(t)}{\sum_{t=0}^{Z-1} \sum_{i=1}^n P_{L,i}(t)} \leq L_{\max} \quad (17)$$

式中: n 为子微网个数; $P_{ll}(t)$ 为 t 时刻的微电网群总缺电功率; L_{\max} 为微电网群所允许的 LOLP 最大值; Z 为时间周期, 表示 24 h, 共 96 个点。

3.3.4 弃风弃光率约束

为了使风能和太阳能尽可能被利用, 微电网群的弃风弃光率 η_L 不能超过一定限值, 可表示为:

$$\eta_L = \frac{\sum_{t=0}^{Z-1} P_{12}(t)}{\sum_{t=0}^{Z-1} \sum_{i=1}^n [P_{W,i}(t) + P_{P,i}(t)]} \leq \eta_{L,\max} \quad (18)$$

式中: $P_{12}(t)$ 为 t 时刻微电网群的弃风弃光损失功率; $\eta_{L,\max}$ 为微电网群所允许的最大弃风弃光率值。

3.3.5 子微网间的联络线功率及交换能量约束

由于直流子微网是通过联络线实现功率互联, 但是流经变流器的功率不能超过其所允许的额定

功率值,可表示为:

$$|P_L(t)| \leq P_c \quad (19)$$

式中: $|P_L(t)|$ 为 t 时刻下通过联络线的交换功率绝对值; P_c 为联络线最大功率限制。

为了保证每个子微网均具有一定的清洁能源就地消纳能力,以及能够应对联络线出现故障时的紧急情况,通过联络线的交换能量不能超过联络线两端子微网的负荷需求能量之和,可表示为:

$$\sum_{t=0}^{Z-1} E_L(t) = K \sum_{t=0}^{Z-1} [E_{ld1}(t) + E_{ld2}(t)] \quad (20)$$

式中: $E_L(t)$ 为联络线交换能量; $E_{ld1}(t)$, $E_{ld2}(t)$ 分别为联络线两端子微网的负荷需求能量; K 为能量比例约束系数。

4 算例分析

4.1 约束条件

文中以含有 2 个子微网的独立型直流微电网群项目为例进行混合储能系统的容量优化配置,以验证模型的正确性和有效性,将 2 个子微网分别命名为子微网 A 和子微网 B。子微网 A 最大负荷为 460 kW,风力发电系统额定功率为 300 kW,光伏发电系统额定功率为 200 kW;子微网 B 最大负荷为 441 kW,风电机组额定出力为 400 kW,太阳能电池组额定出力为 300 kW。2 个子微网间的联络线最大功率限制为 400 kW。每个子微网所允许的最大 L 为 0.4%,最大弃风弃光率为 10%。该算例选取直流微电网群一个典型日的的数据,并设定采样时间 T_s 为 1 s,采样点数 N 为 86 401。由于子微网 A、B 的分布式电源装机容量以及负荷功率均不相同,因此两者的净负荷功率曲线存在一定差异,分别如图 3(a)、(b)所示。

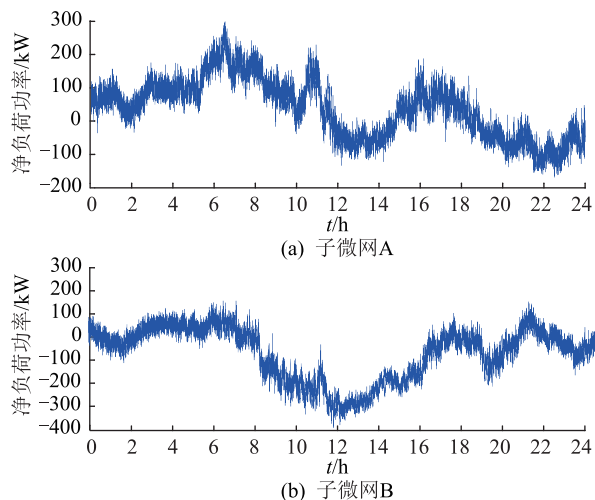


图3 微电网群各子微网净负荷功率

Fig.3 Net load power of each sub-microgrid

该直流微电网群的混合储能系统由超级电容和铅酸电池组成,其相关参数如表 1 所示。该直流微电网群项目寿命周期为 20 a,年利率定为 10%,则等年值折算系数 R 取 0.117。

表 1 混合储能系统相关参数表

Table 1 Parameters of HESS

装置重要参数	超级电容	铅酸电池
单位能量价格/[元·(kW·h) ⁻¹]	37 000	1 240
单位功率价格/[元·(kW) ⁻¹]	366	1 085
辅助设施单位能量成本/[元·(kW·h) ⁻¹]	0	310
寿命周期/a	20	5
单位运维成本/[元·(kW) ⁻¹]	50	31
SOC 上限/%	95	90
SOC 下限/%	5	10
能量转换效率/%	85	85

4.2 算例方案设计

为了比较独立型直流微电网联结成群对于混合储能优化配置的影响,以及验证文中所提混合储能系统优化配置模型的有效性,分别设置了 2 种算例方案。

(1) 方案 1。子微网 A 和子微网 B 联结成群,子微网间功率可以互联互通,但必须满足交换电能不得超过总负荷大小 30% 的约束。

(2) 方案 2。子微网 A 和子微网 B 独立运行,两者之间功率不流通。采用改进的适应型 PSO 算法优化求解后,2 种方案的混合储能系统优化配置结果如表 2 所示,表中 A、B 分别为子微网 A 和 B。

表 2 混合储能系统优化配置结果对比

Table 2 Comparison of optimization configuration results of HESS

配置结果	方案 1	方案 2
低通滤波器时间常数	96.98	50
A/B 超级电容额定容量/(kW·h)	1.23/1.45	5.65/5.95
A/B 铅酸电池额定容量/(kW·h)	1 983/480	5 234/2 916
A/B 超级电容额定功率/kW	169/201	286/300
A/B 铅酸电池额定功率/kW	304/143	792/437
A/B 最大缺电概率/%	0.11/0.14	0.72/0.84
A/B 最大弃风弃光率/%	0.07/0.09	0/0
微电网群投资总成本/万元	175.12	570.72

4.3 算例结果分析

在方案 1 中,2 个子微网的混合储能系统 SOC 变化曲线分别如图 4(a)、(b)所示。

2 个子微网通过联络线实现功率互联互通,其联络线功率变化如图 5 所示。在图 5 中,联络线功率大于 0 表示功率传输方向是从子微网 A 传向子微网 B,小于 0 则表示从子微网 B 传向子微网 A。

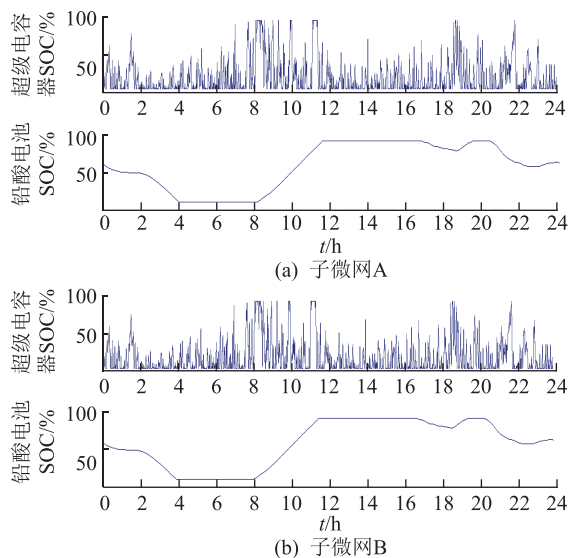


图4 各子微网混合储能系统 SOC 变化曲线
Fig.4 SOC curve of each sub-microgrid HESS

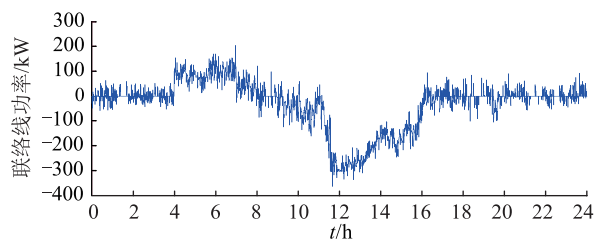


图5 微电网群联络线功率
Fig.5 Tie line power of microgrid cluster

根据表 2 中 2 种方案下的结果数据可知,采用方案 1 优于方案 2。采用方案 1 的直流微网群投资总成本为 175.12 万元,比方案 2 减少约 395.6 万元。此外,采用方案 1 的直流微电网群最大缺电率均比方案 2 更低,并且能够满足 0.4%的约束条件。

由此可见,相比于独立型直流子微网独立运行,将多个独立型直流子微网联结成群不仅能大大减小直流微电网群的投资总成本,也能降低最大缺电率,提高微网群运行稳定性。

5 结语

文中提出了一种适用于独立型直流微电网群的混合储能系统容量配置方法。该方法首先考虑到微网群功率互联互济这一特点,制定了一种适应独立型直流微电网群的运行策略,并通过低通滤波器算法实现净负荷功率的分解以及混合储能系统的功率分配。然后,根据运行策略建立以混合储能系统投资总成本最小为目标函数的独立型直流微电网群混合储能系统的容量优化配置模型,并利用改进型自适应 PSO 粒子群算法进行优化求解。文中以某地由 2 个相邻子微网组成的独立型直流多微网

群作为算例,并通过设计方案对比的结果说明了利用微网群功率互联的特点能够大大降低混合储能系统投资成本,提高微网群运行稳定性,从而证明了文中方法的有效性。

参考文献:

[1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong,et al. Overview on microgrid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(19):100-107.

[2] 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,LYU Zhipeng,et al. Overview on microgrid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[3] 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.

[4] 肖峻,张泽群,张磐,等. 用于优化微网联络线功率的混合储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(12):19-26.
XIAO Jun,ZHANG Zequn,ZHANG Pan,et al. A capacity optimization method of hybrid energy storage system for optimizing tie-line power in microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(12):19-26.

[5] 杨珺,张建成,周阳,等. 针对独立风光发电中混合储能容量优化配置研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 38-44.
YANG Jun,ZHANG Jiancheng,ZHOU Yang,et al. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in stand-alone wind/PV power generation system [J]. Power System Protection and Control, 2013,41(4):38-44.

[6] 杨国华,朱向芬,周鑫,等. 基于遗传算法的风电混合储能容量优化配置 [J]. 电气传动,2015,45(2):50-53.
YANG Guohua,ZHU Xiangfen,ZHOU Xin,et al. Hybrid energy storage capacity optimization for independent wind generation system based on genetic algorithm [J]. Electric Drive, 2015,45(2):50-53.

[7] 谢石晓,杨莉,李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法 [J]. 电网技术,2012,36(5):79-84.
XIE Shixiao,YANG Li,LI Li'na. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 79-84.

[8] 马国龙,蔡泽祥,刘平. 考虑电价激励需求响应下多主体微电网电源容量优化 [J]. 电力自动化设备,2019,39(5):96-102,108.
MA Guolong,CAI Zexiang,LIU Ping. Power capacity optimization of microgrid with multiple subjects considering price incentive demand response [J]. Electric Power Automation Equip-

- ment, 2019, 39(5):96-102, 108.
- [9] 于东霞, 张建华, 王晓燕, 等. 并网型风光储互补发电系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10):59-65.
- YU Dongxia, ZHANG Jianhua, WANG Xiaoyan, et al. Optimal capacity configuration of grid-connected wind-PV-storage hybrid power generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10):59-65.
- [10] 李建林, 郭斌琪, 牛萌, 等. 风光储系统储能容量优化配置策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6):1189-1196.
- LI Jianlin, GUO Binqi, NIU Meng, et al. Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6):1189-1196.
- [11] HAKIMI S M, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Optimal planning of a smart microgrid including demand response and intermittent renewable energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6):2889-2900.
- [12] 肖峻, 梁海深, 王旭东, 等. 基于滤波的孤立微网多目标规划设计方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3):596-602.
- XIAO Jun, LIANG Haishen, WANG Xudong, et al. Multiple objective planning and designing of island microgrid based on filtering[J]. Power System Technology, 2014, 38(3):596-602.
- [13] 李琳玮, 方兵, 陈明帆, 等. 含微网的配电网多目标优化规划研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2):116-122.
- LI Linwei, FANG Bing, CHEN Mingfan, et al. Research on multi-objective planning of distribution networks containing microgrids[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(2):116-122.
- [14] 陈旭, 张勇军, 黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1):143-151.
- CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1):143-151.
- [15] 赵卓立, 杨萃, 郑成立, 等. 微电网动态稳定性研究述评[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10):111-122.
- ZHAO Zhuoli, YANG Ping, ZHENG Chengli, et al. Review on dynamic stability research of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10):111-122.
- [16] 李世泽, 高素萍, 郭朝江. 混合储能多目标容量优化配置[J]. 电源学报, 2018, 16(4):174-180.
- LI Shize, GAO Suping, GUO Chaojiang. Multi-objective optimal capacity allocation of hybrid energy storage[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4):174-180.

作者简介:



阮绵晖

阮绵晖(1967),男,学士,高级工程师,从事电力系统规划设计工作(E-mail:137025512-30@139.com);

郑建平(1966),男,学士,研究员级高级工程师,从事电力系统规划设计工作;

刘尧(1987),男,硕士,高级工程师,从事电力系统规划设计工作。

Optimization configuration method for hybrid energy storage capacity of independent DC microgrid cluster

RUAN Mianhui¹, ZHENG Jianping², LIU Yao¹, LIAO Yi³, CAO Anying¹, ZHANG Yue⁴, GAN Deshu¹

(1. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China;

2. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

3. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

4. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to optimize the capacity allocation of the energy storage system and improve the power supply reliability and economy of the DC micro-grid cluster, a joint optimal allocation method of independent DC micro-grid cluster hybrid energy storage is proposed in this paper, in which each sub-grid is considered as a standby. Firstly, the optimal objective is to minimize the annual cost of the overall investment, operation and maintenance of the DC micro-grid cluster hybrid energy storage, and a hybrid energy storage capacity allocation model is established. Secondly, the configuration cost of hybrid energy storage is further reduced without losing the independence of the configuration of the hybrid energy storage capacity of each sub-micro grid. Finally, taking a double DC micro-grid cluster as an example, the results illustrate the advantage of micro-grid cluster of interconnected power by comparing the independent optimization and configuration of joint optimization. By applying the joint optimal allocation method, it greatly reduces investment cost of hybrid energy storage system and improves the micro-grid cluster of running stability. The superiority of the proposed configuration method is proved with the independent model of DC micro-grid cluster of planning and construction to provide certain scientific basis.

Keywords: DC micro-grid cluster; hybrid energy storage; capacity configuration; particle swarm optimization (PSO); tie line energy constraint

(编辑 李栋)