

DOI: 10.7500/AEPS20130719005

微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标

谭兴国^{1,2}, 王 辉², 张 黎², 邹 亮²

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南省焦作市 454003; 2. 山东大学电气工程学院, 山东省济南市 250061)

摘要: 复合储能在微电网功率平衡、平滑可再生能源波动、提升电能质量等方面发挥多重作用, 针对包含光伏发电、风力发电和典型负荷的微电网, 提出一种合理配置复合储能容量的方法。针对复合储能优化配置, 以装置成本最低、功率匹配最佳、可再生能源输出功率平滑度最好建立复合储能多目标优化数学模型, 采用自适应惯性权重的粒子群算法求解复合储能多目标函数最优解; 针对子目标函数权重系数的确定, 提出目标函数适应度离差排序法; 提出了定量评估微电网储能多目标优化效果的参数指标, 并以此为依据, 对比了微电网内蓄电池单一储能多目标优化与复合储能多目标优化结果。最后, 通过 MATLAB 编程进行实例验算, 验证了方法的合理、有效性。

关键词: 复合储能; 微电网(微网); 多目标优化; 离差排序法; 评价指标; 粒子群算法

0 引言

不同于传统电网, 微电网中的微电源等装置大多基于逆变器或小容量发电机, 系统惯性小, 阻尼不足, 不具备传统电网的抗扰动能力^[1]; 在微电网中, 光伏发电、风电等可再生能源发电的间歇性与随机性、负荷的随机投切, 以及微电源的离网、并网等过程给系统稳定运行和电能质量造成较大影响, 引起电压和频率波动, 甚至系统失稳^[2]。储能装置通过功率变换装置可实现功率的四象限灵活调节, 实现微电网内有功和无功功率的瞬时平衡, 提高了系统稳定性^[3]。由于储能系统的作用, 微电网可实现微电源和负荷两组不相关随机变量的解耦, 有效削弱风电和光伏发电等间歇性能源对微电网的负面影响。此外, 储能还是微电网定制电力技术的物理基础, 能满足用户对电能质量、供电可靠性和安全性的多种要求。

受限于储能技术的发展, 目前尚不具备某单一形式储能, 同时满足能量和功率的要求, 且技术成熟, 成本可接受; 考虑到不同储能的特点, 宜发展多元复合储能技术实现不同储能的优势互补, 最大限度地发挥储能技术的性能。目前复合储能多由能量型储能(以电池类为主)与具有快速响应特性的功率型储能(如超级电容、飞轮储能等)构成。

围绕复合储能配置, 文献[4]提出基于机会约束规划的混合储能优化配置方法, 但其仅是成本最低的单目标优化方法; 文献[5]基于神经网络的方法对复合储能平滑风电场中的功率波动进行优化, 但其应用范围限于风电场平波; 文献[6]利用复合储能平抑风光联合发电系统的输出功率在不同时段内的波动, 阐述了复合储能控制方法和参数设计, 但未考虑储能多种目标同步优化技术; 文献[7]提出基于成本分析的混合储能优化配置方案, 但止于单目标优化; 现有复合储能应用多集中在储能控制方法和就某一单目标进行容量优化, 较少考虑针对复合储能的多目标控制及求解算法。文献[8-10]提出了混沌多目标遗传算法、粒子群算法(PSO)等多目标优化算法, 但对象并非储能装置, 而是整个(微)电网。另外, 上述复合储能优化都未能提供定量评估优化效果的指标, 也缺乏单一储能与复合储能优化配置的对比, 难以对优化结果进行有效评估。

本文以超级电容和蓄电池组成复合储能应用于微电网, 建立复合储能的多目标优化的数学模型; 针对目标函数权重计算提出了一种基于目标函数适应度离差平均值排序的方法; 应用自适应权重 PSO 获取复合储能最优解; 提出了定量反映可再生能源波动系数和微电网功率平衡程度的储能优化性能指标; 并就微电网内单一储能和复合储能多目标优化效果进行了对比。

1 微电网复合储能多目标优化建模

本文中微电网配置如图 1 所示^[11], 包含风力发电、光伏电池及微型燃气轮机作为可控微源。复合

收稿日期: 2013-07-19; 修回日期: 2014-01-02。

国家自然科学基金资助项目(51107068); 中国博士后基金资助项目(2012M511023); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS13017)。

储能微电网发挥多重功效, 本文将从复合储能成本、微电网功率平衡、可再生能源波动抑制等方面建立复合储能的多目标优化数学模型。

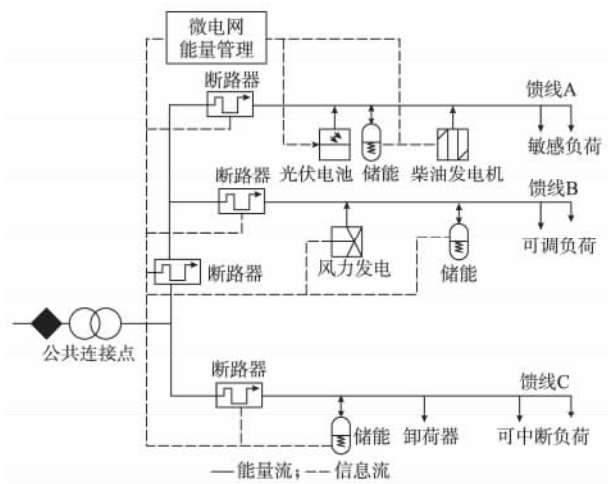


图1 典型微电网配置
Fig. 1 Typical microgrid configuration

1.1 成本目标

微电网中复合储能的配置, 应在满足微电网基本运行调度的情况下, 使其费用最小^[12]。据此可建立复合储能的成本目标函数 f_1 :

$$f_1 = c_{e1} \frac{E_{uc}}{\eta_1} + c_{e2} \frac{E_{bat}}{\eta_2} + c_m P_{max} \quad (1)$$

式中: E_{uc} 和 E_{bat} 分别为微电网中需要优化配置的超级电容和储能的容量; η_1 和 η_2 分别为超级电容和蓄电池能量变换的效率; c_{e1} 和 c_{e2} 分别为超级电容和蓄电池单位容量价格, 此成本中包含了储能变换设备和储能系统(储能本体和储能管理系统)的成本; c_m 为储能的维护成本, 在复合储能参与微电网长期调度时, 目标函数需考虑该成本; P_{max} 为复合储能的总功率。

1.2 可再生能源波动抑制目标

微电网中的调度周期一般常取一日、一个月、一个季度、一年和多年等。调度周期内总时段数的选择上, 应保证在任一时段微电网功率分布基本维持不变。在此前提下, 本文计算分析中认为微电网复合储能处于稳定状态, 不计暂态过程。

设复合储能参与平滑可再生能源波动的时间为 $[t_{11}, t_{12}]$ 。由于可再生能源发电功率变化较快, 其调整周期以 1 min 为单位。为表征复合储能对可再生能源发电功率波动的抑制效果, 本文以调节后可再生能源功率变化差值的平方和最小建立优化目标函数 f_2 , 具体如下:

$$\begin{cases} f_2 = \sum_{i=t_{11}}^{t_{12}} (P_{DG,i} - P_{DG,i-1})^2 \\ P_{DG,i} = P_{dg,i} + P_{bat,i} + P_{uc,i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: i 表示第 i 个时段; $P_{bat,i}$ 和 $P_{uc,i}$ 分别为蓄电池和超级电容的输出功率; $P_{dg,i}$ 为未经储能补偿的可再生能源实际发电功率, 是光伏发电、风力发电和辅助微电源发电量之和; $P_{DG,i}$ 为经复合储能补偿后的可再生能源输出功率值。

1.3 微电网中的功率需求匹配目标

微电网内任一时刻必须保证功率平衡, 以维持微电网电压和频率的稳定^[13]。若配置储能容量不足, 则富余电能通过卸荷器释放, 造成能源浪费; 而发电不足时则必用负荷, 降低了微电网供电可靠性。

一般复合储能全程参与微电网内平抑负荷。设调节时间为 $[t_{21}, t_{22}]$, 时间间隔为 5 min。以供求瞬时功率偏差与平均偏差的平方最小为原则, 建立微电网功率需求匹配目标函数, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} f_3 = \sum_{i=t_{21}}^{t_{22}} (P_{L,i} - P_{DG,i} - P_{avg})^2 \\ P_{avg} = \frac{\sum_{i=t_{21}}^{t_{22}} (P_{L,i} - P_{DG,i})}{t_{22} - t_{21} + 1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{L,i}$ 为负荷功率; P_{avg} 为经过储能平抑后的供求差异平均值。

微电网中还可设定其他复合储能优化目标, 如供电可靠性、辅助微电源优化运行等, 不再列出。

1.4 约束条件

微电网中复合储能的控制应考虑各储能荷电状态、储能最大功率限幅 P_{limit} 、瞬时功率平衡等方面的限制, 以确保储能容量优化的合理性。

1) 储能荷电状态 S_{OC} 的要求

为了防止过充过放对蓄电池循环寿命造成伤害, 蓄电池在使用过程中, 应在电池管理系统的指导下, 严格控制其荷电状态上下限^[14]。

$$S_{OC,min} \leq S_{OC,i} \leq S_{OC,max} \quad (4)$$

$S_{OC,min}$ 一般可取 20%~30%, $S_{OC,max}$ 取 80%~100%。超级电容相应设置此类限制, 可用其电压水平描述荷电状态。

2) 能量约束

在储能装置能够保证足够的输出功率下, 储能最大输出能量也应能达到负荷需求。超级电容和蓄电池下一时刻存储的能量关系为:

$$\begin{cases} E_{uc,i+1} = E_{uc,i} + \Delta E_{uc,i} = E_{uc,i} + P_{uc,i} T \\ S_{OC,i+1} = S_{OC,i} + \frac{\Delta E_{bat,i}}{nE_k} = S_{OC,i} + \frac{P_{bat,i} T}{nE_k} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta E_{uc,i} + \Delta E_{bat,i} = \Delta E_i \quad (6)$$

式中: k 表示蓄电池或超级电容, E_k 为相应的额定容量; n 为匹配常数; T 为控制周期; $\Delta E_{uc,i}$ 和 $\Delta E_{bat,i}$

分别为超级电容和蓄电池储能变换能量; ΔE_i 为总能量缺额。

3) 最大功率要求

为防止负荷用电时的突然大功率缺失,如大电机启动等引起电能质量骤降,复合储能装置必须能快速输出较大功率以支撑系统,即复合储能装置发出的总功率必须不小于最大瞬时功率缺失 ΔP_{\max} :

$$P_{uc,i} + P_{bat,i} \geq \Delta P_{\max} \quad (7)$$

同时,还要保证超级电容和蓄电池的储能不能超过各自最大功率以及各自变换器最大功率限制:

$$\begin{cases} P_{uc,\min} \leq P_{uc,i} \leq P_{uc,\max} \\ P_{bat,\min} \leq P_{bat,i} \leq P_{bat,\max} \end{cases} \quad (8)$$

4) 功率平衡约束

在任一时刻,都应保证微电网中的功率平衡:

$$P_{uc,i} + P_{bat,i} + P_{pv,i} + P_{w,i} + P_{tr,i} = P_{L,i} + P_{loss,i} \quad (9)$$

式中: $P_{pv,i}$ 和 $P_{w,i}$ 分别为光伏发电和风电输出功率; $P_{tr,i}$ 为微型燃气轮机输出功率; $P_{loss,i}$ 为卸荷器消耗的功率。

综上,微电网复合储能多目标优化数学模型为:

$$f = \begin{cases} \min f_1 \\ \min f_2 \\ \min f_3 \end{cases} \quad (10)$$

约束条件为式(4)至式(9)。

2 复合储能多目标优化算法

与单目标优化相比,多目标优化的复杂程度大大增加,需同时优化多个目标函数;这些目标之间往往不可比较,甚至相互冲突,一个目标的改善可能引起其他目标性能的下降。目前常用的多目标优化算法主要有古典多目标优化方法、基于进化的多目标优化方法、基于粒子群的多目标优化方法、基于协同进化的多目标优化方法^[15-16]等。

为求解上述微电网复合储能容量优化的多目标函数,本文现将式(10)多目标优化模型中的多个子目标通过线性加权和方法聚合为单一函数;并提出目标函数适应度离差排序法确定加权系数,再借助自适应权重 PSO 完成对复合储能多目标优化的容量最优化的求解。

2.1 线性加权和法聚合多目标函数

将复合储能的目标函数,按其重要程度,分别乘以一组权系数 λ_j ,然后相加,从而聚合为一个正系数的单目标函数,再对其在约束集合 X 上求最优解。本文中复合储能的多目标聚合目标函数为:

$$\begin{cases} \min f(x) = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 \\ \text{s. t. } x \in X \end{cases} \quad (11)$$

2.2 目标函数离差排序法确定权系数

目标函数中各子目标函数的权重系数 λ_j 直接反映了各目标函数的重要程度,对于较为重要的目标函数,相应的权系数较大,而不重要的目标函数,其相应的权系数较小,甚至为零。通常,每个目标函数的权系数是凭着决策者的经验决定的,但这样做主观性较强。为确定该系数,本文提出目标函数适应度离差排序法,通过数值计算的方法调整不同目标函数的期望值的加权系数,更具操作性。

离差也叫差量,是单项数值与平均值之间的差,反映了估计量与真实值之间的差距。储能某一目标函数的离差则描述了取不同容量的储能时与最优值之间的差距。它的表达式为:

$$\delta_i^j = f_i^j - f_i^i \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

式中: m 为目标的个数; $f_i^j = f_i(x_j)$,为储能取不同配置时目标函数适应度值。

离差越大,说明该储能配置离最优解差距越大。离差排序法步骤如下。

1) 设有 m 个目标,分别求出各单目标 $\min f_i(x)$, $i=1,2,\dots,m$ 的最优解,记作 x_i 。

2) 将各目标函数得到的最优解代入不同的目标函数,获取相应的目标函数值 f_i^i 。

3) 计算不同最优解 x_i 时,各目标函数的离差 δ_i^j 。由于是与单目标最优解目标值比较,故离差均非负。

4) 计算第 i 个目标的平均离差:

$$u_i = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m \delta_i^j \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

由于 $\delta_i^i = 0$,故按 $m-1$ 求取平均离差。

5) 计算权系数:

$$\lambda_i = \frac{u_i}{\sum_{j=1}^m u_j} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

由于离差均为非负,通过上述过程计算出的权系数均为正,且 $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$ 。

6) 为了均衡有效解的范围,将上述权系数依大小进行排序。按照均差大的目标函数乘以较小的权系数,均差小的目标函数乘以较大的权系数,重新构造目标函数。

2.3 自适应权重 PSO

PSO 是对鸟群、鱼群觅食过程中的迁徙和聚集的模拟,是继遗传算法、蚁群算法后又一群体智能优化算法。PSO 最大的特点在于概念简单,易于理解,且参数少,易于实现。PSO 中,粒子按式(15)更新自身位置 x_{ij} 和速度 v_{ij} :

$$\begin{cases} v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 r_1 (p_{best,ij}^t - x_{ij}^t) + \\ c_2 r_2 (g_{best,ij}^t - x_{ij}^t) \\ x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \end{cases} \quad (15)$$

式中: ij 为粒子飞行的轨迹; t 表示当前迭代次数; ω 为粒子飞行的动态惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子, 调节在自身最优位置 p_{best} 和全局最优位置 g_{best} 的牵引力度; r_1 和 r_2 为介于 0 和 1 之间的随机数。

PSO 参数中, 惯性权重 ω 是最重要的参数, 较大的惯性权重有利于跳出局部极小点, 便于提高算法的全局搜索能力, 而较小的惯性系数则有利于对当前的搜索区域进行精确局部搜索, 增强算法的局部搜索能力。在复合储能的多目标优化求解中, 为平衡 PSO 的全局搜索能力和局部改良能力, 本文提出的动态惯性权重调整方法, 如式(16)所示。

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{f - f_{\min}}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} (\omega_{\max} - \omega_{\min}) & f < f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max} & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为 ω 的最大值和最小值; f_{avg} 和 f_{\min} 分别为当前所有粒子的平均目标值和最小目标值。

相对于固定权重和线性递减权重的方法, 惯性权重 ω 会随着粒子目标函数值而自动调整。当各粒子的目标值值趋于一致或者局部最优时, 惯性权重增加以增大全局搜索能力, 而当各粒子的目标值比较分散时, 将使惯性权重减小以提高局部精度。算法具体实现过程如下。

步骤 1: 随机初始化种群中各粒子的位置和速度。

步骤 2: 评价每个粒子的适应度, 将当前各粒子的位置和适应度值存储在各粒子的 p_{best} 中, 将 p_{best} 中的最优个体的位置和适应度值存储于 g_{best} 中。

步骤 3: 使用式(15)更新粒子的速度和位置。

步骤 4: 使用式(16)更新惯性权重。

步骤 5: 对每个粒子, 将其适应度值与其经历过的最佳位置比较, 若较好, 则将其作为当前粒子最优位置, 比较当前所有 p_{best} 与 g_{best} , 更新全局 g_{best} 。

步骤 6: 若满足停止条件(达到预设的精度或迭代次数), 搜索停止, 输出结果, 否则回到步骤 3 继续执行。

3 微电网复合储能多目标优化算例

3.1 复合储能多目标优化的评价指标

本文以 24 h 为调度时长, 统计 4.5 kW 光伏发电、5 kW 风力发电、2 kW 热电联产微型燃气轮机和带有典型负荷的微电网在 24 h 调度周期内, 按储能成本最低、系统供求匹配及平抑可再生能源波动效果最好建立多目标优化函数, 微电网结构见图 1。

图 2 是该微电网 24 h 发电和负荷实际需求数据。

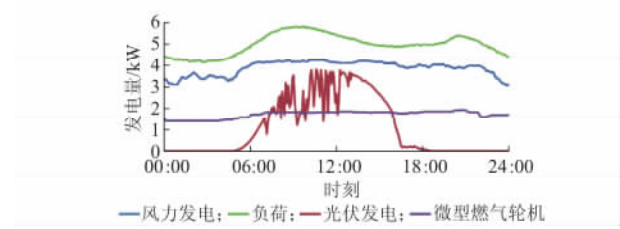


图 2 微电网 24 h 发电量与负荷需求统计
Fig. 2 Power and load demand of microgrid in 24 h

为了定量地描述微电网中复合储能的优化效果, 本文定义了可再生能源波动系数 h_1 和供求匹配系数 h_2 作为储能多目标优化的评价指标。

定义 1 可再生能源波动系数 h_1 :

$$h_1 = \frac{\sum_{i=t_1}^{t_n} |P_{DG,i} - P_{DG,i-1}|}{\sum_{i=t_1}^{t_n} P_{DG,i}} \quad (17)$$

该系数通过相邻时间段上可再生能源发电功率偏差绝对值的累积, 来表征储能对可再生能源发电功率的平滑效果; h_1 越小, 平滑效果越好。

定义 2 供求匹配系数 h_2 :

$$h_2 = \frac{\sum_{i=t_1}^{t_n} |P_{L,i} - P_{g,i}|}{\sum_{i=t_1}^{t_n} P_{L,i}} \quad (18)$$

式中: $P_{g,i}$ 为经过储能补偿后, 微电网中全部发电量, 除了可再生能源发电量 $P_{DG,i}$ 外, 还包括微型燃气轮机的辅助发电量 $P_{tr,i}$ 。

该系数描绘了负荷和供给之间的平衡关系, h_2 越小, 系统供求匹配越好, 即可再生能源浪费越小, 同时用负荷的几率也越小, 供电可靠性更高。

图 3 为未投入复合储能补偿前, 根据图 2 中数据计算的微电网中发电量与负荷需求的实时偏差 e 和可再生能源波动相邻时间段上功率变量 d , 根据定义, 可得: $h_1 = 0.161$, $h_2 = 0.1799$ 。

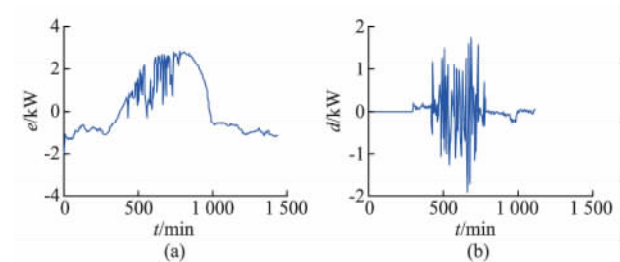


图 3 储能未补偿时微电网供求平衡与可再生能源波动
Fig. 3 Power balance and renewable energy power variations without energy storage

从图 3 可以看出,储能未投入前,可再生能源发电与负荷需求之间存在较大的功率差异,且多数情形下,可再生能源发电功率大于负荷实际需求,多余能量通过卸荷器释放,可再生能源利用率较低;而可再生能源发电的输出未经平滑,可再生能源相邻输出变化率波动较大,无法直接应用于负载。

3.2 储能多目标优化目标函数

为实现复合储能的多目标优化,以图 1 所示的微电网架构为基础,根据复合储能多目标优化的数学模型,在 MATLAB 中建立分析程序。光伏发电、风电、燃气轮机和典型负荷的数据按照 1 min 为步长离散化后存放,便于程序读取;并假设在每个仿真步长 Δt 内,储能充放电电流不变,蓄电池端电压不变,即每个仿真步长内,储能输出功率恒定。

设复合储能中超级电容最大功率限制为 5 kW,蓄电池储能最大功率限额为 2.5 kW;蓄电池和超级电容最大荷电状态 $S_{OC,max}$ 为 1,最小荷电状态 $S_{OC,min}$ 为 0.2,蓄电池和超级电容初始荷电状态均为 0.8;为简化计算,成本中只考虑储能装置的成本,超级电容单位能量成本 c_{e1} 为 20 000 元/(kW·h),蓄电池单位能量成本 c_{e2} 设定为 2 000 元/(kW·h);储能装置充放电效率设定为 100%,即不考虑损耗;由于以 24 h(1 440 min)为调度单位,调度周期较短,暂不考虑年维护成本。

复合储能优化中,首先建立各子目标函数;其次,编写自适应权重 PSO 程序,根据已知微电网模型和参数,分别计算各子目标优化的储能容量;再者,按照目标函数离差排序法确定子目标函数权重,重新聚合新的多目标优化函数(已简化为单目标);最后,再次应用自适应权重 PSO 获取最优解。下面以可再生能源功率波动最小为例说明各子目标函数的建立方法。图 4 为该子目标函数建立流程。

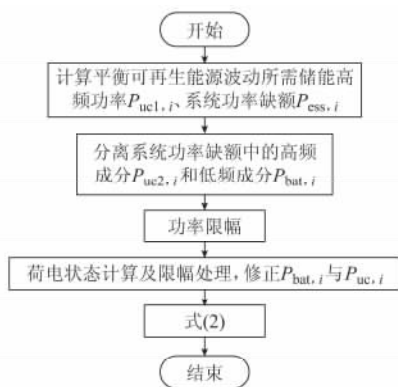


图 4 微电网可再生能源波动最小目标函数建立流程图
Fig. 4 Flow chart of minimum fluctuation objective of renewable energy in microgrid

构建该目标函数时,应注意以下方面。

1) 约束条件的处理

考虑到多数求解约束条件的算法都是从无约束条件转化而来,本算例中多目标约束的条件,分别以各种限幅的关系和等式的关系隐含在目标函数和算法的迭代过程中。具体就是在生成目标函数和最优解的每一步求解迭代过程中,判断所得优化解是否在可行域中,即是否满足约束条件。

2) 超级电容和储能的功率分配

由于超级电容和储能的不同特性,一般超级电容用以处理高频功率型分量,蓄电池处理低频分量。在构造可再生能源波动最小目标函数中,超级电容补偿功率分为两部分,其中 $P_{uc1,i}$ 用于补偿可再生能源发电功率中的高频成分, $P_{uc2,i}$ 还需补偿供求功率缺额的高频成分。 $P_{uc1,i}$ 由可再生能源总功率减去其中的低频功率 $P_{lw,i}$ 获得;而低频功率 $P_{lw,i}$ 的计算采用一阶低通滤波算法;而 $P_{uc2,i}$ 则是通过式(19)高通滤波获得;其余部分由蓄电池储能提供。

$$\begin{cases} P_{uc2,i} = P_{ess,i} \frac{T_h s}{1 + T_h s} \\ P_{bat,i} = P_{ess,i} - P_{uc2,i} \end{cases} \quad (19)$$

式中: T_h 为滤波器的时间常数。

3) 复合储能的充放电管理

为了保证超级电容电压和蓄电池荷电状态不越限,本文设置了储能防止过充过放控制策略:在复合储能能量交换过程中,首先,按照式(8)判断本次控制步长内储能输入、输出功率是否超过最大输出功率限制,若越限,则调节储能功率取相应限值。再者,分别计算补偿后储能的荷电状态 S_{OCk} 。

$$S_{OCk,i} = S_{OCk,i-1} + P_{k,i} \frac{T}{nE_k} \quad (20)$$

若储能补偿功率为正(放电),且补偿后 $S_{OCk,i} < S_{OCk,min}$,则储能最大放电至 $S_{OCk,min}$,即停止放电,因此实际储能补偿功率应修正为:

$$P_{k,i} = \frac{n(S_{OCk,i-1} - S_{OCk,min})E_k}{T} \quad (21)$$

反之,若储能补偿功率为负,且补偿后 $S_{OCk,i} > S_{OCk,max}$,则储能充电至荷电状态上限后,停止充电,此时储能装置实际交换功率应为:

$$P_{k,i} = \frac{n(S_{OCk,i-1} - S_{OCk,max})E_k}{T} \quad (22)$$

同理,可建立成本和功率平衡的目标函数。

3.3 基于目标函数离差排序法的目标函数权重确定

按照上述方法,分别建立各独立单目标的优化函数,借助自适应权重 PSO,在约束条件的限制下,获取各单目标函数的最优解。本文采用的自适应权

重 PSO 中,初始粒子数为 24,学习因子均为 2,最大惯性权重为 0.9,最小惯性权重为 0.4,迭代次数为 2 000 次。各子目标优化结果见表 1。

表 1 单目标储能容量优化结果
Table 1 Energy storage single object optimization results

项目	超级电容/(W·h)	蓄电池/(W·h)
f_1 最优解 x_1	100.00	343 641.22
f_2 最优解 x_2	281 442.45	349 893.93
f_3 最优解 x_3	607 920.73	895 666.17

从表 1 可见,不同补偿目标下,对储能容量的要求差异较大,对蓄电池和超级电容容量的需求也不尽相同。例如成本函数 f_1 中希望成本越低越好,因此会较大程度牺牲其他方面的要求,此时储能优化容量最小;而功率平衡目标函数 f_3 中,则希望储能容量越大越好。

将以上各组最优解分别代入不同的目标函数,每个目标函数可以求得多个目标适应度值,见表 2。

表 2 不同最优解下的目标适应度值
Table 2 Target value of different optimal solution

最优解	f_1 目标值	f_2 目标值	f_3 目标值
x_1	689 282.44	33 378 267.45	187 685 246.9
x_2	6 328 636.84	1 456 226.15	0
x_3	13 949 746.89	1 456 226.15	0

通过表 2 可以计算不同目标函数与其最优解的离差 δ_i^j ,离差结果显示于表 3,并可求得 3 个目标函数的平均离差。

表 3 目标函数离差计算
Table 3 Deviation of different target value

项目	δ_1^j	δ_2^j	δ_3^j
f_1 目标值	0	5 639 354.4	13 260 464.45
f_2 目标值	31 922 041.31	0	0
f_3 目标值	187 685 246.90	0	0

最终求得离差均值 $u_1 = 9\,449\,909.422$, $u_2 = 15\,961\,020.653$, $u_3 = 187\,685\,246.897$;进而可求得目标函数权系数, $\lambda_1 = 0.044$, $\lambda_2 = 0.075$, $\lambda_3 = 0.881$ 。对照表 2 可知,3 个目标函数中, f_2 均值最大, f_3 次之, f_1 最小,按照权重的组合原则,对权系数重新排序,实际取目标函数权系数分别为: $\lambda_1 = 0.881$, $\lambda_2 = 0.044$, $\lambda_3 = 0.075$ 。

重新聚合后的目标函数为:

$$\min f = \lambda_3 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_1 f_3 = 0.881 f_1 + 0.044 f_2 + 0.075 f_3 \quad (23)$$

再次对新聚合的目标函数实施 PSO,最终可得该微电网中储能多目标优化管理的多目标最优解:超级电容容量为 79 953 W·h,蓄电池容量为 417 159 W·h,优化的目标函数值 f 为 1 881 919。

3.4 储能优化配置结果

为了对比单一储能与复合储能分别在多目标下的优化结果,本文就单一储能多目标优化和复合储能的多目标优化进行对比。优化目标最优解求取均采用自适应权重 PSO 和离差排序法。

1) 单一储能多目标优化

现假设微电网中只采用蓄电池储能单一形式,仍然针对微电网中的需求匹配目标、成本和可再生能源优化目标进行储能优化配置。设成本、功率限制、初始储能状态等约束条件与复合储能优化相同。

应用上文方法,同样采用自适应权重 PSO,可得到单一储能的优化配置结果。若只采用蓄电池储能,优化得到的蓄电池储能总容量应设置为 673 024 W·h,初期投入约为 1 346 048 元。采用其对微电网进行补偿,其实际补偿效果如图 5 所示。

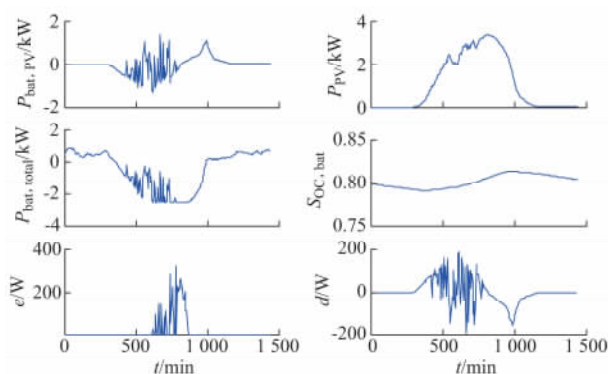


图 5 蓄电池单一储能优化配置结果
Fig. 5 Optimization results based on single energy storage

图 5 中: $P_{bat, PV}$ 为用于平滑光伏输出功率波动的储能功率; P_{PV} 为经储能平衡后的光伏输出功率; $P_{bat, total}$ 为蓄电池储能的实时输出功率; $S_{OC, bat}$ 为蓄电池储能的荷电状态。可以看到,受输出功率限幅的影响,在 750~900 min 时间段上,微电网中少量的功率缺额未得到有效补偿。而在蓄电池储能的作用下, e 均被储能装置所吸收;相对图 3,可再生能源发电的波动也得到了一定程度的抑制。

但从蓄电池输出功率 $P_{bat, total}$ 波形看,在 400~750 min 时段上,需要蓄电池短时间内输出较大的功率,相邻时间段功率跃变较大,甚至长时处于功率限幅,且频率较高,不利于蓄电池的安全稳定工作。蓄电池的荷电状态变化范围在 0.78~0.83,且储能容量配置得越大,其荷电状态的变化率越小,但其成本相应增加较多。

比对提出的储能优化指标,可再生能源波动系数 $h_1 = 0.032\,769\,8$ 、功率平衡系数 $h_2 = 0.002\,537\,6$,相对于补偿前下降较为明显,说明储能的作用得到了很好的发挥。可见,采用单一形式

的储能,如果储能装置容量足够大,且充放电速度较快,也可满足微电网需求,但受限于最大功率限幅,在部分时间点上补偿效果不尽如人意。受限于储能技术,目前单一形式储能较难同时提供足够的能量和较大的功率,采用复合储能才是解决这类问题的较好方法。

2) 复合储能多目标优化

针对复合储能多目标优化模型,应用自适应权重 PSO,经过 251 次迭代优化,可以求得优化后的超级电容容量为 79 953 W·h,蓄电池容量配置为 417 160 W·h,初期投入为 2 753 192 元。将优化结果代入微电网模型,补偿效果如图 6 所示。

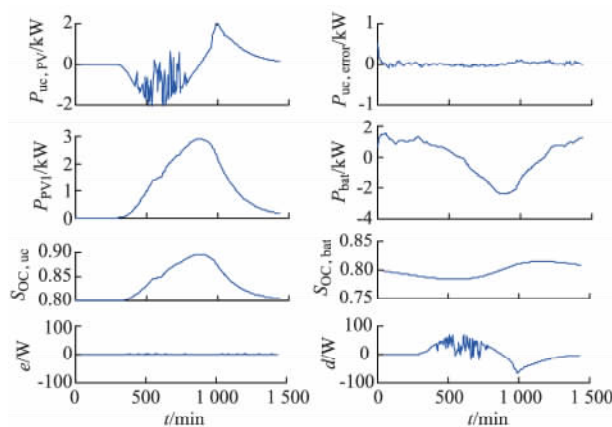


图 6 复合储能优化配置结果
Fig. 6 Optimization results based on hybrid energy storage

图 6 中:超级电容储能补偿分为两部分,其中 $P_{uc,PV}$ 用于平滑光伏可再生能源的输出功率波动, $P_{uc,error}$ 则用于平抑微电网中功率差额部分的高频波动功率; P_{bat} 为蓄电池储能的补偿功率曲线,用以弥补微电网中功率差额的低频波动,所需容量相对较大; SOC_{uc} 为超级电容的荷电状态; P_{PV1} 为经超级电容平滑后的光伏输出功率波形。可以看到,经过具有快速补偿能力的超级电容补偿,可再生能源输出波动较大的问题得到了有效抑制;且平滑效果优于单一蓄电池储能补偿,在光伏输出功率变化波形上得以体现: d 只相当于未补偿前功率变化率的 $1/25$ 。

由于超级电容和蓄电池的互补作用,在整个调节过程储能均未出现荷电状态和功率限幅,且从总体容量上看,采用复合储能容量上也要小于单一储能的优化容量,充分发挥了超级电容可处理快速功率变换,以及蓄电池储能价格相对低廉的优点。虽然初期投资约为蓄电池单一储能的两倍,但后期维护费用和综合效益更好。

从优化指标上看,采用经多目标优化后的复合

储能,可再生能源波动系数 $h_1 = 0.0191$,约为单一储能优化的一半,而功率平衡系数 $h_2 \approx 0$,均优于单一储能的优化指标。表 4 列出了补偿前、蓄电池单一储能多目标优化与复合储能多目标优化的优化评价指标。

表 4 微电网储能优化评价指标
Table 4 Assessment indices of energy storage optimization in microgrid

情况	h_1	h_2
补偿前	0.161 000 0	0.179 900 0
单一蓄电池	0.032 769 8	0.002 537 6
复合储能	0.019 100 0	0

综合各评价指标看,采用复合储能技术,微电网内可再生能源波动平滑效果更好,且实现了分布式发电与负荷的较好匹配。

4 结语

本文在分析复合储能在微电网多种应用的基础上,建立了微电网复合储能多目标优化的数学模型;提出了复合储能多目标优化的方法,提出应用目标函数离差排序法确定目标函数权重;采用自适应权重 PSO 求取储能多目标优化的最优数值解,并提出了微电网中储能优化评估指标;借助算例验证了所提方法的正确性。

参考文献

- [1] 唐西胜,齐智平. 应用于微电网的储能及其控制技术[J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 517-524.
TANG Xisheng, QI Zhiping. Energy storage technologies and control methods of microgrid: a survey [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33(3): 517-524.
- [2] 赵波,张雪松,李鹏,等. 储能系统在东福山岛独立型微电网中的优化设计 and 应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 161-167.
ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, LI Peng, et al. Optimal design and application of energy storage system in Dongfushan island stand-alone microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 161-167.
- [3] 李碧辉,申洪,汤涌,等. 风光储联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 123-128.
LI Bihui, SHEN Hong, TANG Yong, et al. Impacts of energy storage capacity configuration of HPWS to active power characteristics and its relevant indices [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 123-128.
- [4] 谢石晓,杨莉,李丽娜. 基于机会约束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 Lina. A chance constrained programming based on optimal configuration method of hybrid energy storage system [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 79-84.
- [5] 张坤,毛承雄,谢俊文,等. 风电场复合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 79-87.
ZHANG Kun, MAO Chengxiong, XIE Junwen, et al. Optimal

- design of hybrid energy storage system capacity for wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 79-87.
- [6] 刘霞, 江全元. 风光储混合系统的协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 95-100.
LIU Xia, JIANG Quanyuan. An optimal coordination control of hybrid wind/photovoltaic/energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 95-100.
- [7] 李成, 杨秀, 张美霞, 等. 基于成本分析的超级电容器和蓄电池混合储能优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 20-24.
LI Cheng, YANG Xiu, ZHANG Meixia, et al. Optimal configuration scheme for hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries based on cost analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 20-24.
- [8] 刘梦璇, 王成山, 郭力, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 34-39.
LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 34-39.
- [9] 王瑞琪, 李珂, 张承慧. 基于混沌多目标遗传算法的微网系统容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 16-22.
WANG Ruiqi, LI Ke, ZHANG Chenghui. Optimization allocation of microgrid capacity based on chaotic multi-objective genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 16-22.
- [10] 张勇军, 徐涛, 许亮, 等. 计及输电灵活性期望代价的多目标电网协调最优规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 31-35.
ZHANG Yongjun, XU Tao, XU Liang, et al. Multi-objective optimal coordinated transmission expansion planning considering flexibility expected expense [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 31-35.
- [11] HATZIGARYIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [12] 冯江霞, 梁军, 张峰, 等. 考虑调度计划和运行经济性的风电场储能容量优化计算[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 90-95.
FENG Jiangxia, LIANG Jun, ZHANG Feng, et al. An optimization calculation method of wind farm energy storage capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 90-95.
- [13] 刘昌金, 胡长生, 李霄, 等. 基于超导储能系统的风电场功率控制系统设计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 83-88.
LIU Changjin, HU Changsheng, LI Xiao, et al. Design of SMES control system for smoothing power fluctuations in wind farms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 83-88.
- [14] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.
- [15] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [16] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2012.

谭兴国(1981—), 男, 通信作者, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向: 新能源发电、微电网技术、电力电子在电力系统中的应用。E-mail: tanxingguo1981@126.com

王 辉(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 大功率电力电子技术、新能源与分布式发电技术。E-mail: sddlwh@sdu.edu.cn

张 黎(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 电力系统电磁兼容。E-mail: zhlieee@gmail.com

(编辑 万志超)

Multi-objective Optimization of Hybrid Energy Storage and Assessment Indices in Microgrid

TAN Xingguo^{1,2}, WANG Hui², ZHANG Li², ZOU Liang²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Hybrid energy storage technology has multiple effects on the microgrid, which include keeping power balanced, smoothing fluctuating power of renewable energy and improving power quality, etc. Based on a typical microgrid with photovoltaic/wind/storage and normal loads, a rational capacity allocation method for the hybrid energy storage system is put forward. A hybrid energy storage configuration multi-objective optimization mathematical model is developed at minimum cost, optimal match between power generation and load demand and best smoothing effects of renewable generation. An adaptive weight particle swarm optimization algorithm is put forward to get the optimal solution. To determine the weights of each objective function in the multi-objective optimization model, a ranking method based on average fitness deviation of each objective function is presented. To evaluate the impact of energy storage application on microgrid, assessment indices of energy storage multi-objective optimization are provided; based on which, single battery and composite energy storage multi-objective compensation effects are compared with each other. Based on the actual data of photovoltaic/wind/load in microgrid programmed by MATLAB, an illustrative example is calculated with the algorithm proposed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107068) and Post-doctoral Science Foundation of China (No. 2012M511023).

Key words: hybrid energy storage; microgrid; multi-objective optimization; deviation ranking method; assessment indices; particle swarm optimization (PSO) algorithm