

混合储能多目标容量优化配置

李世泽¹, 高素萍², 郭朝江¹

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 深圳职业技术学院机电工程学院, 深圳 518055)

摘要: 针对蓄电池和超级电容混合储能系统的容量配置, 提出了混合储能系统多目标容量优化配置模型, 该模型以经济成本、供电可靠性、能量过剩和供需平衡为目标, 以蓄电池的SOC、超级电容的端电压和最大功率为约束, 同时考虑能量控制策略的影响, 应用改进粒子群优化算法同时对蓄电池和超级电容的容量和功率进行设计, 并通过仿真验证了所提多目标容量配置算法的快速收敛性和可靠性。

关键词: 混合储能; 优化配置; 粒子群算法; 控制策略

Multi-objective Optimal Capacity Allocation of Hybrid Energy Storage

LI Shize¹, GAO Suping², GUO Chaojiang¹

(1. Graduate School, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In this paper, a multi-objective optimal capacity allocation model is proposed for the capacity allocation of hybrid energy storage system consisting of storage battery and super capacitor. In this model, the objectives include economic cost, reliability of power supply, energy surplus, and balance between supply and demand, while the constraints include the state-of-charge (SOC) of storage battery, terminal voltage of super capacitor, and maximum power; meanwhile, the impact of energy control strategy is also taken into account. The capacity and power of the storage battery and super capacitor are synchronously designed using the improved particle swarm optimization (PSO) algorithm. Moreover, the fast convergence and reliability of the proposed multi-objective capacity allocation algorithm are verified through simulations.

Keywords: hybrid energy storage; optimal allocation; particle swarm optimization algorithm; control strategy

随着能源日趋紧张及低碳能源的发展需求, 全球都在努力发展新型能源应用模式, 储能技术作为新能源应用的关键环节^[1], 其储能元件的选择与运行的控制策略等都需要研究解决。近来, 分布式发电中常用的储能设备是锂离子电池或铅酸电池^[2-3], 但有关研究发现, 将蓄电池与超级电容混合配置作为储能设备可以有效减少蓄电池充放电次数, 延长

电池的使用寿命^[4]。

储能的容量配置是分布式发电系统或微网系统规划设计阶段的一项重要内容, 如何根据负荷需求及发电量来最大程度地保持系统的供需平衡, 决定了系统的经济性和可靠性^[5]。文献[6]分析了含多种分布式电源的微网的混合储能优化配置方案, 但该配置仅以总成本为目标函数; 文献[7]应用加强帕累托算法求解风光柴储系统多目标优化配置问题, 但是其配置对象为光伏板、风机组、柴油发电机和蓄电池, 储能装置未涉及超级电容, 且未考虑能量过剩指标; 文献[8]使用改进两阶段模型求解算法来寻找多个场景的最优解, 并表明控制策略对设计规

收稿日期: 2016-10-20; 修回日期: 2018-03-05

基金项目: 深圳市科创委知识创新计划资助项目 (JCYJ20140718172055170)

Project Supported by Knowledge Innovation Program of Shenzhen Commission on Innovation and Technology (JCYJ20140718172055170)

划阶段的混合容量配置有一定影响,通过在设计阶段就考虑全生命周期内控制策略的准稳态仿真来减小储能成本,但没有考虑系统的电能质量问题。在容量优化配置模型上,国内学者大多应用预测到的全年光照、风速等数据,利用 HOMER 软件,仿真设计不同类型能源组合时的系统性能指标^[9-10],该方案可以结合控制策略模拟微网整个周期的运行情况,但是由于 HOMER 软件的局限性,只能在限定条件下得出经济成本最优的配置结果。文献[11]研究了高校、工业区、居民区、商业区和农业区 5 类典型微电网的新型负荷特性,分别从用户收益角度和供电可靠角度设计容量配置模型,但此两个角度均为单一目标函数,且没有考虑负荷缺电指标。

综上所述,大部分学者对储能装置容量配置集中在单一装置上,对混合储能装置容量配置目标认识不全面,这样会限制储能系统其他特性。混合储能系统涉及能量型和功率型储能设备,进行容量配置前需要结合控制策略来解决对不平衡功率分配的帕累托最优问题。为了使优化配置结果更接近实际需求,提出一种考虑全生命周期成本、供电可靠性指标和缺电率指标、供需平衡的多目标储能容量优化配置模型,并在全生命周期内仿真检验各项指标。

1 分布式混合储能系统

1.1 分布式发电系统

分布式发电系统采用主动式混合储能结构,系统中的超级电容和铅酸蓄电池都通过各自的变流器接入直流总线,如图 1 所示。主动式混合储能相比于被动式结构,可以灵活控制超级电容和铅酸电池的充放电功率。光伏系统和风电系统,通过各自最大功率变换器接入直流总线。

在主动式混合储能的独立分布式发电系统中,由于脱离大电网支撑,因此新能源发出的能量需要在系统内部消纳,即供需动态平衡,表示为

$$\begin{cases} P_{RE} - P_{HESS} = P_{LOAD} \\ P_{RE} = P_{pv} + P_{wg} \\ P_{HESS} = P'_b + P'_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{RE} 为光伏和风电系统发电功率; P_{HESS} 为超级

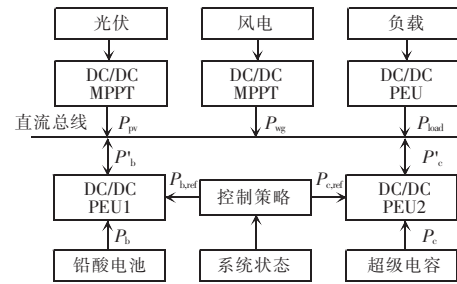


图 1 孤立分布式发电系统

Fig.1 Isolated distributed generation system

电容和蓄电池总功率; P_{LOAD} 为负载功率;考虑储能变换器的效率, P'_b 为超级电容通过电力电子变换器后的功率; P'_c 为蓄电池通过变换器后的功率;忽略发电最大功率变换器功率损耗, P_{pv} 为光伏发电功率; P_{wg} 为风电发电功率。

1.2 混合储能控制策略

基于滤波器的控制策略使用一个滤波器将剧烈波动的混合储能动态需求功率分解为高频部分和低频部分^[12],分别表示为 P_{low} 和 P_{high} 。这个方法简单而且计算量小,很适合用于实时控制。

已知负荷功率曲线、光伏发电曲线和风力发电曲线,针对蓄电池和超级电容混合储能系统的容量优化配置问题,将 3 个典型曲线都分为 N 份,组成负荷瞬时功率、光伏瞬时功率和风力发电功率 3 个数组: $\{P_L(1), P_L(2), \dots, P_L(N)\}$ 、 $\{P_{pv}(1), P_{pv}(2), \dots, P_{pv}(N)\}$ 、 $\{P_{wg}(1), P_{wg}(2), \dots, P_{wg}(N)\}$ 。

假设控制策略使用低通滤波器,将需求功率的高频部分分配给超级电容,将低频部分分配给蓄电池,则有

$$\begin{cases} P_{bat}(i) = \frac{1}{1+T_r s} [P_L(i) - P_{wg}(i) - P_{pv}(i)] \\ P_{uc}(i) = \frac{T_r s}{1+T_r s} [P_L(i) - P_{wg}(i) - P_{pv}(i)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{bat}(i)$ 和 $P_{uc}(i)$ 分别为蓄电池和超级电容第 i 时刻给定瞬时输出功率; T_r 为低通滤波器时间常数; $P_L(i)$ 为负荷第 i 时刻瞬时消耗功率; $P_{pv}(i)$ 为第 i 时刻光伏瞬时发电功率; $P_{wg}(i)$ 为第 i 时刻其他新能源瞬时发电功率。

1.3 混合储能容量配置

由文献[13]可知混合储能配置的超级电容和蓄

电池的容量和功率,在微电网的整个运行周期中,储能均未出现单一储能系统中遇到的 SOC 和功率限幅问题。与此同时,混合储能配置的最优容量要小于单一储能的优化容量,充分发挥了超级电容的快速处理功率的能力。相比较于蓄电池储能系统的容量配置问题,混合储能系统的容量配置需要同时考虑两种设备的配置功率和配置容量。蓄电池和超级电容瞬时功率分配情况由控制策略及式(2)中低通滤波时间常数 T_r 决定,而针对每个 T_r ,都可以找到蓄电池和超级电容的 1 对最优解,变成一个帕累托最优问题,最后通过枚举法找到总目标函数最优值。

2 容量优化配置模型

2.1 配置模型

在微网或分布式发电规划设计阶段,使用单目标容量优化模型往往会为了降低成本而牺牲系统的可靠性等其他性能指标,而使用多目标容量优化模型,能够得到更合理的配置容量^[6],因此本文使用多目标容量优化配置模型。在多目标规划问题中,通过将多个子目标的适应度线性加权组成单一适应度函数,考虑一些约束条件组成多目标优化模型,即

$$\begin{cases} \min f(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) + \lambda_3 f_3(x) \\ \mathbf{x} = [W_{\text{bat}}, W_{\text{uc}}, P_{\text{bat}}, P_{\text{uc}}]^T \\ \text{s.t. } \mathbf{x} \in X \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 为聚合后的最终目标函数; $f_1(x)$ 为成本子目标函数; $f_2(x)$ 为供电可靠性及能量过剩子目标; $f_3(x)$ 为供求平衡子目标; \mathbf{x} 为配置变量,包括蓄电池能量、超级电容能量、蓄电池功率和超级电容功率; W_{bat} 为蓄电池能量; W_{uc} 为超级电容能量; P_{bat} 为蓄电池功率; P_{uc} 为超级电容功率; X 为变量 x 的约束条件,包括蓄电池荷电状态 S_{oc} 约束条件、超级电容端电压 V_{oc} 约束条件和最大功率约束条件; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为子目标函数的权重。

2.2 子目标函数

1) 成本子目标函数

混合储能成本包括初始建设成本和后期维护

费用,综合考虑蓄电池和超级电容能量和功率,有

$$f_1(x) = c_{e1} \frac{W_{\text{uc}}}{\eta_1} + c_{e2} \frac{W_{\text{bat}}}{\eta_2} + c_{m1} P_{\text{uc}} + c_{m2} P_{\text{bat}} \quad (4)$$

式中: η_1 和 η_2 分别为混合储能系统中超级电容和蓄电池的效率; c_{e1} 和 c_{e2} 分别为混合储能系统中超级电容和蓄电池单位容量价格; c_{m1} 和 c_{m2} 分别为混合储能系统中超级电容和蓄电池单位功率的维护成本。

2) 供电可靠性和能量过剩子目标函数

微电网中的电能不进行并网,因此如果发电功率大于负荷功率加储能吸收功率,会造成功率浪费;如果发电功率加储能放电功率小于负荷功率,又会造成系统不可靠。因此通过蓄电池的配置功率和实际分配的功率差的平方和来表示供电可靠性和能量过剩子目标,即

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^N ((P_{N,\text{bat}} - P_{\text{bat}}(i))^2 + (P_{N,\text{uc}} - P_{\text{uc}}(i))^2) \quad (5)$$

式中: $P_{N,\text{bat}}$ 为蓄电池配置的额定功率; $P_{N,\text{uc}}$ 为超级电容配置的额定功率。

3) 供需平衡子目标函数

混合储能系统需要保证蓄电池和超级电容提供或吸收的功率变化尽量小,来保证系统的稳定性,因此以蓄电池和超级电容提供功率方差为目标,建立供需平衡目标函数,即

$$\begin{cases} f_3(x) = \sum_{i=1}^N (P_{N,\text{bat}} - P_{\text{bat}}(i) - \Delta P_{\text{avg,bat}})^2 + \\ \sum_{i=1}^N (P_{N,\text{uc}} - P_{\text{uc}}(i) - \Delta P_{\text{avg,uc}})^2 \\ \Delta P_{\text{avg,bat}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{N,\text{bat}} - P_{\text{bat}}(i))^2}{N}} \\ \Delta P_{\text{avg,uc}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{N,\text{uc}} - P_{\text{uc}}(i))^2}{N}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta P_{\text{avg,bat}}$ 和 $\Delta P_{\text{avg,uc}}$ 分别为蓄电池和超级电容的平均功率偏差。

2.3 子目标函数权重

混合储能容量配置中含有多个子目标函数,根据实际情况权衡各个子目标函数的重要性,使用自

适应度排序法来确定各个子目标函数的权重。不同容量配置与最优配置的差叫离差,表示为

$$\delta_i = f_i - f_i^i \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式中: m 为目标函数个数; f_i^i 为解集取不同值时的目标函数值, $f_i^i = f_i(x_j)$ 。

自适应度排序法来确定各个子目标函数的权重步骤如下。

步骤1 假设有 m 个子目标函数,按照单一目标最优情况各自求解 m 个子目标函数 $f_i(x)$ 的最优值 x_i 。

步骤2 将单一目标求得的最优解集代入所有的子目标中,得到最优解集对应的最优配置 $f_i^i(x)$ 。

步骤3 针对不同目标函数的最优解 x_j ,求解此值对其他各目标值的差值 δ_i^j ,如式(7)所示。某一子函数最优解在其他函数中的函数值为次优解,与最优解的差值均非负。

步骤4 计算各子目标函数的离差度,则

$$u_i = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m \delta_i^j \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

因为 $\delta_i^i = 0$,所以按 $m-1$ 求解平均值。

步骤5 计算子目标函数权重,则

$$\lambda_i = 1 - \frac{u_i}{\sum_{j=1}^m u_j} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

步骤6 由于离差均为非负,通过上述过程计算出的权重均为正值,再将权重归一化,即

$$\lambda_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中: n 为子目标函数个数; λ_i 为个子目标函数的权重系数, $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ 。

2.3.1 约束条件

1) 蓄电池荷电状态 S_{OC} 约束条件

为了防止损坏蓄电池和超级电容的寿命,限制蓄电池 S_{OC} 的上下限,即

$$S_{OCmin} \leq S_{OCi} \leq S_{OCmax} \quad (11)$$

式中: S_{OCmin} 为蓄电池荷电状态下限,一般取20%~30%; S_{OCmax} 为蓄电池荷电状态上限,一般取80%~

100%。

2) 超级电容端电压 V_{OC} 约束条件

为了防止降低超级电容的寿命,限制超级电容端电压 V_{OC} 上下限,即

$$V_{OCmin} \leq V_{OCi} \leq V_{OCmax} \quad (12)$$

其中, V_{OCmin} 一般取10%~20%, V_{OCmax} 一般取90%~100%。

3) 最大功率需求约束条件

系统中可能有一些重要负荷,需要保证这部分负荷不能断电。因此有一个最小功率需求,同时保证最大功率不超过各变换器最大功率限制,即

$$\begin{cases} P_{Nuc} + P_{Nbat} \geq P_{min} \\ P_{Nuc} \leq P_{uc,max} \\ P_{Nbat} \leq P_{bat,max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: P_{min} 为最小功率需求; $P_{bat,max}$ 和 $P_{uc,max}$ 分别为蓄电池和超级电容最大功率限制。

2.4 容量优化算法

运用多目标粒子群算法时,本文采用两阶段优化迭代求解策略。第1阶段计算种群各个体对3个目标函数的适应度,求对应解对其他各适应度的差值 δ_i ,通过离差排序法得到各粒子的权重值 λ_i ;第2阶段各粒子通过跟踪聚合后目标函数的2个“极值”来更新自己,第一个极值是粒子本身所找到的局部最优解pBest;另一个极值是整个种群目前找到的全局最优解gBest。重复上述两个阶段,直至满足终止条件。本文将更新代数作为多目标粒子群算法的终止判据,最后一代种群的所有非支配解构成的集合即为所研究问题的最优解集。

针对粒子群优化容易产生早熟收敛、全局寻优能力较差等特点,本文对其做如下改进^[14]:在第1阶段开始时,以较小概率为各粒子的位置和速度增加随迭代次数递减的阻尼扰动,以此来加强全局寻优能力,避免粒子群算法早熟,同时还可提高搜索精度。

使用改进多目标粒子群算法对上述目标函数进行求解。混合储能容量优化配置求解流程如图3所示。

步骤1 首先进行容量优化配置的初始化。读取风机、光伏、混合储能设备和粒子群算法参数,并

随机生成铅酸蓄电池和超级电容的 N 组容量配置解集 $\mathbf{x}_i=[W_{bat,i}, W_{uc,i}, P_{bat,i}, P_{uc,i}]^T$ 。

步骤 2 评价 N 组容量配置。分析 N 组混合储能的配置情况,在使用低通滤波器的控制策略下对典型风光数据和负荷数据进行补偿。若实时控制中,不能满足所描述的约束,则该配置无效,需重新配置再进行评价;若能满足约束条件,则计算 N 组容量配置的各目标函数值。

步骤 3 随机增加各粒子位置和速度阻尼扰动。为了克服粒子群算法易陷入局部最优的问题,按照迭代次数以一定概率增加阻尼扰动。

步骤 4 利用离差排序法计算权重,并聚合目标函数,计算适应度。

步骤 5 判断合理性并进入第 2 阶段。更新 N 组各自历史最优配置和总的最优配置。在 N 组配置都完成评价后,使用这 N 组配置,与各自历史值进行比较得到个体最优值;然后使用个体最优值和历史最优值进行比较,最终得到个体最优解和总体最优解。

步骤 6 按照粒子群算法中的位置公式和速度公式更新下一组容量配置,即

$$\begin{aligned} x_i(t) &= x_i(t-1) + v_i(t-1) & t = 1, 2, \dots, K \\ v_i(t) &= wx_i(t-1) + c_1r_1(x_{pbest} - x_i) + c_2r_2(x_{gbest} - x_i) \end{aligned} \quad (14)$$

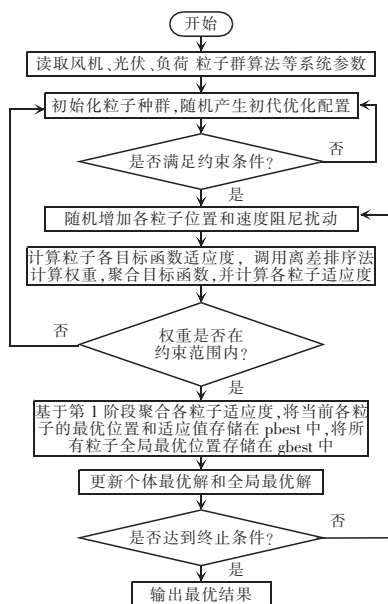


图 2 优化模型求解流程

Fig.2 Solving process of optimization model

式中: t 为迭代次数,表示容量配置经过 t 次更新; $x_i(t)$ 为第 t 次更新后蓄电池和超级电容的配置结果; $v_i(t)$ 为第 t 次的解与上一次解的差值。 x_{pbest} 为第 t 次迭代为止的目前个体最优解; $v_{x_{gbest}}$ 为第 t 次迭代为止的目前总体最优解; w 为惯性权值; c_1 和 c_2 为加速因子; r_1 和 r_2 为介于 0 和 1 之间的随机数; K 为权衡最终解的精度和计算复杂度后确定的迭代次数。

步骤 7 最后判断迭代次数是否达到 K 值。若未达到 K ,回到步骤 3 继续执行;若达到 K ,搜索停止,输出蓄电池和超级电容优化配置的最优解,即

$$\mathbf{x}_{op}=[W_{bat,op}, W_{uc,op}, P_{bat,op}, P_{uc,op}]^T \quad (15)$$

式中: \mathbf{x}_{op} 为迭代 K 次后的最优解; $W_{bat,op}$ 为最优解中蓄电池能量最优值; $W_{uc,op}$ 为最优解中超级电容的能量最优值; $P_{bat,op}$ 为最优解中蓄电池功率最优配置; $P_{uc,op}$ 为最优解中超级电容功率最优配置。

步骤 8 根据混合储能控制策略,通过枚举法列举一系列滤波时间常数 T_i ,循环操作以上步骤,最后通过总目标函数值评价帕累托边境值,从中找出最优解集。

3 算例分析

选取某示范微电网为设计案例,系统中的储能设备包括蓄电池和超级电容。使用 HOMER 仿真软件,观测步长为 1 h 的全年光伏、风电、负荷功率数据,结果如表 1 所示。独立系统的一个目标是满足供需平衡,因此需要计算供需不平衡功率。典型发电数据、负荷数据和供需不平衡功率如图 3 所示。

不平衡功率经低通滤波器滤波后,分解为高频和低频部分,分别由超级电容和蓄电池平抑。低通

表 1 分布式发电系统特征数据

Tab.1 Characteristic data of distributed generation system

类型	波动率/ %	日容量/ ((kW·h)·d ⁻¹)	峰值功率/ kW	平均功率/ kW
负荷	6.49	3 092	337	129.00
光伏	40.0	1 840	469	76.50
风力	31.9	1 320	100	55.00
功率差	629.0	65.2	431	2.72

滤波器的时间常数分别取 0.15 h、0.25 h、0.35 h 和 0.45 h,经过混合储能系统平抑后,不平衡功率波动及经低通滤波器后的超级电容和蓄电池功率波动曲线如图 4 所示。

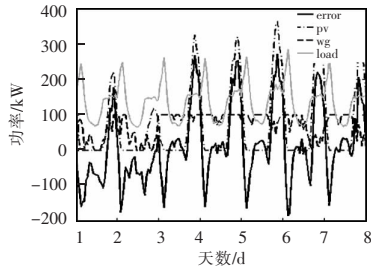


图 3 典型功率波动曲线

Fig.3 Typical power fluctuation curves

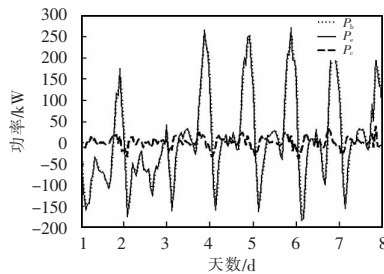


图 4 超级电容和蓄电池功率波动曲线

Fig.4 Power fluctuation curves of super capacitor and storage battery

低通滤波器将不平衡功率的高频波动部分分解出来,使铅酸电池承担的功率变得平滑,避免了铅酸蓄电池频繁充放电,延长了铅酸蓄电池寿命。而超级电容以超高充放电次数、超快充放电能力著称,因此分解出来的低峰值、高频率的波动量由超级电容平抑。

由上述混合储能多目标配置模型,首先确定优化配置中所需的最小储能容量和功率等约束条件,设备参数如表 2 所示。采用文中提出的优配置化算法迭代寻优,粒子群算法的种群数量为 40;最大惯性权重为 0.9;最小惯性权重为 0.4;学习因子为 2.0;最大迭代次数取为 70。

经过粒子群算法得到最优配置结果,如表 3 所示。同时如图 5 展示了以成本适应度值为纵坐标的最优目标收敛曲线。从图中可以看出,求解算法可以快速收敛,年均总成本收敛于 74.2 万元,对应的电池储能额定功率和额定容量分别为 60.8 kW 和

110 kW·h,超级电容的额定功率和额定容量分别为 16.6 kW 和 1 kW·h。

表 2 混合储能设备参数值

Tab.2 Parameter values of mixed energy storage equipment

储能设备	单位功率成本/(元/kW)	循环寿命/次数	充电效率	放电效率	最大 SOC 限制	最小 SOC 限制
铅酸电池	1 000	1 300	0.9	0.9	0.8	0.2
超级电容	40 000	100 000	0.9	0.9	0.9	0.1

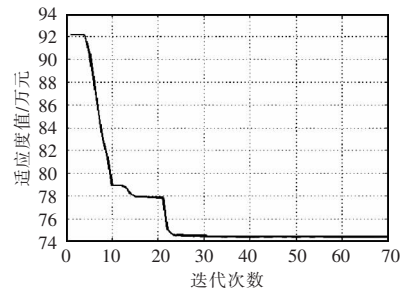


图 5 最优目标收敛曲线

Fig.5 Convergence curve of optimal objective

表 3 混合储能最优配置结果

Tab.3 Optimal allocation results of hybrid energy storage

指标	数值
年投资总费用/万元	74.2
能量过剩率/%	0.015 4
负载失电概率/%	0.600 0
铅酸电池额定功率/kW	60.8
铅酸电池额定容量/kW·h	110
超级电容额定功率/kW	16.6
超级电容额定容量/kW·h	1

4 结语

本文提出了一种用于混合储能系统平抑分布式发电功率波动的功率和容量优化配置方法。该配置方法以经济成本、供电可靠性、能量过剩和供需平衡为目标,以蓄电池 SOC、超级电容端电压和最大功率为约束,同时考虑能量控制策略的影响,基于风光分布式发电数据,给出了最佳混合储能组合为电池功率/容量为配置结果。通过仿真验证了本文求解算法具有较快的收敛性。

参考文献:

- [1] 林海雪. 现代储能技术应用概况及展望[J]. 电源学报, 2015, 13(5): 35-47.
Lin Haixue. Applying situation and prospects of modern energy storage technology[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(5): 35-47(in Chinese).
- [2] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 等. 几类面向电网的储能电池介绍[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 47-53.
Jiang Kai, Li Haomiao, Li Wei, et al. Introduction of several kinds of energy storage batteries for grid[J]. Journal of Power System Automation, 2013, 37(1): 47-53(in Chinese).
- [3] 许守平, 李相俊, 惠东. 大规模电化学储能系统发展现状及示范应用综述[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 73-79.
Xu Shouping, Li Xiangjun, Hui dong. Review on the development of large scale electrochemical energy storage system and its demonstration[J]. Journal of Electric Power Construction, 2013, 34(7): 73-79(in Chinese).
- [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): 19-25.
Xiao Jun, Zhang Zequn, Zhang Pan, et al. A hybrid energy-storage capacity optimization method for optimizing the power of micro-network tie-lines[J]. Journal of Power System Automation, 2013, 38(12): 19-25(in Chinese).
- [5] 张坤, 毛承雄, 谢俊文. 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 Chengqiong, Xie Junwen. Optimized design of capacity allocation for composite energy storage system in wind farm[J]. Transactions of Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(25): 79-87(in Chinese).
- [6] Ogunjuyigbe A S O, Ayodele T R, Akinola O A. Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building[J]. Applied Energy, 2016, 171(6): 153-171.
- [7] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 524-536.
Guo Li, Liu Wenjian, Jiao Bingqi, et al. Multi-objective optimization planning and design method for independent micro-network system[J]. Transactions of Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(4): 524-536(in Chinese).
- [8] 肖浩, 裴玮, 杨艳红, 等. 计及电池寿命和经济运行的微电网储能容量优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3256-3265.
Xiao Hao, Pei Wei, Yang Yanhong, et al. Optimization of energy storage capacity of microgrid considering battery life and economical operation[J]. Journal of High Voltage Technology, 2015, 41(10): 3256-3265(in Chinese).
- [9] Dufo-López R, Bernal-Agustina J L, Yusta-Lovo J M, et al. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage[J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 4033-4041.
- [10] Chong L W, Wong Y W, Rajkumar R K, et al. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016(66): 174-189.
- [11] 栗赛男. 考虑电网约束的微网分布式发电和储能的容量配置[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
Li Sainan. Capacity allocation of distributed generation and energy storage of microgrids considering grid constraints[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016(in Chinese).
- [12] 王伟, 谢少军, 张墨, 等. 基于组合型双向 DC-DC 变换器的超级电容储能系统控制策略分析与设计[J]. 电源学报, 2016, 14(3): 83-93.
Wu Wei, Xie Shaojun, Zhang Zhao, et al. Analysis and design of control strategy for combined-BDC based ultra-capacitors energy storage systems[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(3): 83-93(in Chinese).
- [13] 谭兴国, 王辉, 张黎, 等. 微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 7-14.
Tan Xingguo, Wang Hui, Zhang Li, et al. Micro-grid energy storage complex multi-objective optimization and configuration methods evaluation[J]. Journal of Power System Automation, 2014, 38(8): 7-14(in Chinese).
- [14] 何庆元, 韩传久. 带有扰动项的改进粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(7): 84-86.
He Qingyuan, Han Chuanjiu. Improved particle swarm optimization algorithm with disturbance[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(7): 84-86(in Chinese).

作者简介:



李世泽

李世泽(1992-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:蓄电池及充电技术,混合储能控制及系统,E-mail:lsz532652692@126.com。

高素萍(1963-),女,本科,教授,研究方向:新能源与分布式发电技术,E-mail:gaosup@szpt.edu.cn。

郭朝江(1990-),男,硕士研究生,研究方向:混合储能系统控制策略,E-mail:1062911600@qq.com。