

基于全寿命周期成本的配电网 蓄电池储能系统的优化配置

向育鹏¹, 卫志农¹, 孙国强¹, 孙永辉¹, 沈海平²

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏省 南京市 211100;

2. 江苏省电力公司 无锡供电公司, 江苏省 无锡市 214061)

Life Cycle Cost Based Optimal Configuration of Battery Energy Storage System in Distribution Network

XIANG Yupeng¹, WEI Zhinong¹, SUN Guoqiang¹, SUN Yonghui¹, SHEN Haiping²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu Province, China;

2. Wuxi Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Wuxi 214061, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The battery energy storage system (BESS) is of such merits as high efficiency, long service life and adaptability to geographical conditions, besides its rated capacity and rated power can be configured independently. Taking the optimized total net proceeds of BESS in distribution network within its life cycle as the objective, the configuration of the battery in distribution network and the optimization of charging/discharging values in different time intervals are researched while such factors as income of arbitrage, income from government's feed-in tariff, reducing power wheeling cost, deferring facility upgrades and life cycle cost (LCC) are synthetically considered. A hybrid optimization model of configuring BESS is established, and a hybrid algorithm based on differential evolution (DE) and predictor-corrector interior point method (PCIPM) is put forward to solve this model. Finally, the configurations and net proceeds of sodium sulfur (NAS) battery, vanadium redox battery (VRB), polysulfide bromine battery (PSB), value-regulated lead-acid (VRLA) battery and lithium-ion (Li-ion) battery are compared through case studies, and the indices impact economic benefit are analyzed to validate the feasibility of the established model and the proposed algorithm, and some suggestions on the configuration plan of the battery are proposed.

KEY WORDS: distribution network; battery energy storage system (BESS); life cycle cost (LCC); hybrid optimization; differential evolution (DE); predictor-corrector interior point method (PCIPM)

摘要: 蓄电池储能具有效率高、使用寿命长、对地理条件要

求低等优点,其额定功率和额定容量可以独立配置。以配电网中蓄电池储能系统全寿命周期内总的净收益最大为目标,研究配电网中蓄电池的配置和各时段充/放电值的优化,综合考虑了储能套利收入、政府电价补贴收入、减少电能转运费、延缓电网升级以及全寿命周期成本等因素。建立了蓄电池储能系统配置的混合优化模型,提出一种基于差分进化和预测-校正内点法的混合算法并进行求解。最后,算例测试比较了钠硫电池、全钒液流电池、多硫化物/溴液流电池、铅酸电池和锂离子电池的配置和净收益,分析了影响经济效益的指标,为蓄电池的配置规划提出了建议,并验证了所建模型和求解算法的可行性。

关键词: 配电网; 蓄电池储能; 全寿命周期成本; 混合优化; 差分进化法; 预测-校正内点法

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.01.040

0 引言

近年来,储能技术的发展给电能存储提供了一种行之有效的方法。根据储能设备的安装位置,储能技术的应用主要分为配电网侧^[1]、用户侧^[2]和新能源发电^[3-4]。由于当前储能设备的容量和充/放电功率有限,储能对配电网运行的支撑与调节作用更为明显。可以预见,储能在未来配电网中将有广阔的应用前景。

目前,储能技术主要分为机械储能、蓄电池储能(battery energy storage system, BESS)、电磁储能和热力储能4类^[5],其中蓄电池储能具有充/放电速度快、效率高、使用寿命长、对地理条件要求低等优点,因而受到更多的关注和研究。日本和美国在这一方面走在世界的前列,并且已有较为成熟的BESS应用工程^[6-7]。我国对储能的研究起步较晚,

基金项目 国家自然科学基金项目(51107032, 61104045, 51277052)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(NSFC)(51107032, 61104045, 51277052) .

但是发展很快,目前已开展多个示范项目的研究^[8]。

文献[9]针对风光储柴互补独立微电网,选择光伏电池阵列数、风电机组台数和储能电池容量作为优化变量,采用遗传算法获得多目标优化模型下的分布式电源与储能系统容量的优化配置。文献[10]针对利用储能减少风电预测功率与实际输出功率的误差进行分析,研究储能的功率和容量配置。文献[11]以收益最大为目标,包括了储能套利、热备用和参与系统调频等收入,最终确定储能装置的运行策略,不过储能的配置已经给定。文献[12]建立了多时间尺度下的风储混合系统的联合调度模型,提出了储能充/放电操作的2种控制模型,并采用Cplex实现该模型的优化求解。综上所述,目前对储能应用的研究,主要集中在储能系统的配置和运行策略的优化2方面,但是考虑此两者同时进行优化的研究仍然较少。

当前储能初始投资大,在短期内很难收回成本,获得可观的利润,因此从长远角度考虑BESS全寿命周期内的收入和成本具有实际意义。全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)是指在产品寿命周期内,产品投资、维修及保障等费用的总和。目前全寿命周期理论在电力系统中主要应用于电网最优规划^[13]和变电站设备维修^[14]等。文献[15]比较全面地考虑了配电网中储能系统的价值,采用粒子群算法求解以年净收益为目标的价值评估模型,文章认为每年的收益是固定的,没有考虑通货膨胀和贴现值,因此对储能整体价值的评估不够完善,同时没有考虑不同介质蓄电池的经济性差异。

本文首先建立配电网BESS的经济效益模型,该模型考虑储能套利收入、政府电价补贴收入、减少电能转运费、延缓电网升级和储能电池的全寿命周期成本。针对兼有离散变量的混合优化问题,提出一种基于差分进化法(differential evolution, DE)和预测-校正内点法(predictor-corrector interior point method, PCIPM)的混合算法,研究BESS的优化配置和各时段充/放电操作策略。算例测试验证了本文算法的有效性,并对钠硫电池(sodium sulfur battery, NAS)、全钒液流电池(vanadium redox battery, VRB)、多硫化物/溴液流电池(polysulfide bromine battery, PSB)、铅酸电池(value-regulated lead-acid battery, VRLA)和锂离子电池(lithium-ion battery, Li-ion)共5种化学蓄电池的经济性和影响指标进行了比较分析。

1 全寿命周期内 BESS 的经济效益模型

配电网BESS全寿命周期内总的净收益可以表

述为

$$f = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 - f_5 - f_6 \quad (1)$$

式中: f_1 为蓄电池全寿命周期内“低储高发”的套利; f_2 为政府电价补贴收入; f_3 为蓄电池减少的电能转运费; f_4 为延缓电网升级的收益; f_5 和 f_6 分别为蓄电池固定投资成本和运行维护成本。

在电力市场条件下,负荷低谷时期电价较低,而负荷高峰时期电价往往较高。通过控制BESS在负荷低谷时期充电、高峰时期向电网放电,实现套利。将一天分为24个时段,则BESS“低储高发”所得套利为

$$B_1 = \sum_{i=1}^{24} [P_{\text{dis}}(i)U_{\text{dis}}(i) - P_{\text{ch}}(i)U_{\text{ch}}(i)]p_e(i) \quad (2)$$

$$f_1 = \sum_{t=1}^T B_1 D \left(\frac{1+i_r}{1+d_r} \right)^t \quad (3)$$

式中: B_1 为当前储能一天的套利; i 为时段; $P_{\text{ch}}(i)$ 、 $P_{\text{dis}}(i)$ 分别为蓄电池 i 时段的充电功率和放电功率; $U_{\text{ch}}(i)$ 、 $U_{\text{dis}}(i)$ 分别为蓄电池 i 时段的充电和放电状态变量; $p_e(i)$ 为 i 时段电价; t 为蓄电池使用年份; T 为蓄电池寿命; D 为蓄电池一年中利用天数; i_r 为通货膨胀率; d_r 为贴现率。

另外,充电和放电状态变量满足约束

$$\begin{cases} U_{\text{dis}}(i) + U_{\text{ch}}(i) = 1 \\ U_{\text{dis}}(i) \cdot U_{\text{ch}}(i) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

目前由于储能装置造价较高,为了促进储能产业的发展,美、日等国均出台了一系列政策。我国在2010年可再生能源法修正案中第一次提到储能的发展,不过尚没有明确具体的产业扶持政策。除了相关法律法规的完善,政府财政补贴等经济激励措施效果显著。政府补贴一般有2种形式:一种是建设补贴,一种是电价补贴。本文采用电价补贴,则BESS获得的补贴收入为

$$B_2 = \sum_{i=1}^{24} P_{\text{dis}}(i)U_{\text{dis}}(i)p_{e,\text{FIT}} \quad (5)$$

$$f_2 = \sum_{t=1}^T B_2 D \left(\frac{1+i_r}{1+d_r} \right)^t \quad (6)$$

式中: B_2 为当前储能一天获得的补贴收入; $p_{e,\text{FIT}}$ 为政府额外补贴电价。

目前,我国已经实行了“厂网分离”,进一步推进输配分离是电力市场改革的重要取向。在输配分离的电力市场中,电力供、用方需向配电网公司支付一定的电能转运费。利用不同时间电能转运费的差异,通过储能可以实现电能传输的时空转移,减少转运成本。BESS减少转运费的获利表述如下:

$$B_3 = \sum_{i=1}^{24} [P_{\text{dis}}(i) - P_{\text{ch}}(i)] p_r(i) \quad (7)$$

$$f_3 = \sum_{t=1}^T B_3 M \left(\frac{1+i_r}{1+d_r} \right)^t \quad (8)$$

式中： B_3 为当前蓄电池使用 1 个月减少的电能转运费； $p_r(i)$ 为该月内 i 时段配电网的电能传输费用； $M=12$ 为一年包含的月数。

配电网中某一线路负荷逐年增长而超过容量时，需对配电网进行升级。配电网升级的传统方法是增建或换装变压器，或者对配电线路进行改造，此类升级的成本较高。安装在靠近负荷侧的 BESS 通过削峰填谷，实现电网调峰，能够提高电网设备的利用率，延缓电网升级，从而降低电网投资费用。设负荷的年增长率为 τ ，储能的削峰率为 λ ，则加装 BESS 后可以延缓电网升级的年数为

$$\Delta n = \frac{\log_{10}(1+\lambda)}{\log_{10}(1+\tau)} \quad (9)$$

延缓电网升级的收益为

$$B_4 = C_{\text{inv}} \left[1 - \left(\frac{1+i_r}{1+d_r} \right)^{\Delta n} \right] \quad (10)$$

$$f_4 = B_3 \quad (11)$$

式中 C_{inv} 为电网升级建设成本。

蓄电池 LCC 主要包括固定投资成本和运行维护成本。固定投资成本与其自身的额定容量和额定充/放电功率相关^[16]，对于蓄电池来说，这两者在构成储能投资成本上是相互独立的，可以表示为

$$C_1 = C_p \bar{P} + C_e \bar{E} \quad (12)$$

$$f_5 = C_1 \quad (13)$$

式中： C_1 为蓄电池固定投资成本； C_p 为蓄电池单位充/放电功率的造价； \bar{P} 为蓄电池的额定充/放电功率； C_e 为蓄电池单位容量的造价； \bar{E} 为蓄电池额定容量。

BESS 的运行维护成本主要与储能电池的额定功率相关

$$C_2 = C_m \bar{P} \quad (14)$$

$$f_6 = \sum_{t=1}^T C_2 \left(\frac{1+i_r}{1+d_r} \right)^t \quad (15)$$

式中： C_2 为当前蓄电池的年运行维护成本； C_m 为蓄电池单位充/放电功率的年运行维护成本。

2 蓄电池储能系统的模型

2.1 BESS 的选址安装

配电网中，BESS 一般安装在配电变压器的低压侧，作为负荷侧的调峰电源使用，这样可以充分发挥储能“低储高发”的优势，同时可以减少调节

负荷过程中的电能损耗。图 1 所示为 BESS 在配电网变电站中的安装位置，由图可见其位于 10 kV 中压配电网侧。

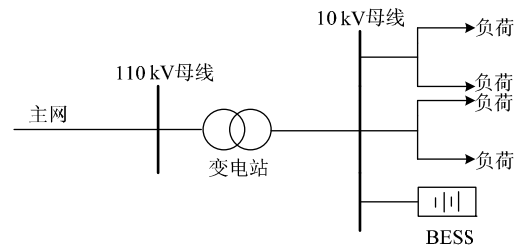


图 1 配电网中 BESS 的安装位置

Fig. 1 System configuration with BESS in a substation

基于配电网中 BESS 配置的兆瓦级需求和充/放电持续时间的小时级要求，并非各种介质的储能技术都适用于配电网。目前国内外配电网中已获得商业化运行或处于示范工程阶段的 BESS 主要有 NAS、VRB、PSB、VRLA 和 Li-ion。本文选择这 5 种电池用于配电网 BESS 的配置，从经济性角度对其进行评价和分析。

2.2 BESS 的充放电模型

为使储能电池能够循环利用，BESS 在一个充/放电周期中满足能量守恒，即等式约束

$$\sum_{i=1}^{24} [P_{\text{dis}}(i) - P_{\text{ch}}(i)] \eta = 0 \quad (16)$$

式中 η 为 BESS 的能量转换效率，对于不同介质的蓄电池， η 有所差别。

对于额定容量和额定充/放电功率已经确定的储能系统，其运行过程中不能超过最大充/放电功率的约束，以及总放电量的约束，即有

$$\bar{P} - P_{\text{dis}}(i) \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, 24 \quad (17)$$

$$\bar{P} - P_{\text{ch}}(i) \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, 24 \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^{24} P_{\text{dis}}(i) \leq \bar{E} \quad (19)$$

通过储能蓄电池的充/放电，系统等效负荷应不大于削峰后的负荷峰值：

$$P_{\text{load}}(i) - P_{\text{dis}}(i) + P_{\text{ch}}(i) \leq (1-\lambda) \bar{P}_{\text{load}} \quad (20)$$

式中： $P_{\text{load}}(i)$ 为 i 时段的负荷； \bar{P}_{load} 为 1 天 24 个时段的负荷峰值。

本文以 BESS 全寿命周期内总的净收益最大为目标函数，式(1)及式(16)—(20)构成了 BESS 配置和充/放电策略的优化方法，一般数学形式表述如下：

$$\begin{cases} \max f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.t. } h(\mathbf{x})=0 \\ g(\mathbf{x}) \leq \bar{g}(\mathbf{y}) \end{cases} \quad (21)$$

式中： $\mathbf{x} = [P_{\text{dis}}(1), P_{\text{ch}}(1), P_{\text{dis}}(2), P_{\text{ch}}(2), \dots, P_{\text{dis}}(24), P_{\text{ch}}(24)]^T$ 为 1 天各时段 BESS 的充/放电功率；

$y = [\bar{E}, \bar{P}, \lambda]^T$; $h(x)=0$ 为等式约束, 对应式(16); $g(x) \leq \bar{g}(y)$ 为不等式约束, 对应式(17)—(20); $\bar{g}(y)$ 为不等式约束的上限。

目前大规模 BESS 尚没有具体的技术标准和设计准则。对于 BESS, 功率和容量可以独立配置, 其电池本体一般由多个电池堆并联而成, 电池堆由电池串并联而成, 电池串由单元电池串联而成, 而单元电池可以通过单体电池并联组成。由于单个换流器功率有限, 因此储能系统的额定功率 \bar{P} 和额定容量 \bar{E} 是关于换流器功率和电池串容量的离散变量。

式(21)给出的优化模型属于典型的混合优化问题, 本文提出一种基于 DE 和 PCIPM 的混合算法。基本思路是: 利用 DE 算法全局寻优能力强、适用于处理离散变量的特点对 \bar{P} 、 \bar{E} 和 λ 进行自适应的搜索寻优, 然后在 DE 算法的每一次迭代中, 采用 PCIPM 优化 BESS 各时段的充/放电值, 实现离散变量和连续变量的协同优化。

3 基于 DE 和 PCIPM 的混合求解方法

3.1 差分进化算法

DE 算法由 Storn R 和 Price K^[17] 在 1995 年提出, 它是一种基于群体进化的启发式搜索算法, 目前该算法已在电力系统电网规划、负荷经济分配和无功优化等方面得到应用。同智能算法一样, DE 算法首先要在变量边界约束内随机生成初始化种群 $X^{(0)} = [x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_{N_p}^{(0)}]$, 其中 $x_i^{(0)} = [x_{i1}^{(0)}, x_{i2}^{(0)}, \dots, x_{iN}^{(0)}]^T$, N_p 为种群数量, N 为变量维数。

在当前种群中随机选择 3 个个体 $x_a^{(k)}$ 、 $x_b^{(k)}$ 、 $x_c^{(k)}$, 根据下式得到变异种群:

$$v_j^{(k+1)} = x_a^{(k)} + F(x_b^{(k)} - x_c^{(k)}), \quad a \neq b \neq c \neq j \quad (22)$$

式中: a 、 b 和 c 为当前种群中的个体; k 为进化代数; $v_j^{(k+1)}$ 为变异后所得种群的第 j 个个体; F 为缩放因子, 表征个体的变异程度, 一般取 $[0.4, 1.0]$ 。

为了增加种群个体的多样性, 对原始种群和变异种群进行交叉操作:

$$u_{j,m}^{(k+1)} = \begin{cases} v_{j,m}^{(k+1)}, & \text{rand}(0,1) \leq C_R \text{ or } m = \text{rand}(1, N) \\ x_{j,m}^{(k)}, & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $u_{j,m}^{(k+1)}$ 为交叉后所得种群的第 j 个个体的第 m 个分量; $\text{rand}(0,1)$ 为服从 $[0,1]$ 均匀分布的随机数; $\text{rand}(1, N)$ 为 $[1, 2, \dots, N]$ 间随机选取的整数; C_R 为交叉因子, 表征中间个体分量代替当前个体分量的概率, $C_R \in [0,1]$ 。

最后, 从当前种群和试验种群中根据适应度值进行优选。对于最大化问题, 如果试验个体的适应

度值大于原始个体, 则试验个体取代原始个体, 反之则保留原始个体, 形成下一代种群, 即

$$x_j^{(k+1)} = \begin{cases} u_j^{(k+1)}, & f(u_j^{(k+1)}) > f(x_j^{(k)}) \\ x_j^{(k)}, & f(u_j^{(k+1)}) \leq f(x_j^{(k)}) \end{cases} \quad (24)$$

式中 f 为适应度函数值。

3.2 预测-校正内点法

对于额定容量 \bar{E} 、额定功率 \bar{P} 和削峰率 λ 已经确定的储能系统, 式(21)可以采用 PCIPM 进行求解。PCIPM 是在原-对偶内点法(primal-dual interior point method, PDIPM)基础上提出的一种改进算法, 在每次迭代中只增加一次前代回代运算, 可以提高收敛速度和代码运行的效率。

文献[18]对 PCIPM 的原理和实现步骤进行了详细描述, 这里不再赘述。

3.3 混合算法优化步骤

本文提出的基于 DE 和 PCIPM 的混合优化算法流程如图 2 所示。

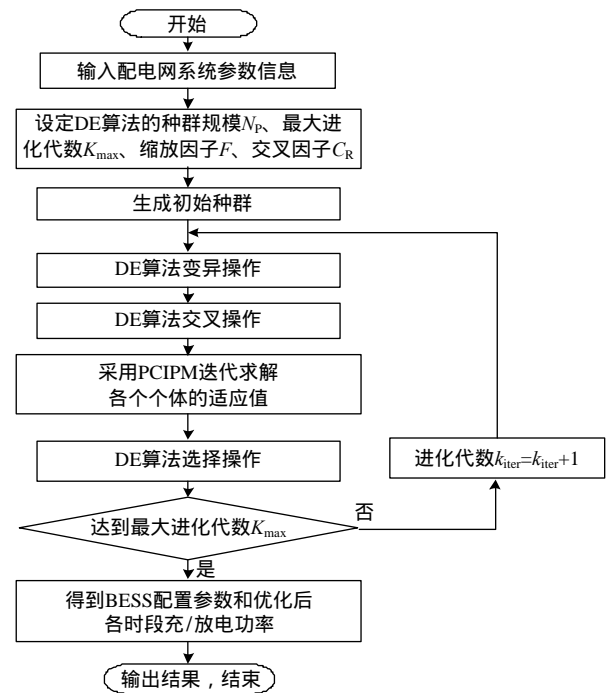


图2 混合优化算法流程

Fig. 2 Flow chart of the hybrid algorithm

4 算例分析

4.1 算例参数说明

图3为某配电网年平均负荷曲线示意图。根据负荷曲线的特征, 以23时至次日9时作为 BESS 的充电时段, 10时至22时作为 BESS 的放电时段。

电能转运费参见文献[19], 电网升级建设成本为 30 万 USD, 通货膨胀率为 1.5%, 贴现率为 9%, 负荷年增长率为 1.5%, 政府附加的电价补贴为 2.75 USD/MW·h, BESS 一年运行 250 d。根据 2.2

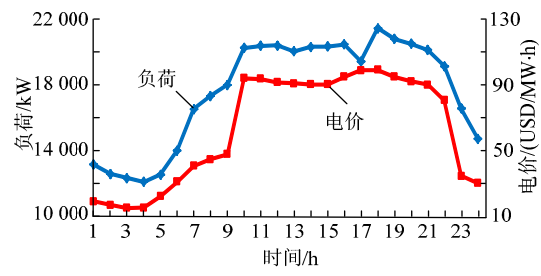


图3 年平均负荷曲线和时段电价曲线

Fig. 3 Annual average load curve and electricity price for each hour

节所述选择 NAS、VRB、PSB、VRLA 和 Li-ion 共 5 种蓄电池，运用本文提出的模型和方法，分析和比较不同介质的蓄电池的最优配置，以及在当前市场造价下的收益。某示范工程的蓄电池成本参数如表 1 所示。

表 1 蓄电池储能系统的相关参数					
Tab. 1 Parameters of NAS, VRB, PSB, VRLA and Li-ion					
参数	NAS	VRB	PSB	VRLA	Li-ion
C_p (USD/kW)	250	426	160	300	428
C_e (USD/kW·h)	192	100	70	148	210
C_m (USD/kW·a)	9	9	9	11	10
η /%	80	70	60	85	90
T/a	15	15	15	10	15

5 种蓄电池的换流器功率和电池串容量均分别取为 200 kW 和 200 kW·h。BESS 的额定充/放电功率设定为 1—10 MW，额定容量为 20—60 MW·h，削峰率为 0—10%。DE 算法的种群规模 $N_p=100$ ，最大进化代数 $K_{max}=100$ ，缩放因子 $F=0.9$ ，交叉因子 $C_R=0.8$ 。

4.2 优化配置结果

采用本文提出的混合优化算法在 Matlab 上编程求解，5 种蓄电池额定功率和额定容量配置如表 2 所示。

表 2 5 种蓄电池的额定功率和额定容量配置					
Tab. 2 Optimal results of rated power and capacity for NAS, VRB, PSB, VRLA and Li-ion					
参数	NAS	VRB	PSB	VRLA	Li-ion
\bar{P} /MW	8.4	7.6	8.8	7.6	7.4
\bar{E} /MW·h	48.8	48.6	37.6	56.4	60.0

以 NAS 为例，8.4 MW/48.8 MW·h 的 BESS 拓扑结构如图 4 所示。储能装置由 42 个电池堆并联组成，通过 0.4/10 kV 升压变接入配电网 10 kV 母线。电池堆 1—38 配置相同，每个 200 kW/1200 kW·h 电池堆由 1 个 200 kW 换流器和 6 个并联的 200 kW·h 电池串组成，如图 5(a)所示；电池堆 39—42 配置相同，每个 200 kW/800 kW·h 的电池堆由 1 个 200 kW 换流器和 4 个并联的 200 kW·h 电池串组成，如图 5(b)所示。每个 200 kW·h 电池串由 180 个 3.2 V/360 A·h 单元电池串联组成。3.2 V/360 A·h 单元电池可选用

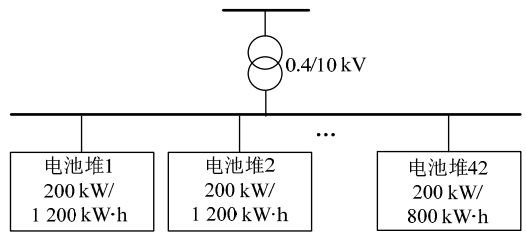


图4 NAS 储能系统拓扑结构

Fig. 4 NAS storage system topology diagram

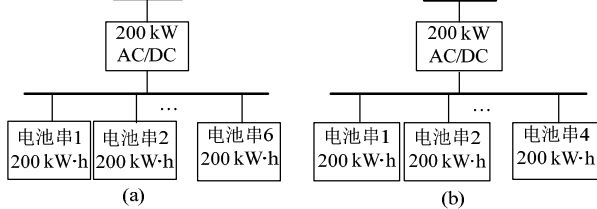


图5 NAS 电池堆拓扑结构

Fig. 5 NAS cell stack topology diagram

2 个 3.2 V/180 A·h 的单体电池并联构成。

若以负数表示 BESS 充电，正数表示放电，5 种蓄电池储能系统的充放电功率如图 6 所示。由图 6 可以看出，优化后不同介质的 BESS 在各时段充放电值各异，蓄电池在某些时段处于悬浮状态，即既不充电也不放电。

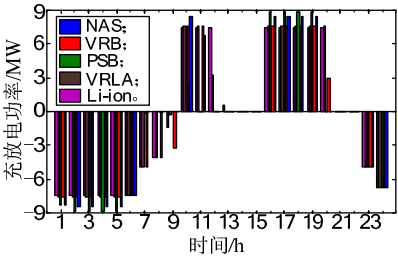


图6 5 种蓄电池充放电功率曲线

Fig. 6 Charge/discharge curves of the five kinds of BESS

4.3 经济性分析

NAS、VRB、PSB、VRLA 和 Li-ion 的投资成本与收益关系如表 3 所示。从总的净收益来看，VRLA、NAS、Li-ion、VRB、PSB 是依次增加的；从固定投资成本来看，PSB、VRB、VRLA、NAS、Li-ion 是依次增加的。由于不同 BESS 的成本和效率有差异，全寿命周期内不同介质的电池经济性也不同。目前 BESS 中 VRLA 推广较为顺利，主要优势在于技术成熟度较高，不过 VRLA 面临着循环寿命短

表 3 5 种蓄电池的投资与收益					
Tab. 3 Investment and benefits of different types of BESS					
参数	NAS	VRB	PSB	VRLA	Li-ion
总的净收益/USD	1 016 431	1 218 959	1 344 092	879 361	1 056 854
固定投资成本/USD	11 469 600	8 097 600	4 040 000	10 627 200	15 767 200
年投资回报率/%	0.59	1.00	2.22	0.83	0.45

的缺陷。Li-ion 效率高,不过其单位投资成本高昂,相比之下 NAS 的性价比更高。和其它 BESS 相比,PSB 和 VRB 的经济优势较突出,其发展方向一直是高功率、高容量,适合应用于电力系统。

不同介质的 BESS 的寿命不同,为了进一步比较各种电池的经济性,表 3 同时列出了几种电池的年投资回报率,可见 Li-ion、NAS、VRLA、VRB、PSB 是依次增加的,就目前的制造成本来说,配电网中储能配置的经济性很低。在总的净收益方面虽然 VRLA 最低,不过其年投资回报率并非最低,这是目前 VRLA 仍然广泛使用的原因之一。Li-ion 寿命特性相对 VRLA 好很多,但高昂的成本导致投资回报率很低,制约其推广应用。

在储能全寿命周期内,固定投资成本最低、总的净收益最高的 PSB 的年投资回报率也仅有 2.22%,可见当前储能投资的回报率仍然较低。这一方面是因为当前储能设备造价昂贵,储能的初始投资大;另一方面是因为 BESS 的能量转换效率不是很高,大规模 BESS 的安装利用还有待储能技术的进步。另外,本文没有考虑到储能用于备用和调频等方面的经济价值,使得计算出的总效益有所偏低,这要依靠电力市场商业模式的完善,为 BESS 投资增加收益。

图 7 显示了各种电池能量转换效率 η 对收益的影响。若 NAS、VRB、PSB、VRLA 和 Li-ion 的效率在表 1 基础上各增加 1%,则总的净收益依次为 1 264 222 USD、1 569 174 USD、1 673 092 USD、1 103 309 USD 和 1305 089 USD,分别增加了 24.38%、28.73%、24.48%、25.47%和 23.49%。可见,提高储能装置性能也是增加收益的有效途径。

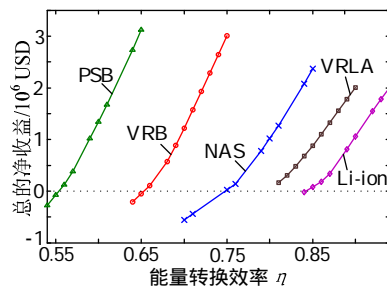


图 7 5 种蓄电池不同能量转换效率下的经济收益
Fig. 7 Variation trend of NAS, VRB, PSB, VRLA and Li-ion profits at different efficiency

进一步考虑不同渗透率的储能接入对经济性的影响。为了达到研究效果,BESS 的额定充/放电功率优化区间分别为 1—3 MW、1—5 MW 和 1—7 MW,其他参数条件不变,仿真计算的结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,不同的渗透率下各种 BESS

表 4 不同储能渗透水平下总的净收益

Tab. 4 Total profits under different storage penetration

\bar{P} 优化 区间/MW	NAS/ USD	VRB/ USD	PSB/ USD	VRLA/ USD	Li-ion/ USD
$\bar{P} \in [1,3]$	512 217	677 696	421 078	514 845	612 779
$\bar{P} \in [1,5]$	759 034	984 022	702 874	702 874	856 346
$\bar{P} \in [1,7]$	949 184	1 196 985	1 198 893	860 504	1 042 482

在全寿命周期内总的净收益大小关系并非一成不变。在储能渗透率较低时,PSB 的经济性反而最低,此时其能量转换效率低的缺陷成了主导因素;随着储能渗透率的提高,VRLA 的净收益变为最低,主要是其使用寿命较短;储能的渗透率较高时,PSB 的经济优势逐渐突出,此时储能的单位投资成本占主要因素。BESS 的经济效益与其单位投资成本、蓄电池寿命、能量转换效率以及渗透率密切相关。

5 结论

本文建立了一种配电网中蓄电池储能系统的优化配置模型,考虑了储能全寿命周期内“低储高发”套利、政府电价补贴收入、减少电能转运费、延缓电网设备升级以及全寿命周期成本等因素。针对兼有连续变量和离散变量的混合优化问题,采用一种基于 DE 和 PCIPM 的混合算法进行有效求解。通过算例分析可以看出:

1) 本文结合了 DE 算法调节参数少、搜索能力强、适用于混合变量优化和 PCIPM 鲁棒性好、计算速度快的优点,所提出的混合算法数值稳定性好,寻优能力强。

2) 储能系统的配置是一个在较长时间框架下决策的问题,本文基于技术发展相对成熟、具有商业化应用前景的考虑,选择 NAS、VRB、PSB、VRLA 和 Li-ion 共 5 种 BESS 比较分析其经济性。在现有技术和投资成本的情况下,得到如下结论:由于环境和循环寿命制约,在新型城市配电网中不推荐使用 VRLA;Li-ion 技术不断成熟,但是成本仍然较高,相比之下 NAS 可以作为 Li-ion 的替代品;与其他 BESS 比,PSB 虽然电能转换效率较低,但其单位造价的优势明显,目前在配电网应用中性价比最高,对于大规模储能系统的应用,建议优先选择 PSB 或 VRB;BESS 的造价、能量转换效率和渗透率是影响经济性的关键因素。

3) 目前储能的单位造价仍然偏高,BESS 的年投资回报率很低,能量转换效率一般只有 70%—80%,甚至更低,有待进一步提高。BESS 的大规模应用还要依赖储能技术的进步、市场商业模式的完善和政策的大力支持。

由于政策支持的缺乏和市场体系不够完善,我国目前还不具备大规模储能应用的条件,但是市场空间巨大,开展储能应用的研究有利于储能技术的发展。本文研究可以为储能的配置规划提供蓄电池类型及其额定功率和容量选择的指导和评估,具有一定的实际意义和参考价值。

参考文献

- [1] Teng J H, Luan S W, Lee D J, et al. Optimal charging/discharging scheduling of battery storage systems for distribution systems interconnected with sizeable PV generation systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 1425-1433.
- [2] Oudalov A, Cherkaoui R, Beguin A. Sizing and optimal operation of battery energy storage system for peak shaving application[C]//IEEE Proceedings of Power Tech 2007, Lausanne, Switzerland, IEEE, 2007: 621-625.
- [3] Tewari S, Mohan N. Value of NAS energy storage toward integrating wind: results from the wind to battery project[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(1): 532-541.
- [4] Tran Duoong, Khambadkone A M. Energy management for lifetime extension of energy storage system in micro-grid applications[J]. IEEE Trans On Smart Grid, 2013, 4(3): 1289-1296.
- [5] 骆妮, 李建林. 储能技术在电力系统中的应用进展[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 71-79.
Luo Ni, Li Jianlin. Research progress of energy storage technology in power system[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(2): 71-79(in Chinese).
- [6] Roberts B, McDowall J. Commercial successes in power storage[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2005, 3(2): 24-30.
- [7] 张威毅, 丁超杰, 闵勇, 等. 欧洲智能电网项目的发展与经验[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1718-1723.
Zhang Wei-yi, Ding Chao-jie, Min Yong, et al. Development and experiences of smart grid projects in Europe[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1718-1723(in Chinese).
- [8] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
Zhang Wenliang, Qiu Ming, Lai Xiaokang. Application of energy storage technology in power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9(in Chinese).
- [9] 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 microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 34-39(in Chinese).
- [10] Hartmann B, Dan A. Cooperation of a grid-connected wind farm and an energy storage unit-demonstration of a simulation tool[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 49-56.
- [11] Moghaddam I G, Saeidian A. Self scheduling program for a VRB energy storage in a competitive electricity market[C]//2010 International Conference on Power System Technology, Hangzhou, China: IEEE, 2010: 1-6.
- [12] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 10-17.
Wu Xiong, Wang Xiuli, Li Jun, et al. A joint operation model and solution for hybrid wind energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 10-17(in Chinese).
- [13] Li W, Tai-Her Y, Lee We-Jen, et al. Benefit evaluation of wind turbine generators in wind farms using capacity-factor analysis and economic-cost methods[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(2): 692-704.
- [14] Martin H, Martin M. Substation maintenance strategy adaption for life-cycle cost reduction using genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(1): 197-204.
- [15] 颜志敏, 王承民, 郑健, 等. 配电网中蓄电池储能系统的价值评估模型[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 57-61.
Yan Zhimin, Wang Chengmin, Zheng Jian, et al. Value assessment model of battery energy storage system in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 57-61(in Chinese).
- [16] 陈光堂, 邱晓燕, 林伟. 含钒电池储能的微电网负荷优化分配[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 85-91.
Chen Guangtang, Qiu Xiaoyan, Lin Wei. Optimal load distribution of microgrid with energy storage system composed of vanadium redox flow battery[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 85-91(in Chinese).
- [17] Storn R, Price K. Differential evolution-a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [18] 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(in Chinese).
- [19] Thang V V, Kong N H, Thong D Q, et al. A novel model to determine optimizing power and capacity for energy storage systems on competitive electricity markets[C]//The Ninth IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore, IEEE, 2011: 322-328.



向育鹏

收稿日期: 2014-08-29。

作者简介:

向育鹏(1989), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行, E-mail: xiangyp_2008@163.com;

卫志农(1962), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等, E-mail: wzn_nj@263.net;

孙国强(1978), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行分析与控制, E-mail: hhusunguoqiang@163.com。

(编辑 王金芝)