

考虑混合储能调频需求的独立微电网 投资优化

金 强¹, 杨卫红¹, 王 涛², 白坚实², 宋子洋³, 李珍国³

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110006;
3. 燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:独立微电网是解决偏远地区供电问题的有效途径,但独立微电网缺少大电网支撑,调频能力和频率稳定性相对较弱,需要在微电网规划时考虑调频问题。在此背景下,从系统调峰调频双重需要出发,提出兼顾混合储能调频需求的独立微电网投资优化方法。研究满足调频、调峰需求的源/储配置参数关联机理和逻辑关系,建立以系统投资总成本最小为目标,以弃风弃光率、负荷缺电率为主要约束条件的独立微电网优化配置投资模型并利用遗传算法对模型求解。以某海岛微电网为背景进行算例分析,结果表明该方法能够有效兼顾调频调峰需求,实现源/储综合优化配置。

关键词:独立微电网;优化配置;频率调节;混合储能;遗传算法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.006 中图分类号:TM761 文章编号:1673-9140(2021)01-0052-11

Research on investment optimization of standalone microgrid considering frequency modulation with hybrid energy storage

JIN Qiang¹, YANG Weihong¹, WANG Tao², BAI Jianshi², SONG Ziyang³, LI Zhengguo³

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China; 3. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Standalone microgrid is an effective way to solve the problem of power supply in remote areas. However, standalone microgrid is lack of the support of large power grid and its frequency modulation capability and frequency stability are relatively weak. It is necessary to consider the frequency modulation in microgrid planning. Under the background, in view of the dual needs of peak modulation and frequency modulation, this paper proposes an investment optimization method of standalone microgrid that takes into account frequency modulation with hybrid energy storage. Firstly, the correlative mechanism and logical relationship of source and storage configuration parameters satisfying the requirements of frequency and peak regulation are studied. Then, an optimal allocation investment model of standalone microgrid is established with the objective of minimizing the total cost of system investment un-

收稿日期:2019-03-07;修回日期:2019-04-22

基金项目:国家自然科学基金(51607153);国家电网公司科技项目(5222JJ17000Y)

通信作者:金 强(1980-),男,博士,高级工程师,主要从事微电网容量优化配置、微电网经济评价研究;E-mail: jinq1980@126.com

der the main constraints of wind abandonment rate and load power shortage rate. The model is solved by genetic algorithm. Lastly, an island microgrid is taken as the background for example analysis. The results show that the proposed method effectively considers demand of frequency modulation and peak modulation, and realize the integrated optimal allocation of source and storage.

Key words: standalone microgrid; optimal configuration; frequency modulation; hybrid energy storage; genetic algorithms

微电网是由分布式电源、储能、负荷以及监控保护装置等汇集而成的小型发电系统,它能够实现自我控制和管理,是合理利用分布式新能源发电的有效手段^[1]。微电网可以采取并网型和独立型2种运行方式,独立微电网一般用于远离主网的偏僻地区或岛屿。海岛和偏远地区供电问题是一个急需解决的民生问题,远距离送电会带来高额建设费用和电能损耗,对供电经济性不利。因此,利用当地太阳能、风能等可再生能源建设独立微电网可有效解决偏远地区电力供应难题,具有经济、环保、民生等多重意义。科学规划微电网的设备组成和容量配置,在满足技术要求的条件下追求总成本最低,是保障微电网合理投资、经济运行和可靠供电的重要手段。微电网的设备种类和运行特性与传统电网存在显著差异,其优化配置问题需要深入研究。

目前,分布式电源容量配置问题是独立微电网投资规划中需要考虑的首要问题,国内外一些学者积极开展研究,在多能互补分布式电源容量配置方面取得了一些理论和实践方面的成果。文献[2]以微电网经济性、环保性和能源利用效率综合最优为目标,以系统可靠性为约束条件,构建混合微电网分布式电源优化配置模型。文献[3]综合考虑风、光和负荷的间歇性和随机性,建立独立微电网的双层鲁棒优化容量配置模型。文献[4]以初始投资成本及年运行费用成本总和最小为优化目标,以负荷失电率及水电机组启停次数为优化评价指标,建立独立型水光储微电网容量优化配置模型。文献[5]提出协调海水淡化负荷、蓄电池及柴油发电机运行的微电网功率分配策略。文献[6]根据独立微电网短期风光出力与负荷之间的供需关系提出一种动态分时电价机制,并基于替代弹性建立价格型需求响应模型。文献[7]针对孤岛运行模式,提出一种兼顾可靠性和经济性的能量优化配置模型。文献[8]研究微

网孤岛运行下不可再生 DG 备用和低价可中断负荷优化配置,综合考虑微网经济性、环保性和可靠性,通过综合经济效益指标优化备用容量。独立微电网缺少大电网的支撑,因此频率调控一直是研究重点。文献[9]针对以风电和波浪能发电为主电源的孤岛型海岛微电网,提出一种基于电池储能和可控负荷的孤岛型海岛微电网频率协调控制策略。文献[10]针对孤岛微电网提出一种基于同步发电机模型的逆变电源,既能按照功率调度指令发电,又能参与一次调频。文献[11]针对以微型同步发电机组为二次控制主体的微电网,提出一种在孤岛运行模式下的二次频率/电压分布式控制策略。文献[12]针对分布式电源出力变化和负荷投切带来的孤岛微电网的不稳定问题,提出基于电压、频率电能质量等级的分层控制策略。文献[13]提出一种微电网孤岛运行下垂系数自调节控制策略,通过一致性算法获得微源下垂系数自调节值,实现微电网频率无静差,同时确保有功功率按额定容量分担负荷。文献[14]提出一种考虑孤岛运行的微电网一次调频备用容量配置方法。文献[15]提出一种估计频率变化率和计算功率不足的方法并利用电池储能系统来补偿孤岛微电网的功率失配。文献[16]以含风电的孤网为背景,设计一种储能电池参与一次调频的充放电策略,得出调频效果最优、经济性最优的储能电池容量配置方案。文献[17]分析风、柴、储在微电网孤岛运行时的一次调频特性与备用成本,建立调频备用成本最小为目标的储能优化配置方法。储能是一种重要的调频设备,但频繁充放电对储能寿命影响很大。文献[18]利用雨流计数法分析了充放电次数和深度对储能寿命的影响。文献[19]综合考虑蓄电池剩余容量、充放电功率及充放电次数对蓄电池寿命的影响,推导出蓄电池单次放电损耗数学模型。文献[20]利用支持向量机对蓄电池健康状态、端电压和剩余容

量的样本进行训练,建立电池容量与健康状态和端电压的非线性映射。

调频控制是独立微电网优化配置需特别考虑的一个重要因素。新能源微电网主要依靠储能设备提供频率支撑并实时平抑风、光、荷功率随机波动。文献[2-8]在独立微电网优化配置中仅从宏观功率平衡角度进行优化,没有考虑调频需要;文献[14-17]孤立地从调频角度研究储能配置,没有考虑不可控电源容量与调频容量配置的关联性。实际上风、光等不可控电源的容量配置不仅影响调峰储能容量需求,也影响调频储能容量需求,源/储配置关系具有相互关联性。该文从调峰调频双重需要出发,提出一种风、光、储、柴联合配置的独立微电网投资优化方法,利用超级电容和蓄电池组成混合储能系统实现调频和调峰,建立以系统总成本最小为目标的投资优化配置模型。算例结果验证了该文方法的有效性。

1 独立微电网源/储调频调峰配置模型

1.1 独立微电网组成和配置分析

独立微电网典型设备包括风力发电、光伏发电、储能、柴油发电机及负荷等,如图1所示。系统由风、光发电提供主要电能来源,柴油发电机作为补充能源在天气条件不理想、风光供电能力不足的情况下短时启动向微电网供电。储能系统一方面用于平抑各时段发、用电功率不平衡,起调峰作用;另一方面也实时平衡随机功率波动,起调频作用。独立微电网的发电设备多为不可控风、光电源,这类电源需要跟踪电网的电压和频率运行,不能主动向电网提供频率调节。而独立微电网作为自治运行系统,至少需要一个可控主电源来提供电压和频率支撑,这个主电源通常由储能系统承担。因而储能系统应工作在 V/f 模式,为电网提供合理的电压和频率,风、光伏发电设备按 PQ 模式跟踪储能系统的频率向电网提供有功和无功。储能在 V/f 工作模式下,电网频率呈刚性,风、光、荷不平衡功率完全由储能承担。多个储能系统并列运行则需按功率—频率下垂特性调节,以合理分担出力。

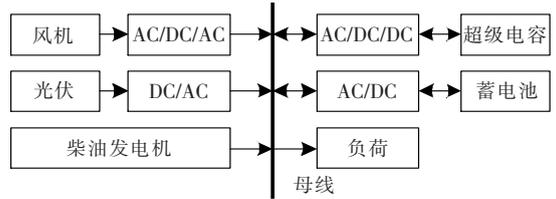


图1 独立微电网构成

Figure 1 Composition of standalone microgrid

储能系统从介质特性上可分为能量型和功率型。能量型储能能量密度高,功率密度和循环使用寿命较低;功率型储能属物理储能,功率密度和循环使用寿命高,但能量密度低。蓄电池和超级电容分别是典型的能量型和功率型储能设备。独立微电网实时功率平衡由储能承担,因而充放电功率波动频繁。为消除波动功率对蓄电池寿命的不利影响,该文采取超级电容与蓄电池混合储能策略,优化配置的核心任务是根据负荷需求优化风机、光伏、混合储能和柴油发电机的容量参数,在满足负荷用电及其他性能的条件下使全寿命周期内设备总投资最小。首先需研究建立调频、调峰尺度上源/储配置参数的关联机理和逻辑关系,如图2所示。

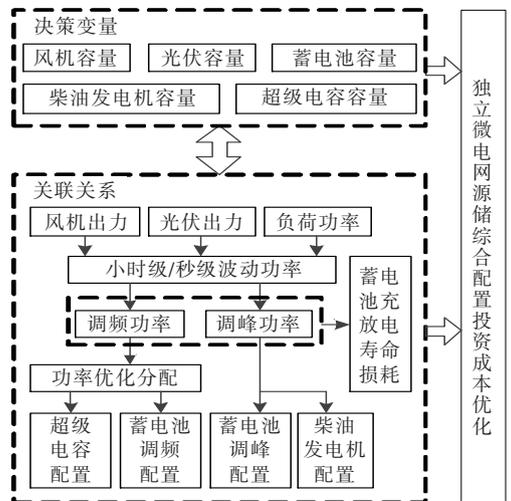


图2 独立微电网容量配置关联关系

Figure 2 Incidence relation of capacity allocation of standalone microgrid

1.2 调频配置模型

1.2.1 调频功率和调峰功率

设独立微电网中风、光、荷波动功率形成的差额功率表示为

$$P_{\text{det}}(t) = P_{\text{load}}(t) - [P_{\text{wt}}(t) + P_{\text{pv}}(t)] \quad (1)$$

式中 $P_{\text{wt}}(t)$ 为风机出力; $P_{\text{pv}}(t)$ 为光伏出力;

$P_{\text{load}}(t)$ 为负荷功率。其中风机出力 $P_{\text{wt}}(t)$ 与风速 $v(t)$ 、切入风速 $v_c(t)$ 、切出风速 $v_f(t)$ 以及额定风速 $v_r(t)$ 的关系可用分段函数表示,即

$$P_{\text{wt}}(t) = \begin{cases} 0, & v(t) < v_c(t) \text{ 或 } v(t) > v_r(t) \\ P_{\text{wt}_r} \frac{v(t) - v_c(t)}{v_r(t) - v_c(t)}, & v_c(t) \leq v(t) \leq v_r(t) \\ P_{\text{wt}_r}, & v_r(t) < v(t) \leq v_f(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_{wt_r} 为风机额定功率。光伏出力 $P_{\text{pv}}(t)$ 可由标准条件下额定功率 P_{pv_r} 、光照强度 G_{pv_stc} 、环境温度 T_{pv_stc} 表示,即

$$P_{\text{pv}}(t) = P_{\text{pv}_r} \frac{G_{\text{pv}}(t)}{G_{\text{pv}_\text{stc}}} [1 + k(T_{\text{pv}}(t) - T_{\text{pv}_\text{stc}})] \quad (3)$$

式中 $G_{\text{pv}}(t)$ 为 t 时刻光伏电池实际光照强度; $T_{\text{pv}}(t)$ 为光伏电池表面温度; k 为功率温度系数; 标准条件 G_{pv_stc} 为 1 kM/m^2 、 T_{pv_stc} 为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

式(1)表示的差额功率与风、光安装容量有关,同时又影响调频和调峰储能配置。差额功率可建立在不同时间尺度上,以适应调频和调峰配置问题的需要。对于调峰问题,兼顾分析精度和计算量,该文采用“小时”级时间尺度。结合当地气象数据和微电网负荷情况生成1年内各小时风、光、荷数据,从而得到小时级差额功率序列共8760点。对于调频问题,考虑到风、光、荷短时功率波动的成因和特性,采用“秒”级时间尺度描述。秒级功率波动主要受随机因素影响,可结合观测数据、根据风光概率分布特征并采用随机模拟手段生成典型时段差额功率序列。

显然,小时级差额功率序列表征了各时段调峰功率需求,而同一时间段内秒级差额功率序列减去小时级差额功率则表征调频功率需求。设 $P_{\text{det}_p}(t)$ 为调峰功率,用小时级时间尺度表示; $P_{\text{det}_f}(t)$ 为调频功率,用秒级时间尺度表示。将小时级相邻功率点用线段表示,则调频功率为

$$P_{\text{det}_f}(t_s) = P_{\text{det}}(t_s) - \frac{P_{\text{det}_p}(t_h + 1) - P_{\text{det}_p}(t_h)}{3600} t_s \quad (4)$$

式中 $P_{\text{det}_p}(t_h)$ 为 t_h 时刻小时级差额功率; t_s 为

t_h 时刻开始1小时内秒级时间。

1.2.2 超级电容调频容量配置

独立微电网中柴油发电机是冷备用电源,在备用状态下不能参与调频,因而调频功率完全由混合储能承担。该文采用一阶巴特沃斯高通滤波器^[21-22]对调频功率进行频带分解,超级电容承担调频功率的高频分量,蓄电池承担调频功率的低频分量。由此可推导出超级电容和蓄电池承担的调频功率分别为

$$P_{\text{sc}_f}(t_s) = \frac{[P_{\text{det}_f}(t_s) - P_{\text{det}_f}(t_s - 1) + P_{\text{sc}_f}(t_s - 1)]T_f}{1 + T_f} \quad (5)$$

$$P_{\text{bat}_f}(t_s) = P_{\text{det}_f}(t_s) - P_{\text{sc}_f}(t_s) \quad (6)$$

式中 T_f 为滤波时间常数。

可以看出,滤波时间常数不同,超级电容和蓄电池分配的调频功率也不同。因此需要对滤波时间常数进行优化以满足储能配置经济性要求。

以分析时段内最大的超级电容调频功率为配置依据,同时考虑储能系统采用频率下垂特性调频时引起负荷功率变化量,因此超级电容的调频功率需求为

$$P_{\text{sc}} = \max\{|P_{\text{sc}_f}(t_s)|\} - \Delta P_{\text{load}}, t_s \in T \quad (7)$$

式中 ΔP_{load} 为频率下垂特性引起负荷功率的变化量; T 为分析时段。

超级电容的初始荷电状态(state of charge, SOC)应保持在0.5附近以实现双向可调。由于调频功率的高频分量比较杂乱,在确定超级电容的容量时可设超级电容能够连续补偿 m 个 P_{sc} 为幅值、 T_f 为周期的同极性方波功率波动,则超级电容的容量为

$$E_{\text{sc}} = 2mT_f P_{\text{sc}} \quad (8)$$

1.2.3 蓄电池调频容量配置

蓄电池主要补偿调频功率的低频分量。蓄电池在分析时段内第 k 次充电或放电引起的能量变化为

$$E_{\text{bat}_f}(k) = \int_{t_{k_s}}^{t_{k_e}} P_{\text{bat}_f}(t_s) \eta_{c_d} dt_s \quad (9)$$

式中 η_{c_d} 为蓄电池充电或放电效率; t_{k_s} 、 t_{k_e} 分

别为第 k 次充电或放电的起止时刻。

在分析时段内,根据 $P_{\text{bat}_f}(t_s)$ 过零点统计蓄电池充放电次数及每次充放电能量。以调频时段内最大的充电或放电能量作为蓄电池调频所需容量,即

$$E_{\text{bat}}^f = \max\{|E_{\text{bat}_f}(k)|\}, k \in N_f \quad (10)$$

式中 E_{bat}^f 为蓄电池调频容量; N_f 为分析时段内充电和放电次数之和。

对于蓄电池调频功率需求的确定,以分析时段内最大的充电或放电功率为依据,同时考虑蓄电池下垂频率特性引起负荷功率变化量。因此蓄电池的调频功率需求为

$$P_{\text{bat}}^f = \max\{|P_{\text{bat}_f}(t_s)|\} - \Delta P_{\text{load}}, t_s \in T \quad (11)$$

蓄电池除承担低频段的调频功率外,还需要向超级电容提供补充能量,以维持超级电容荷电状态在 0.5 附近。为有效利用蓄电池,该文采取功率波形填补策略,利用超级电容补充功率来适当填补调频功率的波动,从而使蓄电池不需额外增加功率和容量,且调频功率更平稳。因而蓄电池总调频功率和容量只需按式(10)、(11)确定即可。

1.3 调峰配置模型

设蓄电池用于调峰的容量为 E_{bat}^p , 蓄电池最大、最小荷电状态分别为 $SOC_{\text{bat}_{\text{max}}}$ 、 $SOC_{\text{bat}_{\text{min}}}$, t_h 时刻蓄电池荷电状态为 $SOC_{\text{bat}}(t_h)$, 当蓄电池充电或放电时,下一时刻蓄电池的能量为

$$E_{\text{bat}_p}(t_h + 1) = E_{\text{bat}}^p SOC_{\text{bat}}(t_h) + P_{\text{det}_p}(t_h) \eta_{c_d} \quad (12)$$

当 $P_{\text{det}_p}(t_h) < 0$ 时,风光出力大于负荷需求,需要蓄电池充电消纳多余风光出力或弃风弃光。判断蓄电池能否充电,即 $E_{\text{bat}_p}(t_h + 1) < E_{\text{bat}}^p SOC_{\text{bat}_{\text{max}}}$, 则通过蓄电池充电消纳多余风光出力,否则降低风光出力,弃风弃光的总功率为 $P_{\text{det}_p}(t_h)$ 。

弃风弃光率可表征独立微电网可再生能源利用率,全年弃风弃光率为

$$r_{\text{waste}} = \frac{\sum_{t_h=1}^{8760} P_{\text{det}_p}(t_h)}{\sum_{t_h=1}^{8760} [P_{\text{wt}}(t_h) + P_{\text{pv}}(t_h)]} \quad (13)$$

$$r_{\text{waste}} \leq r_{\text{waste}_{\text{max}}} \quad (14)$$

式中 $r_{\text{waste}_{\text{max}}}$ 为系统最大允许弃风弃光率。

当 $P_{\text{det}_p}(t_h) > 0$ 时,风光出力不足以支持负荷,需要蓄电池放电、柴油发电机组发电以满足负荷需求或削减部分负荷。判断蓄电池能否放电,即 $E_{\text{bat}_p}(t_h + 1) \geq E_{\text{bat}}^p SOC_{\text{bat}_{\text{min}}}$, 则通过蓄电池放电满足负荷需求,否则通过柴油发电机发电满足负荷需求。此时,若 $P_{\text{det}_p}(t_h) \leq P_{\text{de}_r}$, 则柴油机实际输出功率 $P_{\text{de}}(t_h)$ 为 $P_{\text{det}_p}(t_h)$, 否则柴油机实际输出功率 $P_{\text{de}}(t_h)$ 为 P_{de_r} , 剩余负荷缺额通过削减部分负荷实现。削减负荷功率为

$$P_{\text{det}_{\text{load}}}(t_h) = P_{\text{det}_p}(t_h) - P_{\text{de}_r} \quad (15)$$

负荷缺电率(loss of power supply probability, LPSP)可表征系统供电可靠性,全年负荷缺电率为

$$r_{\text{LPSP}} = \frac{\sum_{t_h=1}^{8760} [P_{\text{det}_{\text{load}}}(t_h)]}{\sum_{t_h=1}^{8760} [P_{\text{load}}(t_h)]} \quad (16)$$

$$r_{\text{LPSP}} \leq r_{\text{LPSP}_{\text{max}}} \quad (17)$$

式中 $r_{\text{LPSP}_{\text{max}}}$ 为系统最大允许负荷缺电率。

根据 $P_{\text{det}_p}(t_h)$ 过零点统计蓄电池全年充放电次数,即从充电状态转为放电状态,计充电 1 次,从放电状态转为充电状态,计放电 1 次。充放电次数为计算蓄电池寿命损耗提供依据。

以蓄电池全年调峰的最大充电或放电功率作为蓄电池调峰时所需的最大功率,即

$$P_{\text{bat}}^p = \max\{|P_{\text{bat}_p}(t_h)|\}, t_h \in [1, 8760] \quad (18)$$

蓄电池调频调峰总容量和总功率分别为

$$E_{\text{bat}} = E_{\text{bat}}^f + E_{\text{bat}}^p \quad (19)$$

$$P_{\text{bat}} = P_{\text{bat}}^f + P_{\text{bat}}^p \quad (20)$$

1.4 蓄电池寿命损耗模型

超级电容的使用寿命和循环寿命远高于蓄电池,因此在微电网运行年限内不用重新购置超级电容。但蓄电池的使用寿命受充放电深度、充放电次数的影响较大,在微电网运行年限内需要根据蓄电池的使用使命,及时更新蓄电池。

蓄电池循环寿命一般由厂家给出不同充放电深度下的循环次数表示。某型号蓄电池在充放电深度下对应的循环寿命^[23]如表 1 所示。

表1 某型号蓄电池放电深度与循环寿命对应关系

Table 1 Relationship between the depth of discharge and cycle life for a type of battery

充放电深度	循环寿命/次	充放电深度	循环寿命/次
0.1	3 800	0.6	900
0.2	2 850	0.7	750
0.3	2 050	0.8	650
0.4	1 300	0.9	600
0.5	1 050	1.0	550

根据循环寿命与充放电深度的关系,可通过多项式函数拟合得到。该文采用文献[23]的四阶函数拟合关系,其循环寿命 N_{cir} 与充放电深度 H_{DOD} 关系为

$$N_{\text{cir}} = -3\ 278H_{\text{DOD}}^4 - 5H_{\text{DOD}}^3 + 12\ 823H_{\text{DOD}}^2 - 14\ 122H_{\text{DOD}} + 5\ 112 \quad (21)$$

充放电深度不仅与蓄电池荷电状态变化有关,还与蓄电池充放电前荷电状态有关,该文主要研究储能规划问题,仅考虑蓄电池荷电状态变化对充放电深度的影响,即

$$H_{\text{DOD}} = |SOC_{\text{bat}}(t) - SOC_{\text{bat}}(t - \Delta t)| \quad (22)$$

厂家给出的充放电深度和循环寿命是基于完整循环周期,完整循环周期包括一个放电周期和一个充电周期。蓄电池在每次充放电时,不能保证充放电深度是一样的,这里假设在充放电深度相同时,一次放电和一次充电对蓄电池的损伤是相同的,因此蓄电池的寿命 N'_{cir} 为

$$N'_{\text{cir}} = 2N_{\text{cir}} \quad (23)$$

则蓄电池的寿命损耗 $L_{\text{bat_loss}}$ 为

$$L_{\text{bat_loss}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N'_{\text{cir}}(H_{\text{DOD},i})} \quad (24)$$

式中 $N'_{\text{cir}}(H_{\text{DOD},i})$ 为第 i 次充/放电时 H_{DOD} 对应的循环寿命; n 为当前充/放电总次数。

2 独立微电网投资优化方法

2.1 目标函数

独立微电网全寿命周期投资成本包括初始投资成本、运行维护成本、燃料成本及置换成本等,这些成本发生时间不尽相同,无法直接相加,需要换算为等年值成本。因此以独立微电网等年值投资成本最

小为目标,建立目标函数为

$$\min C_{\text{total}} = \min(C_{\text{wt_total}} + C_{\text{pv_total}} + C_{\text{sc_total}} + C_{\text{bat_total}} + C_{\text{de_total}} + C_{\text{pun_total}}) \quad (25)$$

式中 $C_{\text{wt_total}}$ 、 $C_{\text{pv_total}}$ 、 $C_{\text{sc_total}}$ 、 $C_{\text{bat_total}}$ 和 $C_{\text{de_total}}$ 分别为风机、光伏、超级电容、蓄电池和柴油发电机的等年值投资成本; $C_{\text{pun_total}}$ 为年惩罚成本。

等年值成本系数为

$$r_{\text{eav}}(r_d, N_{\text{MG}}) = \frac{r_d(1+r_d)^{N_{\text{MG}}}}{(1+r_d)^{N_{\text{MG}}} - 1} \quad (26)$$

式中 r_d 为贴现率; N_{MG} 为独立微电网工程寿命期望值。

1) 风机等年值投资成本。

$$C_{\text{wt_total}} = N_{\text{wt}}[C_{\text{wt}}r_{\text{eav}}(r_d, N_{\text{MG}}) + C_{\text{wt_om}}] \quad (27)$$

式中 C_{wt} 为单台风机价格; $C_{\text{wt_om}}$ 为单台风机年运维费用; N_{wt} 为风机台数。

2) 光伏等年值投资成本。

$$C_{\text{pv_total}} = N_{\text{pv}}[C_{\text{pv}}r_{\text{eav}}(r_d, N_{\text{MG}}) + C_{\text{pv_om}}] \quad (28)$$

式中 C_{pv} 为单块光伏价格; $C_{\text{pv_om}}$ 为单块光伏年运维费用; N_{pv} 为光伏块数。

3) 超级电容等年值投资成本。

$$C_{\text{sc_total}} = (C_{\text{sc_P}}P_{\text{sc}} + C_{\text{sc_E}}E_{\text{sc}})r_{\text{eav}}(r_d, N_{\text{MG}}) + C_{\text{scP_om}}P_{\text{sc}} + C_{\text{scE_om}}E_{\text{sc}} \quad (29)$$

式中 $C_{\text{sc_P}}$ 为超级电容单位功率成本; P_{sc} 为超级电容配置功率; $C_{\text{sc_E}}$ 为超级电容单位容量成本; E_{sc} 为超级电容配置容量; $C_{\text{scP_om}}$ 为超级电容单位功率年运维费用; $C_{\text{scE_om}}$ 为超级电容单位容量年运维费用。

根据式(7)、(8)可得到超级电容调频功率和容量,代入式(29)即可算出超级电容等年值投资成本。

4) 蓄电池等年值投资成本。

$$C_{\text{bat_total}} = (C_{\text{bat_P}}P_{\text{bat}} + C_{\text{bat_E}}E_{\text{bat}})r_{\text{eav}}(r_d, N_{\text{bat}}) + (C_{\text{bat_P}}P_{\text{bat}} + C_{\text{bat_E}}E_{\text{bat}})L_{\text{bat_loss}}^Y + C_{\text{batP_om}}P_{\text{bat}} + C_{\text{batE_om}}E_{\text{bat}} \quad (30)$$

式中 $C_{\text{bat_P}}$ 为蓄电池单位功率成本; P_{bat} 为蓄电池配置功率; $C_{\text{bat_E}}$ 为蓄电池单位容量成本; E_{bat} 为蓄电池配置容量; $C_{\text{batP_om}}$ 为蓄电池单位功率年运维费用; $C_{\text{batE_om}}$ 为蓄电池单位容量年运维费用; $L_{\text{bat_loss}}^Y$ 为蓄电池年寿命损耗; N_{bat} 为蓄电池更换年限。

根据式(19)、(20)可得到蓄电池调频调峰总容量和总功率,代入式(30)即可算出蓄电池等年值投资成本。

蓄电池年寿命损耗包括蓄电池调频、调峰引起的寿命损耗。全年调频引起的寿命损耗可根据典型时段(1 h)调峰引起的寿命损耗然后折算到全年得到,即

$$L_{\text{bat_loss}}^Y = 8\,760 \sum_{i=1}^{N_f} \frac{1}{N'_{\text{cir}}(H_{\text{DOD},i})} + \sum_{j=1}^{N_p} \frac{1}{N'_{\text{cir}}(H_{\text{DOD},j})} \quad (31)$$

式中 N_f 为蓄电池在典型时段(1 h)调频时的充电和放电次数和; N_p 为蓄电池全年调峰时的充放电次数和。

蓄电池更换年限与年寿命损耗相关,即

$$N_{\text{bat}} = \frac{1}{L_{\text{bat_loss}}^Y} \quad (32)$$

5) 柴油发电机等年值投资成本。

$$C_{\text{de_total}} = N_{\text{de}} [C_{\text{de}} r_{\text{eav}}(r_d, N_{\text{MG}}) + C_{\text{de_om}}] + C_{\text{fuel}} \quad (33)$$

式中 C_{de} 为单台柴油发电机价格; $C_{\text{de_om}}$ 为单台柴油发电机年运维费用; C_{fuel} 为柴油发电机年燃料成本; N_{de} 为柴油发电机台数。

柴油发电机年燃料成本为

$$C_{\text{fuel}} = C_{\text{oil}} \sum_{t_h=1}^{8\,760} F_{\text{de}}(t_h) \quad (34)$$

式中 C_{oil} 为柴油单价; $F_{\text{de}}(t_h)$ 为 t_h 时刻柴油发电机耗油量。 $F_{\text{de}}(t_h)$ 与输出功率 $P_{\text{de}}(t_h)$ 的关系为

$$F_{\text{de}}(t_h) = F_0 P_{\text{de}_r} + F_1 P_{\text{de}}(t_h) \quad (35)$$

式中 P_{de_r} 为柴油发电机的额定功率; F_0 为柴油发电机的空载油量; F_1 为柴油发电机燃料曲线的斜率。

6) 年惩罚成本。

年惩罚成本包括每年因弃风弃光带来的发电损失和因负荷缺电引起的损失,即

$$C_{\text{pun_total}} = \alpha \sum_{t_h=1}^{8\,760} P_{\text{det}_h}(t_h) \Delta t_h + \beta \sum_{t_h=1}^{8\,760} P_{\text{det_load}}(t_h) \Delta t_h \quad (36)$$

式中 α 为弃风弃光损失系数; β 为缺电惩罚系数。

2.2 约束条件

在优化计算过程中通常需根据实际设计需求设计决策变量的上下限,以在合理范围内寻求有效优化解。独立微电网运行中需要满足以下约束条件。

1) 电源出力约束。

风机、光伏发电具有不确定性,风机晚上出力大,而光伏只在白天发电,因此可根据最大负荷需求划定合理的风机、光伏、柴油发电机数量上限,以减少最优解的搜索空间。

$$\begin{cases} 0 \leq N_{\text{wt}} \leq N_{\text{wt_max}} \\ 0 \leq N_{\text{pv}} \leq N_{\text{pv_max}} \\ 0 \leq N_{\text{de}} \leq N_{\text{de_max}} \end{cases} \quad (37)$$

2) 分布式电源装机容量约束。

依据国家能源局新能源微电网建设指导意见,可再生能源装机容量与最大负荷的比值原则上要在50%以上,柴油发电机作为冷备用,其发电量占最大负荷的20%以下,对于冬夏季负荷差异大的海岛,该指标可以放宽到40%。

$$\begin{cases} N_{\text{wt}} P_{\text{wt}_r} + N_{\text{pv}} P_{\text{pv}_r} \geq 50\% P_{\text{load_max}} \\ N_{\text{de}} P_{\text{de}_r} \leq 40\% P_{\text{load_max}} \end{cases} \quad (38)$$

式中 $P_{\text{load_max}}$ 为最大负荷功率。

3) 蓄电池充放电约束。

蓄电池荷电状态 SOC_{bat} 是储能控制器防止蓄电池过度充电和过度放电的一个重要决策变量。当 SOC_{bat} 达到蓄电池最大容量时,储能控制器控制蓄电池停止充电;当 SOC_{bat} 达到蓄电池最小充电状态时,储能控制器控制蓄电池停止放电。蓄电池充放电约束条件为

$$SOC_{\text{bat_min}} \leq SOC_{\text{bat}}(t) \leq SOC_{\text{bat_max}} \quad (39)$$

4) 弃风弃光率约束如式(14)所示。

5) 负荷缺电率约束如式(17)所示。

2.3 优化求解流程

该文待优化的决策变量有风机台数 N_{wt} 、光伏块数 N_{pv} 、蓄电池调峰容量 E_{bat_h} 、柴油发电机台数 N_{de} 和巴特沃斯滤波时间常数 T_s 。蓄电池调峰容量单位为 kW/h,一般为整数。该文调频的时间尺度为秒级, T_s 也为整数。因此待优化的5个决策变量均为整数,采用遗传算法进行优化求解。

求解过程共分为4步,第1步根据调峰策略进行风机、光伏、蓄电池和柴油发电机的容量优化配

置;第 2 步根据调频策略进行超级电容和蓄电池的容量优化配置;第 3 步计算投资成本;第 4 步选出最小投资成本对应的各决策变量。

第 1 步,首先根据当地小时级风速、光照和温度等气象数据,利用式(2)、(3)得到单台风机出力 $P_{wt_one}(t_h)$ 和单块光伏出力 $P_{pv_one}(t_h)$;其次根据设定风机台数 N_{wt} 和光伏块数 N_{pv} 得到各小时风机出力 $P_{wt}(t_h)$ 和光伏出力 $P_{pv}(t_h)$;然后根据微电网负荷情况得到负荷小时级数据 $P_{load}(t_h)$,根据式(1)得到全年小时级差额功率序列(共 8 760 个),即调峰功率 $P_{det_p}(t_h)$,根据式(13)、(16)计算弃风弃光率和负荷缺电率是否满足约束条件,若不满足,则重新设定 N_{wt} 、 N_{pv} 、 $E_{bat,h}$ 和 N_{de} ,再次进行第 1 步求解直到满足约束条件;最后根据式(12)计算蓄电池调峰功率,统计蓄电池在调峰中的充电和放电次数和。

第 2 步,首先利用风光观测数据及风光概率分布特征随机模拟生成典型时段的秒级差额功率波动;其次根据式(4)得到 $P_{det_f}(t_s)$;然后将滤波时间常数 T_s 代入式(5)对 $P_{det_f}(t_s)$ 进行分解,根据式(7)、(8)得到超级电容的功率和容量,根据式(10)、(11)得到蓄电池的调频容量和调频功率,统计蓄电池在调频中的充电和放电次数和;最后根据式(19)、(20)得到蓄电池需要优化的容量和功率。

第 3 步,根据式(26)计算微电网等年值投资成本。

第 4 步,利用遗传算法重复第 1 步到第 3 步,优选出最小投资成本对应的各决策变量。

3 算例分析

以中国东部沿海某岛屿的微电网作为研究对象。根据该岛全年预测的风速、光照和温度等气象信息和负荷需求,进行独立微电网投资优化分析。已知岛内最大负荷为 200 kW,平均负荷为 100 kW,拟安装的单台风机容量为 30 kW,单块光伏容量为 0.1 kW,单台柴油发电机 20 kW。投资相关参数如表 2 所示。该岛风机出力、光伏出力和负荷预测如图 3~5 所示。

表 2 独立微电网投资参数

Table 2 Investment parameters of standalone Microgrid

设备	指标	单位	参数
风机	额定输出功率	kW	30
	单价	万元/台	30
	年运维费用	万元/台	0.1
	切入风速	m/s	3
	额定风速	m/s	10
	切出风速	m/s	25
光伏	最大输出功率	kW	0.25
	单价	万元/块	0.25
	年运维费用	万元/块	0.003
超级电容	容量单价	万元/(kW·h)	2.5
	功率单价	万元/kW	0.15
	容量年运维费用	元/(kW·h)	0.05
	功率年运维费用	元/kW	0.05
蓄电池	容量单价	万元/(kW·h)	0.1
	功率单价	万元/kW	0.15
	容量年运维费用	元/(kW·h)	0.1
	功率年运维费用	元/kW	0.1
	SOC _{bat_max}	—	0.9
	SOC _{bat_min}	—	0.1
	η_c	—	0.9
	η_d	—	1
柴油发电机	额定输出功率	kW	20
	单价	万元/台	2
	年运维费用	万元/台	0.3
	柴油单价	元/L	6
	工程寿命	a	20
微电网	贴现率	%	5
	r_{waste_max}	—	0.05
	r_{LPSP_max}	—	0.05
	α	元/(kW·h)	3
	β	元/(kW·h)	2

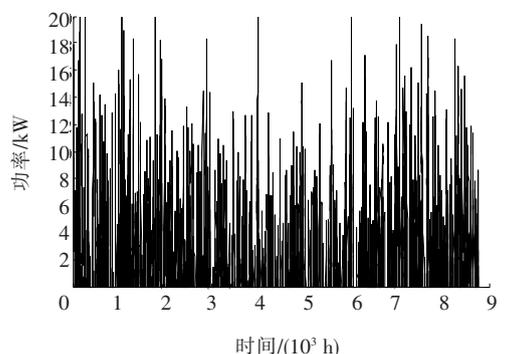


图 3 单台风机出力(8 760 h)

Figure 3 Power of single wind turbine (8 760 hours)

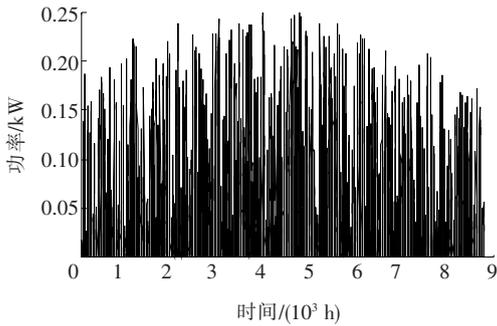


图4 单块光伏出力(8 760 h)

Figure 4 Power of single photovoltaic (8 760 hours)

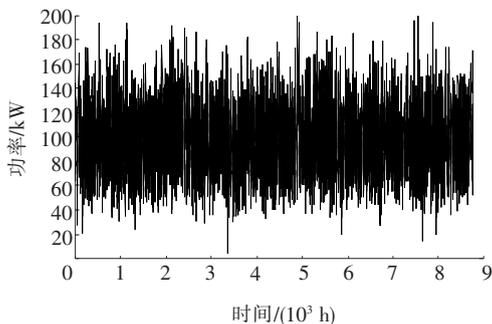


图5 海岛负荷预测(8 760 h)

Figure 5 Load prediction of island (8 760 hours)

遗传算法的参数设置:初始种群规模为 200,交叉概率为 0.5,变异概率为 0.01,迭代次数为 300 次。根据 2.3 节流程进行优化求解,得到的微电网等年值投资成本和风光储柴容量配置如表 3 所示。

表 3 独立微电网投资成本及容量配置

Table 3 Investment cost and capacity allocation of standalone microgrid

类型	单位	参数
等年值投资成本	万元	78.34
风机	台	10
光伏	块	1 000
超级电容容量	kW·h	1.36
超级电容功率	kW	82
蓄电池容量	kW·h	500
蓄电池功率	kW	100
柴油发电机	台	4

从表 3 可以看出,蓄电池容量配置较大,原因主要有 2 个,一是由于风机、光伏出力不确定性,导致在某些时段不能满足负荷需求,需要配置更多的蓄电池保证负荷供电;二是因柴油发电机容量约束限制,配置容量不大,所以也需要配置较多的蓄电池容

量。超级电容仅需平抑高频功率,因此配置功率较大,但由于有蓄电池为超级电容提供充放电缓冲,超级电容配置较小的容量即可。

4 结语

该文从独立微电网调峰调频双重需要出发,提出一种考虑混合储能调频需求的独立微电网投资优化方法,可得结论:

1)该方法采用超级电容和蓄电池组成混合储能系统,给出微电网投资优化方案,有效兼顾调频调峰需求,实现源/储综合优化配置;

2)系统分析了微电网小时级和秒级差额功率关系,建立了调频和调峰时间尺度的风光储柴容量配置关系模型;

3)该方法有利于发挥微电网功率型和能量型组成的混合储能系统的综合效用,提高混合储能资源的利用率,提升独立微电网供电质量。

参考文献:

- [1] 韩璟琳,袁建普,胡诗尧,等.考虑多元随机因素概率相关性的主动配电网规划研究[J].智慧电力,2020,48(9):23-29+101.
HAN Jinglin, YUAN Jianpu, HU Shiyao, et al. Active distribution network planning considering probability correlation of multiple random factors[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 23-29+101.
- [2] 吕智林,谭颖,李捷,等.基于 Markov-ELM 的独立混合微网分布式电源多目标容量优化配置[J].中国电机工程学报,2017,37(7):1927-1936.
LV Zhilin, TAN Ying, LI Jie, et al. Multi-objective optimal sizing for distributed generation of isolated hybrid microgrid using markov-based electromagnetism-like mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1927-1936.
- [3] 李卫国,焦盘龙,刘新宇,等.基于变分模态分解的储能辅助传统机组调频的容量优化配置[J].电力系统保护与控制,2020,48(6):43-52.
LI Weiguo, JIAO Panlong, LIU Xinyu, et al. Capacity optimization configuration of energy storage auxiliary traditional unit frequency modulation based on variation-

- al mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 43-52.
- [4] 李玲玲, 王鑫, 郎永波, 等. 基于改进鲸鱼算法的微网复合储能系统容量优化配置[J]. 电测与仪表, 2019, 56(16): 104-110.
LI Lingling, WANG Xin, LANG Yongbo, et al. Capacity configuration of micro-grid composite energy storage system based on improved whale optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(16): 104-110.
- [5] 张建华, 于雷, 刘念, 等. 含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 102-112.
ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/diesel/storage and seawater desalination load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 102-112.
- [6] 张有兵, 任帅杰, 杨晓东, 等. 考虑价格型需求响应的独立型微电网优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 55-62.
ZHANG Youbing, REN Shuaijie, YANG Xiaodong, et al. Optimal configuration of independent microgrid considering price demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 55-62.
- [7] 刘子秋, 黄民翔. 基于可靠性与经济性的计及微电源自身特性的微电网能量优化配置[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1352-1357.
LIU Ziqiu, HUANG Minxiang. Optimal energy allocation of microgrid based on reliability and economy by considering characteristics of micro source[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1352-1357.
- [8] 吕智林, 孙顺吉, 汤泽琦, 等. 基于序列运算理论微电网正负旋转备用容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 100-109.
LV Zhilin, SUN Shunji, TANG Zeqi, et al. Optimal scheduling of plus and minus spinning reserve in microgrid based on sequence operation theory[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 100-109.
- [9] 王源, 南海鹏, 关欣. 风水储微电网优化调度策略研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 216-222.
WANG Yuan, NAN Haipeng, GUAN Xin. Optimal scheduling strategy of wind-hydro-storage micro-grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 216-222.
- [10] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 孤电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.
YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Coordinated control strategy for the islanded microgrid with battery and controllable load[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168.
- [11] 吴亮, 刘庆楷, 唐翀, 等. 微电网二次频率/电压控制器的反馈线性化设计及分布式实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 79-86.
WU Liang, LIU Qingkai, TANG Chong, et al. Design of secondary frequency/voltage controller with feedback linearization and distributed implementation in microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 79-86.
- [12] 于会群, 张晓丹, 李增峰, 等. 基于电能质量等级的孤岛微电网分层控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 68-75.
YU Huiqun, ZHANG Xiaodan, LI Zengfeng, et al. Research on hierarchical control strategy of island microgrid based on power quality grades[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 68-75.
- [13] 王岳, 杨国华, 庄家懿, 等. 基于一致性算法的微电网无差调频控制策略[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 187-191.
WANG Yue, YANG Guohua, ZHUANG Jiayi, et al. Zero-error frequency regulation control method for microgrids based on consensus algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 187-191.
- [14] 雷小林, 李世春, 余梦诗. 孤岛运行的微电网一次调频备用容量配置方法[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(12): 18-24.
LEI Xiaolin, LI Shichun, YU Mengshi. A method of primary frequency reserve capacity of microgrid of isolated island[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(12): 18-24.
- [15] Sam K K, Nasrudin A R. Coordinated control of smart microgrid during and after islanding operation to prevent under frequency load shedding using energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 127(11): 623-646.
- [16] 黄际元, 李欣然, 常敏, 等. 考虑储能电池参与一次调频

- 技术经济模型的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21):112-121.
- HUANG Jiyuan, LI Xinran, CHANG Min, et al. Capacity allocation of BESS in primary frequency regulation considering its technical-economic model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21):112-121.
- [17] 赵晶晶, 徐传琳, 吕雪, 等. 微电网一次调频备用容量与储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15):4324-4332.
- ZHAO Jingjing, XU Chuanlin, LV Xue, et al. Optimization of micro-grid primary frequency regulation reserve capacity and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15):4324-4332.
- [18] 钟国彬, 白云洁, 曾杰, 等. 计及储能寿命的微电网混合储能容量优化配置[J]. 广东电力, 2018, 31(7):8-15.
- ZHONG Guobin, BAI Yunjie, ZENG Jie, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage capacity of microgrid considering energy storage life[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7):8-15.
- [19] 杨艳红, 裴玮, 邓卫, 等. 计及蓄电池储能寿命影响的微电网日前调度优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22):172-180.
- YANG Yanhong, PEI Wei, DENG Wei, et al. Day-ahead scheduling optimization for microgrid with battery life model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22):172-180.
- [20] 杨传凯, 刘伟, 李旭, 等. 铅酸蓄电池寿命预测的 LIBSVM 建模方法研究[J]. 分布式能源, 2018, 3(1):28-33.
- YANG Chuankai, LIU Wei, LI Xu, et al. LIBSVM modeling method for life prediction lead-acid battery [J]. Distributed Energy, 2018, 3(1):28-33.
- [21] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4):334-340.
- ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical, 2014, 29(4):334-340.
- [22] 苏浩, 张建成, 王宁, 等. 基于分层优化的大容量混合储能系统能量管理策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(4):1177-1186.
- SU Hao, ZHANG Jiancheng, WANG Ning, et al. Energy management strategy of large-scale hybrid energy storage system based on layered optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4):1177-1186.
- [23] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34):91-97.
- HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):91-97.