

# 分布式光伏储能系统的优化配置方法

彭伟<sup>1,2</sup>, 郑连清<sup>1</sup>, 郑天文<sup>2</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213)

**摘要:**光伏发电的随机性和间歇性导致资源利用率低, 储能具备控制灵活、响应快速的特性, 是当前解决光伏并网和提高消纳的有效手段之一。目前, 高昂投资成本是制约储能推广应用的关键, 文中从成本角度出发研究了分布式光伏系统中储能的优化配置方法。首先, 以分布式储能系统的投资和运行成本为目标, 同时考虑储能接入位置、配置容量、荷电状态和电网运行状态等为约束条件建立双层优化模型; 然后, 介绍优化模型求解方法, 外层采用遗传算法优化储能配置位置、功率和容量, 内层采用粒子群算法结合 MATPOWER 潮流计算工具优化储能日内运行策略; 最后, 在 Matlab 软件中采用 IEEE9 节点系统验证了优化配置方法的可行性和有效性。

**关键词:** 分布式光伏; 分布式储能; 优化配置; 遗传算法; 粒子群算法

**中图分类号:** TM 914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)01-0045-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220110

## Optimal Configuration Method of Distributed Photovoltaic Energy Storage System

PENG Wei<sup>1,2</sup>, ZHENG Lianqing<sup>1</sup>, ZHENG Tianwen<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Sichuan Energy Internet Research Institute of Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan, China)

**Abstract:** The randomness and intermittent nature of photovoltaic power generation lead to low resource utilization, and energy storage has the characteristics of flexible control and rapid response. It is currently one of the effective means to solve photovoltaic grid connection and improve consumption. At present, the high investment cost of energy storage is the key to restrict its promotion and application. Therefore, the optimal configuration method of energy storage in distributed photovoltaic systems is studied from the perspective of cost. Firstly, take the investment and operating cost of distributed energy storage system as the goal, a two-layer optimization model is established while considering the storage access location, configuration capacity, state of charge, and grid operation status as constraints. And then the optimization model solution method is introduced, that is, the outer layer uses genetic algorithm to optimize energy storage configuration location, power and capacity, and the inner layer uses particle swarm algorithm combined with MATPOWER power flow calculation tool to optimize the daily operation strategy of energy storage. Finally, the IEEE 9-node system is used in Matlab software to verify the feasibility and effectiveness of the proposed optimal configuration method.

**Key words:** distributed photovoltaic; distributed energy storage; optimal configuration; genetic algorithm; particle swarm algorithm

## 0 引言

随着化石能源危机与环境污染问题日益严重, 建设清洁低碳、安全高效的能源体系已是未来发展的必然趋势, 太阳能资源作为一种清洁可再生能源目前已广泛应用于分布式光伏发电系统<sup>[1]</sup>。

光伏发电的随机性和间歇性导致输出功率波动较大, 为电网的安全稳定运行带来严重挑战。同时随着需求侧负荷峰谷差增加, 负荷尖峰时刻供电问题更加凸显, 单纯的增加发电机备用容量不仅投资费用昂贵而且设备资源利用率低。储能具有功率快速控制、能量灵活吞吐的特性, 是当前解决光伏并网和消纳的有效手段之一<sup>[2]</sup>。目前储能投资费用是

制约其推广应用的关键,因此研究储能的优化配置对于提高光伏消纳、电网稳定和系统经济效益都具有重要意义。

目前,国内外许多学者对此课题进行了广泛研究,储能优化配置方法主要有差额补充法、波动平抑分析法和经济性评估法。1) 差额补充法:文献[3]介绍了在光伏-储能系统中利用光伏发电系统的最小日发电量与其在雨雪等极端天气下的发电量差额作为储能的配置容量;文献[4]根据风速概率密度计算风电场输出功率期望值作为风电场平均功率水平,用实际输出功率和该平均功率的差额确定储能的补偿容量,可实现风电场的定功率输出,但储能容量相对要大一些。2) 波动平抑分析法:文献[5]介绍了一种基于平滑控制的超级电容与电池混合储能系统的能量管理方法;文献[6]提出了一种用于控制微电网联络线功率输出的储能系统容量优化方法;文献[7]通过 BESS 所需补偿特定频段来确定其功率容量,但补偿频段的选取仅限于 0.01~1 Hz 之间,适应性不强,且没有给出储能系统容量确定方法。3) 经济评估法:文献[8]介绍了储能配置在光伏发电侧从减小脱网考核、限电考核和功率控制子站投运率考核等几方面衡量储能的经济效益;文献[9]以并网分布式光伏储能系统作为研究对象,配置储能后系统运行最小电力花费为目标;文献[10-11]针对储能系统利用分时电价峰谷价差套利、参与辅助服务、替代备用电源等,建立了系统收益目标函数,使配置储能后系统收益最大。

已有的储能优化配置研究中经济评估法使用较少,且研究对象多为单一分布式电源中配置储能。因此,考虑在分布式光伏储能系统中针对多个分布式源配置储能建立双层优化模型,外层采用遗传算法优化储能配置位置、功率和容量,内层采用粒子群算法结合 MATPOWER<sup>[12]</sup>潮流计算工具优化储能日内运行策略使系统总成本最小;最后,在 Matlab 软件中采用改进 IEEE9 节点系统验证了优化配置方法的可行性和有效性。

## 1 分布式储能系统优化配置模型

考虑在分布式光伏储能系统中针对多个分布式电源配置储能,采用经济评估法对不同储能配置方案进行评价,最终取经济性最佳方案作为储能最优配置方案。

### 1.1 目标函数

取储能系统年总成本作为目标函数,主要包括电网网损费用、分布式电源提供的无功功率费用、储能充放电费用以及储能成本费用,具体公式如式(1)所示。

$$F = C_{\text{LOSS}} + C_{\text{DG}} + C_{\text{PB}} + C_{\text{DESS}} \quad (1)$$

式中: $F$ 为储能系统年总成本; $C_{\text{LOSS}}$ 为网损费用; $C_{\text{DG}}$ 为分布式电源提供的无功功率费用; $C_{\text{PB}}$ 为储能充放电费用; $C_{\text{DESS}}$ 为储能成本费用。

$$C_{\text{LOSS}} = \sum_1^T \sum_1^{24} P_{\text{LOSS}}(i) \cdot \Delta t \cdot R(i) \quad (2)$$

式中: $P_{\text{LOSS}}(i)$ 为采样时刻电网损耗功率; $\Delta t$ 为系统采样时间间隔; $R(i)$ 为分时电价; $T$ 为一年内储能系统运行天数。

$$C_{\text{DG}} = 0.03 \sum_1^T \sum_1^{24} P_{\text{dg}}(i) \cdot \Delta t \cdot R(i) \quad (3)$$

式中, $P_{\text{dg}}(i)$ 为采样时刻分布式电源提供的无功功率。

$$C_{\text{PB}} = \sum_1^T \sum_1^{24} \{P_{\text{ch}}(i) - P_{\text{dis}}(i)\} \cdot \Delta t \cdot R(i) \quad (4)$$

式中: $P_{\text{ch}}(i)$ 为采样时刻储能电池的充电功率; $P_{\text{dis}}(i)$ 为放电功率。

$$C_{\text{DESS}} = C_{\text{BESS}} + C_{\text{M}} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{BESS}}$ 为储能系统投资建设费用; $C_{\text{M}}$ 为储能运行维护费用。

$$C_{\text{BESS}} = \sum_1^m (C_{\text{p}} \cdot P_{\text{bess}} + C_{\text{E}} \cdot E_{\text{bess}}) \cdot \frac{r}{(1+r)^n - 1} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{bess}}$ 为储能配置功率; $E_{\text{bess}}$ 为配置容量; $C_{\text{p}}$ 为储能单位功率成本; $C_{\text{E}}$ 为储能单位容量成本; $r$ 为贴现率; $n$ 为储能系统寿命年限; $m$ 为储能安装个数。

$$C_{\text{M}} = C_{\text{m}} Q \quad (7)$$

式中: $C_{\text{m}}$ 为单位发电量储能运行维护成本; $Q$ 为储能装置年发电量。

### 1.2 约束条件

约束条件考虑了电网安全性和储能系统运行稳定性,具体包括:电网节点功率平衡约束、分布式电源出力约束、节点电压幅值约束、支路有功功率约束、储能系统充放电功率约束以及荷电状态约束等。

#### 1) 节点功率平衡

$$P_{\text{u}} = U_{\text{u}} \sum_{j=1}^N U_{\text{j}} [G_{\text{ij}} \cos(\delta_{\text{u}} - \delta_{\text{j}}) + B_{\text{ij}} \sin(\delta_{\text{u}} - \delta_{\text{j}})] \quad (8)$$

$$Q_{\text{u}} = U_{\text{u}} \sum_{j=1}^N U_{\text{j}} [G_{\text{ij}} \sin(\delta_{\text{u}} - \delta_{\text{j}}) - B_{\text{ij}} \cos(\delta_{\text{u}} - \delta_{\text{j}})] \quad (9)$$

式中: $P_{it}$ 、 $Q_{it}$ 分别为 $t$ 时刻电网节点 $i$ 的注入有功功率和无功功率; $U_{it}$ 、 $U_{jt}$ 分别为 $t$ 时刻节点 $i$ 、 $j$ 的电压; $\delta_{it}$ 、 $\delta_{jt}$ 分别为 $t$ 时刻节点 $i$ 、 $j$ 的相角; $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为节点导纳矩阵第 $i$ 行 $j$ 列的实部和虚部; $N$ 为节点总数。

### 2) 发电机出力约束

$$P_{r,\min} \leq P_{G,r,t} \leq P_{r,\max} \quad (10)$$

式中, $P_{r,\min}$ 、 $P_{r,\max}$ 和 $P_{G,r,t}$ 分别为第 $r$ 个分布式电源的最小、最大出力和 $t$ 时刻第 $r$ 个电源的实际出力。

### 3) 节点电压约束

$$U_{i,\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\max} \quad (11)$$

式中, $U_{r,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,t}$ 分别为节点 $i$ 所允许的最低、最高电压和 $t$ 时刻节点 $i$ 实际电压。

### 4) 支路有功约束

$$-P_{l,\max} \leq P_{l,t} \leq P_{l,\max} \quad (12)$$

式中: $P_{l,\max}$ 为支路 $l$ 的最大有功功率; $P_{l,t}$ 为支路 $l$ 在 $t$ 时刻的实际有功功率。

### 5) 储能荷电状态连续性约束

$$S_{oc,x,t} = S_{oc,x,0} + \frac{\sum_{h=1}^t \left( P_{ch,x} \eta_{e,x} - \frac{P_{dis,x}}{\eta_{d,x}} \right) \Delta T}{E_{bess,x}} \quad (13)$$

式中: $S_{oc,x,0}$ 和 $S_{oc,x,t}$ 分别为储能系统 $x$ 的初始时刻和 $t$ 时刻的荷电状态; $P_{ch,x}$ 和 $P_{dis,x}$ 分别为储能系统 $x$ 的充放电功率; $\eta_{e,x}$ 和 $\eta_{d,x}$ 分别为储能系统 $x$ 的充放电效率; $E_{bess,x}$ 为储能系统 $x$ 的额定容量。

### 6) 储能荷电状态约束

$$S_{oc,\min} \leq S_{oc}(i) \leq S_{oc,\max} \quad (14)$$

式中, $S_{oc,\min}$ 和 $S_{oc,\max}$ 分别为储能系统 $x$ 的最小和最大荷电状态。

### 7) 储能系统功率约束

$$P_{DESS,i,t} = x_i (P_{dis,i,t} - P_{ch,i,t}) \quad (15)$$

式中: $P_{DESS,i,t}$ 为节点 $i$ 处储能能在 $t$ 时刻的实际充放电功率; $x_i$ 为0—1状态变量,1表示电网第 $i$ 个节点位置接入储能,反之未接入; $P_{dis,i,t}$ 为节点 $i$ 储能 $t$ 时刻放电功率; $P_{ch,i,t}$ 为节点 $i$ 储能 $t$ 时刻充电功率。

### 8) 储能系统充放电功率约束

$$-P_{bess} \leq P_{dis,i,t} \leq P_{bess} \quad (16)$$

$$-P_{bess} \leq P_{ch,i,t} \leq P_{bess} \quad (17)$$

式中, $P_{bess}$ 为第 $i$ 个节点接入储能的额定功率。

## 2 储能优化配置求解方法

### 2.1 求解流程

分布式储能优化配置是一个多目标非线性整数规划问题,包括确定储能接入位置、功率、容量以及

运行策略等。将单层多目标优化问题转换为双层优化来求解,可以很大程度降低求解复杂程度。因此,建立双层优化模型:外层优化目标为储能系统接入位置、功率和容量,以上技术参数为离散整数形式,适合采用遗传算法基因编码优化求解;内层优化目标为储能系统成本,在外层给出确定的储能参数后,内层采用粒子群算法结合MATPOWER潮流计算工具,优化储能系统的运行策略,使储能系统在该种配置下总成本最小;然后,将内层优化结果反馈回外层进行遗传算法的选择、交叉和变异运算,通过反复迭代比较确定可行域内储能最优配置和运行策略。具体求解过程如储能优化配置流程图1所示。

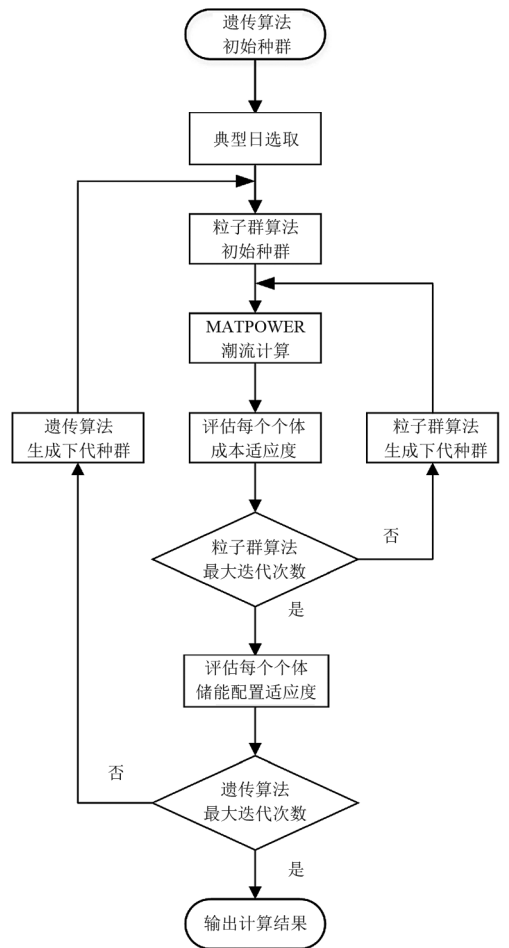


图1 储能优化配置流程

### 2.2 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)是模拟自然界生物进化机制的一种算法。首先,需要通过编码建立一个初始种群;然后,运用遗传操作对种群中每个个体对环境的适应程度进行操作,实现优胜劣汰的进化过程。

种群中的个体编码信息包含影响目标函数的决策变量,类似于决定生物特性的基因,同时遗传算法

中个体信息采用二进制编码,适合于表示离散整数变量。文中的种群个体信息包含储能接入位置、功率和容量等信息。

遗传算法的目标函数为  $F$ , 在确定种群后每个个体将信息传递给内层优化, 通过粒子群算法得到的优化结果即为该遗传个体的适应度。根据每个个体的适应度筛选出优质个体保留到下一代, 直至求得最优解。其中遗传操作主要包括选择算子, 交叉算子和变异算子。

### 2.3 粒子群算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 也是一种进化算法, 适用于解决连续非线性问题。它是从随机解出发, 通过迭代寻求最优解。优化问题的每个潜在解都可以看作一个粒子, 每个粒子都有一个适应度 (fitness), 由自身参数和与目标函数映射关系决定; 粒子包含速度和位置两个参数, 前者决定粒子飞行的速度和方向, 后者表示目标的一种潜在解。采用线性递减权重控制策略 (linearly decreasing weight, LDW), 能够有效提高算法寻优速度, 具体公式如下:

$$v_{ij,k+1} = \omega v_{ij,k} + c_1 r_1 (p_{bij,k} - x_{ij,k}) + c_2 r_2 (g_{bj,k} - x_{ij,k}) \quad (18)$$

$$\omega = \frac{(\omega_{ini} - \omega_{end}) \cdot (k_{max} - k)}{k_{max}} + \omega_{end} \quad (19)$$

$$x_{ij,k+1} = x_{ij,k} + v_{ij,k+1} \quad (20)$$

式中:  $i$  为第  $i$  个粒子;  $j$  为粒子的维度;  $k$  为迭代次数;  $\omega$  为权重系数;  $p_{bi}$  为个体极值;  $g_b$  为全局极值;  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子;  $r_1$ 、 $r_2$  为  $0 \sim 1$  之间的随机数;  $\omega_{ini}$  为初始权重;  $\omega_{end}$  为迭代至最大进化代数时的权重;  $x_{ij}$  为粒子的位置。

在外层优化给定储能接入位置、功率和容量后, 内层首先随机产生各采样时刻储能的充放电功率; 然后, 根据储能荷电状态连续性约束进行功率修正并得到单个个体日内运行策略; 最后, 利用粒子群优化算法结合 MATPOWER 潮流计算工具通过多次迭代寻优求得当前给定配置下储能系统的最优日内运行策略。

## 3 算例分析

### 3.1 参数配置

选取改进 IEEE 9 节点系统作为仿真测试算例, 图 2 为系统电气接线图, 其中 2 号、3 号节点分别接入最大出力为 16.5 MW 和 8.3 MW 的光伏发电

系统, 1 号节点为系统平衡节点且接有装机容量为 30 MW 的常规发电机组, 5 号、7 号和 9 号节点处接入负荷。

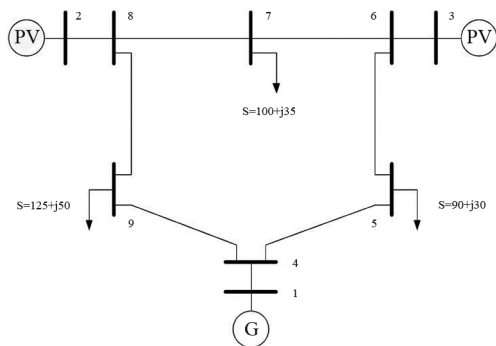


图 2 IEEE 9 节点电气接线

现考虑在 1—9 号节点中最多选取 2 个位置配置储能, 储能额定功率可选 4.0、6.0、8.0、10.0 MW, 额定容量可选 4~50 MWh。

图 3 为 2 号光伏发电系统某典型日出力曲线图, 其中采样时间间隔为 1 h。为简化计算, 3 号光伏发电系统各时刻出力取为 2 号光伏发电系统同时刻出力的 0.5 倍。

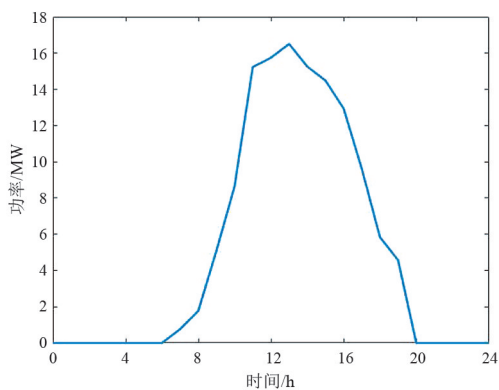


图 3 光伏出力曲线

选取中国某地区分时电能表, 其峰谷电价执行时段和具体价格如表 1 所示。储能电池选择综合性能较好的锂离子电池, 它支持深度充放电, 在 80% 的放电深度情况下循环寿命可达 3000 次以上, 仿真相关参数选取如表 2 所示<sup>[13-16]</sup>。

表 1 分时电价

分段时间	价格/(元/kWh)
00:00—08:00	0.25
08:00—11:00	0.75
11:00—18:00	0.50
18:00—22:00	0.75
22:00—24:00	0.25



表 2 工程参数

参数名称	数值	参数名称	数值
$C_p/(元/kW)$	0.30	$C_E/(元/kWh)$	0.40
$r/\%$	3	$C_m/(元/kWh)$	0.05
$S_{oc,min}$	0.2	$S_{oc,max}$	0.8
$\eta_{ch}$	0.95	$\eta_{dis}$	0.90
$C_1$	1.5	$C_2$	1.5
$w_{ini}$	0.40	$w_{end}$	0.90

3.2 结果分析

按照双层优化模型求解流程,在外层遗传算法最大迭代次数 100 次、交叉率 0.7、变异率 0.05,在内层粒子群算法最大迭代次数 100 次、种群数 60 的情况下通过运行程序解得储能最佳配置方案为:4 号和 9 号节点分别接入 4 MW/4 MWh 电池储能。

图 4 为分布式储能系统总成本随迭代次数的变化曲线,可以看出当迭代次数达 65 次时目标收敛,此时系统最小成本为 4225 万元/年。图 5 和图 6 分别为系统取最小成本时,4 号和 9 号节点处储能的荷电状态曲线。

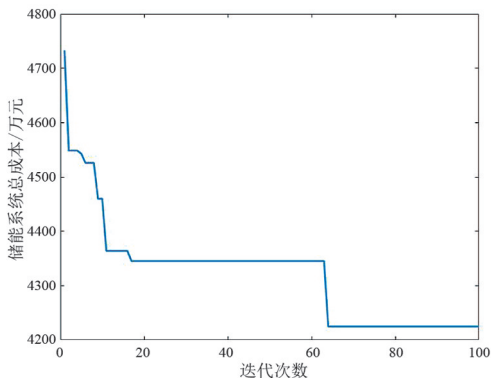


图 4 储能系统成本适应值曲线

从图 5 和图 6 可看出储能主要在 00:00—08:00 和 11:00—18:00 电价低平时段充电,08:00—11:00 和 18:00—22:00 电价峰值时段放电,储能运行策略能够利用峰谷电价差套利减小充放电费用。

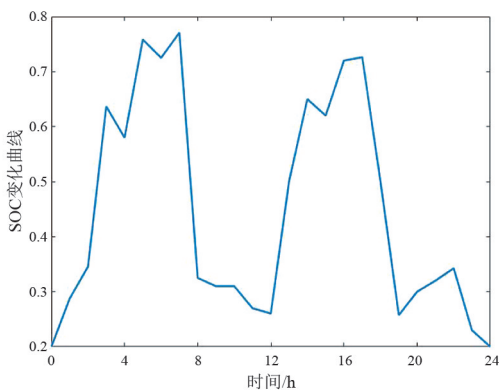


图 5 4 号节点储能 SOC 曲线

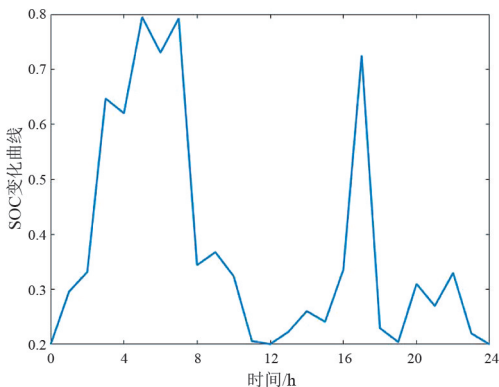


图 6 9 号节点储能 SOC 曲线

4 结 论

针对分布式光伏储能系统优化配置问题,提出遗传算法结合粒子群算法的双层优化模型。详细介绍了算法求解流程,然后通过改进 IEEE9 节点系统进行仿真验证,最后得到了以下基本结论:

1) 所提出的双层优化模型能够有效解决分布式光伏系统中储能选点布局和容量配置问题,同时算法运行稳定且收敛性良好。

2) 在给定的 IEEE9 节点系统中,当 4 号节点和 9 号节点分别接入 4 MW/4 MWh 的储能时,系统最小成本为 4225 万元/年。

3) 储能运行策略主要表现为:电价低平时段充电,峰值时段放电,通过峰谷电价差套利减小充放电费用;同时储能不同时刻的充放电能够改变电网潮流,一定程度上降低系统网损和无功费用。

参考文献

[1] 袁见. 中国太阳能光伏产业政策效应研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013.

[2] 林少伯. 含光伏电源的微电网储能控制技术[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

[3] 吴思圆,周富云. 直流配电网中储能容量配置原则及容量配比[J]. 通信电源技术, 2018, 35(9): 225-227.

[4] 韩涛,卢继平,乔梁,等. 大型并网风电场储能容量优化方案[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 169-173.

[5] 张野,郭力,贾宏杰,等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 36-41.

### 3.3 工程实施

现场施工不需要放油,铁芯不会暴露,消防柜、管道支架基础、三通管件等器件与变压器距离能满足安全要求,安装可在不停电情况下进行。为防止触电危险,在做好现场查勘和附件设计制造、过渡方案以及机具、器械、车辆、人员等前期准备工作后,排油和注氮管道安装过程需要停电进行,停电时间总耗时约 24 h。

## 4 结 论

前面创新性提出的利用变压器人孔、取样阀和放油阀作为接口的改造方案,现场实施简单,无需变压器运输、吊罩、开孔、清洗、回吊、调试等工序,费用支出低,对主设备影响小;在现场安全措施到位的情况下,停电时间大幅减少;且不使用明火,杜绝了火灾隐患;并由排油注氮厂家出具改造方案、计算报告及产品承诺函,与变压器生产厂家责任明确。

利用放油阀和取样阀,因变压器运行时放油阀

处于关闭,大部分改造工作可在不停电条件下完成,与利用人孔和取样阀方案比较,变压器无需排油、注油工序,停电时间短,几乎不存在变压器铁芯受潮或变压器油中混入气体的风险。在满足取样阀和放油阀改造条件时,应优先选用此方案。

### 参考文献

- [1] 梁猛,邵华,林榕.主变压器 BMH 型排油注氮灭火装置改造方案及工程应用[J].电力建设,2010,31(9):64-67.
- [2] 徐晓辉.排油注氮灭火装置控制系统设计研究[J].电气自动化,2017,39(5):99-101.
- [3] 王艳,李士林.大型变压器排油注氮消防系统改造[J].河北电力技术,2009,28(5):45-47.

### 作者简介:

谭文强(1974),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向为电力消防安全管理;

宋宇(1989),男,硕士研究生,工程师,研究方向为电力和建筑消防安全管理;

邓浩(1986),男,硕士研究生,高级工程师,从事变电设备检修工作。

(收稿日期:2021-08-26)

(上接第 49 页)

- [6] 王成山,于波,肖峻,等.平滑微电网联络线功率波动的储能系统容量优化方法[J].电力系统自动化,2013,37(3):12-17.
- [7] JIA Hongxin, FU Yang, ZHANG Yu, et al. Design of hybridenergy storage control system for wind farms based onflow battery and electric double-layer capacitor[C]// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, China, 2010:1-6.
- [8] 蒋科,张信真,苏麟,等.新能源侧储能系统综合经济效益评估方法与实例[J].电力勘测设计,2020(S1):18-24.
- [9] 分布式储能系统优化与经济性分析[D].长沙:湖南大学,2019.
- [10] Benedikt Lunz, Hannes Walz, Dirk Uwe Sauer. Optimizing Vehicle-to-Grid Charging Strategies Using Genetic Algorithms under the Consideration of Battery Aging[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011:1-7.
- [11] Ohtaka T, Iwamoto S. Possibility of using NAS battery systems for dynamic control of line overloads [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002:44-49.

- [12] Zimmerman, R D, Murillo-Sánchez. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2011,26(1):12-19.
- [13] 谢桦,滕晓斐,张艳杰,等.风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J].电力系统自动化,2019,43(6):70-76.
- [14] 修晓青.储能系统容量优化配置及全寿命周期经济性评估方法研究[D].北京:中国农业大学,2018.
- [15] 严玉廷.考虑寿命约束的分散式储能控制方法[J].云南电力技术,2019,47(2):11-15.
- [16] 刘文霞,牛淑娅,石道桂,等.考虑运行策略及投资主体利益的主动配电系统储能优化配置[J].电网技术,2015,39(10):2697-2704.

### 作者简介:

彭伟(1990),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电中储能的优化配置;

郑连清(1964),男,博士,教授,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用等;

郑天文(1987),男,博士,主要从事储能、新能源系统控制与优化运行方面的研究工作。

(收稿日期:2021-09-31)