

DOI: 10.7667/PSPC170700

# 考虑电动汽车调度的微电网混合储能容量优化配置

马益平

(国网宁波供电公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 在微电网中适当的储能配置方案能保证微电网运行的经济性和可靠性。在考虑分布式电源的建设成本、运行维护成本、回收成本、环境成本和能源短缺补偿成本的基础上, 提出了一种含电动汽车调度的微电网混合储能容量优化配置策略。该策略在考虑了不同种类储能设施和负荷的基础上, 通过对系统出力和负荷的协调来构建经济适用的混合储能系统。并在满足重要负荷和一般负荷的供电可靠性基础上, 采用人工蜂群算法得到最优的储能容量配置。最后, 以一个具有20年使用寿命的微电网项目来进行对比分析, 结果验证了所提优化配置方法的有效性。

**关键词:** 微电网; 分布式电源; 储能

## Hybrid energy storage capacity optimization configuration for micro-grid considering EV scheduling

MA Yiping

(State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** The optimal sizing of energy storage in micro-grid is essential for improving reliability and economic efficiency. A hybrid energy storage capacity optimization configuration strategy for micro-grid with EV scheduling is presented with consideration of construction cost, operation maintenance cost, recycling profit, environment cost and energy shortage compensation cost. The strategy takes different types of ES devices and load into consideration, to achieve economic efficiency of the constructed Hybrid Energy Storage System (HESS) through the coordination of the system output and load. Based on the reliability of power supply which satisfies the important and normal load, the optimal energy storage capacity configuration is obtained by Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. Finally, the micro-grid project with a 20-year service life is used for comparative analysis. The results verify the effectiveness of the proposed optimization method.

**Key words:** micro-grid; distributed energy resource; energy storage

## 0 引言

微电网(Micro-Grid, MG)是解决分布式能源(Distributed Energy Resource, DER)利用的有效方法之一, 而对于电源容量的规划研究是提高微电网的经济性和运行性能的重要组成部分。在微电网中可利用的能源种类很广泛, 包括风力发电(Wind Turbine, WT)、光伏发电(Photovoltaic Panels, PV)、热电联产发电(Combined Heat and Power Generation, CHP)、储能系统(Energy Storage System, ESS)等。此外, 储能系统又分为机械储能、电磁储能、电化学储能三种储能方式。因微电网中不同种类负荷的可靠性要求不同, 所以需要构建一种包含多种储能方式的混合储能系统以实现对不同种类负

荷的差异化补偿服务。

储能系统在平滑分布式电源入网过程中起着重要的作用, 并且合适的储能系统容量配置会大幅度提高微电网的经济性。针对储能系统容量配置方面的研究: 文献[1]提出了一种计及系统经济运行方式和电池寿命的微电网储能容量优化模型, 并运用改进粒子群与一种网格自适应直接搜索相结合的迭代求解策略获取最佳容量。文献[2]提出了一种综合容量配置和能量管理的组合规划方法, 采用进化算法和 MILP 算法来解决该组合规划问题。文献[3]提出了一种含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网多目标容量优化配置模型, 并采用自适应多目标差分进化算法进行求解。文献[4]以含 REP 的微电网为研究对象, 提出用加权移动平均控制法来平滑分布式发

电的输出功率,同时提出用上下限约束控制法对微电网负荷削峰填谷。文献[5]基于已搭建的以储能电池为主控微源的光、储、柴微电网,分别在蓄电池不同荷电状态、负载不同程度扰动和是否投入柴发微源的三种不同实验条件下分析微电网的运行特性。

针对如何构建储能系统来满足不同种类负荷的可靠性要求:文献[6-11]分别研究了超级电容器和电池的组、超导磁能存储设备、飞轮储能设备和燃料电池等。这些文献虽然分析研究了各种储能设备的基本特性,即能量密度和功率密度,但很少考虑到储能设备的响应速度。文献[12]将微电网中负荷分为用电负荷和供暖/制冷负荷两类,并将电动汽车看作一种电池储能设备。文献[13]对含微电网的配电网,改进并提出一种包含极端情况下的供电可靠性算法。因为微电网当中不同负荷对于供电可靠性的要求并不相同,因此需要考虑不同储能设备的响应速度去匹配各种负荷的供电可靠性要求。这是本文的主要创新点,也是本文提出的优化策略的立足点。因ABC算法具有简单、易用、收敛性较高和存储要求较小等优点,可用来解决该优化问题<sup>[14-16]</sup>。

本文综合考虑了不同储能设备的特点和不同负荷的重要程度分类,将储能设备按其响应速度的不同去匹配重要负荷和一般负荷,以此提出了一种微电网储能容量优化配置策略,并构建一种包含电动汽车调度的混合储能系统。此外,本文对每一种污染物的排放总量及补偿成本进行了计算,来表征天然气燃烧产生的环境影响。实例证明了本文所提方法的正确性和有效性。

## 1 基于全寿命周期成本的微电网容量规划模型

### 1.1 各类分布式电源的模型

1) 风力发电模型一般采用分段函数<sup>[17]</sup>构成。

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v(t) < v_i \text{ or } v(t) > v_o \\ \frac{v(t)^3 - v_i^3}{v_r^3 - v_i^3} P_r & v_i \leq v(t) < v_r \\ P_r & v_r \leq v(t) \leq v_o \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{WT}(t)$ 是  $t$  时刻风机的输出功率;  $P_r$ 是风机的额定功率;  $v_r$ 是风机的额定风速;  $v_i$ 是风机的切入风速;  $v_o$ 是风机的切出风速。

此外,风力发电机一般使用寿命较长,无需更换,其建设成本只与装机容量和使用年限有关。但其维护成本较高,且装机容量越大,维护成本越高。

2) 光伏阵列的输出功率主要由光照强度和温度决定,因此公式可描述为

$$P_{PV}(t) = n_{PV} P_r \left( \frac{R_c(t)}{R_r} \right) [1 + k(T_c(t) - T_r)] \quad (2)$$

式中:  $P_{PV}(t)$ 是光伏阵列在  $t$  时刻的输出功率;  $P_r$ 是光伏阵列单元在标准环境下的额定功率;  $R_c(t)$ 是  $t$  时刻的光照强度;  $R_r$ 是标准环境下的额定光照强度;  $T_c(t)$ 是  $t$  时刻的温度;  $T_r$ 是标准环境下的额定温度;  $k$ 是功率温度系数;  $n_{PV}$ 是光伏阵列单元的数量。

光伏电池是由许多光伏阵列单元组成。并且使用的光伏阵列单元越多,光伏电池的容量越大,其建设和维护运行成本越高。但在回收利润方面,光伏电池要比相同容量的风力发电机低很多。

3) 燃气轮机是一种将燃气的化学能转化为机械能来带动叶轮旋转的原动机,然后叶轮带动与其耦合的发电机来产生电力。燃料燃烧释放的热量同时可以用于直接供热,因此燃气轮机既可以产生电能又可以产生热量。此外,燃气轮机产生的排气热量也可以注入到供暖系统中,从而提高燃料的利用效率。上述整个过程被称为热电联产。燃气锅炉是一种用来提供热负荷的热发生器,燃气锅炉的燃料消耗取决于锅炉的大小规模和热转化效率。燃气轮机和燃气锅炉的模型以及燃料消耗的计算方式如下所示。

$$Q_c(t) = P_G(t) \frac{1 - \eta_p - \eta_l}{\eta_p} \quad (3)$$

$$Q_{G1}(t) = Q_c(t) l_{hc} \quad (4)$$

$$Q_{G1}(t) + Q_{G2}(t) = Q_L \quad (5)$$

$$C_{Gas} = C_P + C_Q = \sum_{t=1}^{\max} \left( \frac{P_G(t) \Delta t}{M_{Gas} \eta_p(t)} + \frac{Q_{G2}(t)}{M_{Gas} \eta_Q} \right) \quad (6)$$

式中:  $Q_c(t)$ 是  $t$  时刻下燃气轮机产生的废气;  $\eta_p$ 是燃气轮机的发电效率;  $\eta_l$ 是燃气轮机的热损失系数;  $P_G(t)$ 是  $t$  时刻下燃气轮机的电力输出功率;  $Q_{G1}(t)$ 是  $t$  时刻下燃气轮机产生的废热烟气提供的热负荷;  $l_{hc}$ 是热转换系数;  $Q_{G2}(t)$ 是  $t$  时刻下燃气锅炉产生的热负荷;  $C_P$ 是燃气轮机的天然气消耗量;  $C_Q$ 是燃气锅炉的天然气消耗量;  $\Delta t$ 是燃气轮机的运行时间;  $M_{Gas}$ 是天然气的发热值,一般取  $9.7 \text{ kWh/m}^3$ ;  $\eta_Q$ 是燃气锅炉的发热效率。

燃气锅炉和燃气轮机在建设成本、运行维护成本和回收利润方面,具有和风力发电机相似的性质。但燃气轮机使用的燃料是天然气,其排放的烟气对环境有害,因此在目标函数中要计算其环境补偿成本。

#### 4) 储能系统的模型

储能系统因其具有平滑系统输出功率和峰值偏移的特性, 所以对于含分布式电源的高渗透率微电网而言至关重要。各种储能形式的基本特性和参数如表 1 所示。

表 1 储能设备的参数

Table 1 Parameters of energy storage devices

储能类型	能量密度/ (Wh/kg)	功率密度/ (W/kg)	单价/ (\$/kWh)	响应 速度
铅酸蓄电池	30~50	75~300	70~420	中等
锂离子电池	75~250	150~315	280~1400	中等
超级电容器	0.1~15	500~5000	420~5600	快
飞轮储能	5~130	400~1600	1400~4900	快
超导磁能储存	0.5~5	500~2000	980~9800	快

如表 1 所示, 铅酸蓄电池和锂离子电池虽有着能量密度高和单价低的优势, 但在功率密度和响应速度上又不如超级电容器、飞轮和超导磁能存储。所以本文的储能系统采用具有高功率密度的超级电容器以及具有高能量密度的电池组合。这两种类型的组合可以进一步提高系统的供电可靠性。例如, 在突然断电或发生短时间功率剧烈波动时, 可以利用具有高功率密度和快速响应速度的超级电容器来供电, 而蓄电池适用于后续长时间的电力供应。

储能系统的运行状态基本上是由初始容量以及一定时间间隔的充放电功率决定, 具体描述如式(7)所示。

$$E_{ES}^{(t)} = E_{ES}^{(t-1)}(1 - \sigma) + P_{ES}^{(t)} \cdot \eta \cdot \Delta t \quad (7)$$

式中:  $E_{ES}^{(t)}$  表示  $t$  时刻储能的存储能量;  $\sigma$  是自放电比率;  $P_{ES}^{(t)}$  是当前时间间隔内的充电/放电功率;  $\eta$  是转化效率;  $\Delta t$  是时间间隔。

铅酸蓄电池的使用寿命相对较短(通常约 4000 次循环), 测试用运行条件见文献[18]。铅酸蓄电池的可循环次数的计算如式(8)所示。

$$N = a_1 + a_2 e^{a_3 D_N} + a_4 e^{a_5 D_N} \quad (8)$$

式中:  $D_N$  表示放电深度(Depth of Discharge, DOD);  $N$  表示该放电深度下的等效循环次数;  $a_1$ — $a_5$  为系数。一个循环周期下的铅酸电池运行成本计算如式(9)所示。

$$C_{Pba,1} = \frac{C_{cap,Pba}}{N} \quad (9)$$

式中:  $C_{cap,Pba}$  表示电池的建设投资成本;  $C_{Pba,1}$  表示一个充放电周期的运行成本。

储能系统的建设成本、运行维护成本和回收利润都与储能设备的类型、安装的容量和更换次数(使用年限)有关。例如, 铅酸蓄电池的使用寿命相对较

短, 价格较低, 而超级电容器使用寿命相对较长, 价格较高。因此, 我们才要计算混合储能容量的最优配置, 以达到减小最多成本的目的。

#### 1.2 电动汽车的模型

电动汽车(Electric Vehicles, EV)在减少能源消耗和保护环境方面起着重要作用。全球主要的汽车制造商在不断进行技术创新, 进一步促进了电动汽车的发展和普及。随着大规模电动汽车接入电网, 因为其具有灵活的充放电能力, 对电力系统产生了巨大影响, 这也正促使我们更加仔细考虑电源的容量规划。

电动汽车每日行驶里程  $S$  的概率密度函数<sup>[19]</sup>, 如式(10)所示。

$$g(s) = \frac{1}{2\delta_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln s - \mu_s)^2}{2\delta_s^2}\right] \quad (10)$$

式中, 电动汽车每日行驶里程  $S$  的概率密度函数符合正态分布, 其系数  $\delta_s$ 、 $\mu_s$  的值分别为 0.88 和 3.2。

第  $i$  辆电动汽车的充电容量和充电功率计算如式(11)所示。

$$E_i = \eta_{EV} \cdot d_i \quad (11)$$

$$P_{EV,i}(t) = \begin{cases} P_{EV} & t_A \leq t \leq t_B \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $E_i$  为第  $i$  辆电动汽车的充电容量;  $\eta_{EV}$  为电动汽车的充电转化效率;  $d_i$  为第  $i$  辆电动汽车从电网中要获取的能量。电动汽车的充电功率只在充电时间为定值  $P_{EV}$ , 其余时间为 0。

正常情况下, 第  $i$  辆电动车的充电开始时间  $t_A$  和充电结束时间  $t_B$  如式(13)和式(14)所示。

$$f_A(t) = \begin{cases} \frac{1}{\delta_A \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \mu_A)^2}{2\delta_A^2}\right] & (\mu_A - 12) < t \leq 24 \\ \frac{1}{\delta_A \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t + 24 - \mu_A)^2}{2\delta_A^2}\right] & 0 < t \leq (\mu_A - 12) \end{cases} \quad (13)$$

$$t_B = t_A + \frac{E_i}{P_{EV}} \quad (14)$$

充电开始时间  $t_A$  为分段正态分布, 其标准差均为  $\delta_A$ , 而数学期望则分别为  $\mu_A$  和  $\mu_A - 24$ 。充电结束时间  $t_B$  则是  $t_A$  加上电动汽车的充电时间(即电动汽车容量  $E_i$ /电动汽车的充电功率  $P_{EV}$ )。

通过合理控制电动汽车的充放电行为, 可以人为地减小负荷波动。通过电价引导等经济手段使一部分电动汽车的车主主动参与电网的调度, 借此达到削峰填谷的目的, 并在一定程度上节省微电网储

能系统的容量。

### 1.3 目标函数

对于一个微电网规划方案而言, 需要综合考虑短期和长期的成本以获得最优的经济利益。因此, 本文运用全寿命周期成本理论(Life Cycle Cost, LCC), 考虑整个项目周期内每个部分的成本, 构建目标函数。该目标函数包括建设成本  $C_{\text{cap}}$ 、运行维护成本  $C_{\text{om}}$ 、回收利润  $C_r$ 、环境补偿成本  $C_p$  和能源短缺补偿成本  $C_1$ 。

其中, 建设成本  $C_{\text{cap}}$  是每种分布式电源(包括风机、光伏电池、燃气轮机、燃气锅炉、锂离子电池、铅酸蓄电池和超级电容器)的建设成本之和。运行维护成本  $C_{\text{om}}$  和回收利润  $C_r$  也是如此求取。

针对燃气轮机排放烟气而设立的环境补偿成本  $C_p$ , 是每种污染物( $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ )的补偿成本累加。

能源短缺补偿成本  $C_1$  包括电负荷和热负荷的短缺补偿成本。具体计算表达式如下。

$$\min C = C_{\text{cap}} + C_{\text{om}} + C_r + C_p + C_1 \quad (15)$$

$$C_{\text{cap}} = \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^{k_i} N_i \cdot c_i \cdot \frac{1}{(1+r)^{k \cdot L_i}} \quad (16)$$

$$C_{\text{om}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{j_{\text{max}}} C_{\text{om},i} \cdot \frac{1}{(1+r)^j} \quad (17)$$

$$C_r = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{k_i} c_{r,i} \cdot \frac{1}{(1+r)^{k \cdot L_i}} \quad (18)$$

$$C_p = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{j_{\text{max}}} N_{p,i} \cdot c_{p,i} \cdot \frac{1}{(1+r)^j} \quad (19)$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{j_{\text{max}}} E_{l,i} \cdot c_{l,i} \cdot \frac{1}{(1+r)^j} \quad (20)$$

式中:  $m$  是分布式电源和储能单元的种类数;  $N_i$  是每种分布式电源或储能单元的数量;  $c_i$  是第  $i$  种设施的单位价格;  $k_i$  是第  $i$  种设施的置换时间;  $L_i$  是第  $i$  种设施的折旧年限;  $r$  是折现率;  $c_{\text{om},i}$  是第  $i$  种设备的运行维护成本;  $j_{\text{max}}$  是微电网的服务寿命;  $c_{r,i}$  是第  $i$  种设施的回收利润;  $N_{p,i}$  是每一种污染物的年排放量;  $c_{p,i}$  是每一种污染物的单位补偿成本;  $E_{l,i}$  是每一种负荷的年缺额量;  $c_{l,i}$  是每一种负荷的单位惩罚值。

### 1.4 约束条件

1) 风机、光伏阵列和燃气轮机的输出功率约束

$$0 \leq P_{\text{PV}} \leq P_{\text{PV,peak}} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{\text{WT}} \leq P_r \quad (22)$$

$$P_{\text{gt,min}} \leq P_{\text{gt}} \leq P_{\text{gt,max}} \quad (23)$$

式中:  $P_{\text{PV,peak}}$  为光伏阵列的最大输出功率;  $P_r$  为风机的额定功率;  $P_{\text{gt,min}}$  和  $P_{\text{gt,max}}$  是在满足燃气轮机输出稳定性条件下的最小、最大输出功率。

2) 储能系统的充放电功率约束

$$\begin{cases} P_{\text{c,min}} \leq P_{\text{ES}} \leq P_{\text{c,max}} \\ P_{\text{d,min}} \leq P_{\text{ES}} \leq P_{\text{d,max}} \end{cases} \quad (24)$$

式中,  $P_{\text{c,min}}$ 、 $P_{\text{c,max}}$ 、 $P_{\text{d,min}}$  和  $P_{\text{d,max}}$  分别是储能系统的最小、最大充电功率和最小、最大放电功率。

3) 储能系统的容量约束

$$E_{\text{ESS,min}} \leq E_{\text{ESS}}(t) \leq E_{\text{ESS,max}} \quad (25)$$

式中,  $E_{\text{ESS,min}}$  和  $E_{\text{ESS,max}}$  分别是储能系统充放电时的最小和最大容量。

4) 电力供应可靠性约束, 在此期间负荷的供电中断时间  $T_1$  不超过最大极限时间  $T_{1,\text{max}}$ 。

$$T_1 < T_{1,\text{max}} \quad (26)$$

5) 系统功率平衡约束, 在自治微电网运行过程中要时刻保持功率平衡。

$$P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{G}}(t) = P_{\text{L}}(t) + P_{\text{EV}}(t) + P_{\text{ES}}(t) \quad (27)$$

式中:  $P_{\text{WT}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}(t)$  和  $P_{\text{G}}(t)$  分别是  $t$  时刻风力发电机、光伏电池和微型燃气轮机的电力输出功率;  $P_{\text{L}}(t)$  是  $t$  时刻的负荷功率;  $P_{\text{EV}}(t)$  和  $P_{\text{ES}}(t)$  分别是  $t$  时刻电动汽车和储能系统的充/放电功率, 其在充电时为正数, 放电时为负数。

## 2 基于人工蜂群算法的容量优化配置策略

### 2.1 人工蜂群算法

人工蜂群算法(Artificial Bee Colony Algorithm, ABC)是由 Karaboga 在 2005 年基于蜜蜂采蜜行为提出的一种蜂群算法。该算法通过引领蜂所在食物源邻域内搜索食物、按一定概率选择某个食物源的跟随蜂搜索食物以及侦查蜂搜索新的食物源这三种行为不断循环来寻找问题的最优解<sup>[20]</sup>。

设第  $i$  个食物源在  $D$  维空间中的位置为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 。跟随蜂会根据所有食物源的收益率来对食物源进行选择, 食物源的适应度  $F(X)$  越高, 跟随蜂选择该食物源的概率越大。食物源  $i$  被选中的概率  $p_i$ , 计算公式为

$$p_i = \frac{F(X_i)}{\sum_{k=1}^N F(X_k)} \quad (28)$$

引领蜂和跟随蜂会在所在食物源的邻域内搜索新的食物源。新的食物源所在位置定义为  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ , 搜索公式为

$$v_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + r \times (x_{ij}^t - x_{kj}^t) \quad (29)$$

式中:  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ ;  $i, k \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;  $j$  和  $k$  均随机生成且  $k \neq i$ ;  $r$  是-1 到 1 之间的任一随机数。当生成的新食物源收益更好时, 放弃原食物源; 反之, 保留原食物源。

如果某个食物源在设定的迭代次数内未得到改进, 则说明该食物源对应的解为局部最优解, 放弃该食物源。此时, 与该食物源对应的引领蜂转变为侦查蜂, 其寻找新的食物源  $Z_i$  为

$$Z_i = X_{\min} + r \times (X_{\max} - X_{\min}) \quad (30)$$

式中,  $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  为原食物源  $X_i$  在每一维的上下边界。

人工蜂群算法的具体流程如下:

- 1) 初始化。随机产生  $N$  个食物源, 并计算每个食物源的适应度。
- 2) 每个引领蜂在所在食物源位置  $X_i$  的邻域内进行搜索, 按式(28)产生新的食物源位置  $V_i$ 。分别计算  $X_i$  和  $V_i$  的适应度, 保留较优的食物源位置。
- 3) 根据各食物源被选择的概率, 为跟随蜂选择一个食物源并在该食物源位置  $X_i$  的邻域内搜索, 按式(29)产生一个新的食物源  $V_i$ , 分别计算  $X_i$  和  $V_i$  的适应度, 保留较优的食物源位置。
- 4) 判断是否有被放弃的食物源, 若有, 则放弃该食物源并按式(30)寻找新的食物源来代替。若无, 进行下一步。
- 5) 判断是否达到最大迭代次数, 若没有, 则回到步骤 2), 否则, 输出最优的食物源位置。

人工蜂群算法用于微电网混合储能容量的求解, 具体求解流程如下:

- 1) 初始化人工蜂群算法的参数。读取负荷、分布式电源和电动汽车数据, 并计算其容量。
- 2) 随机产生  $N$  种优化配置方案并计算对应的全寿命周期成本  $C$ , 并将该值作为适应度。
- 3) 在上面优化方案的邻域再随机产生  $N$  种优化配置方案并计算对应的全寿命周期成本  $C$ , 并将该值与上面的适应度对比, 保留较好适应度的优化配置方案。
- 4) 判断是否连续  $I$  次优化配置方案不变, 若是, 则说明对应的解为局部最优解, 并进行下一步。若否, 则继续迭代求其局部最优解。
- 5) 判断是否达到最大迭代次数  $K$ , 若是, 则进行下一步。若否, 回到步骤 2), 重新求取其他地方的最优解。
- 6) 局部最优解之间进行比较, 计算得出全局最优解, 并输出混合储能的最优功率和容量配置。

具体求解流程图如图 1 所示。

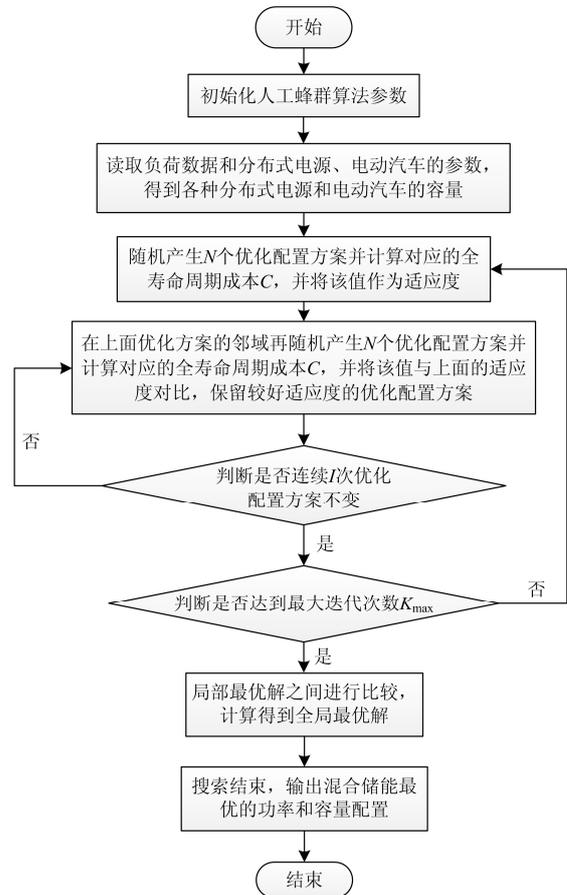


图 1 求解流程

Fig. 1 Flow chart of solution

## 2.2 储能容量配置策略

微电网的负荷由电负荷和热负荷组成。自治微电网的结构如图 2 所示。

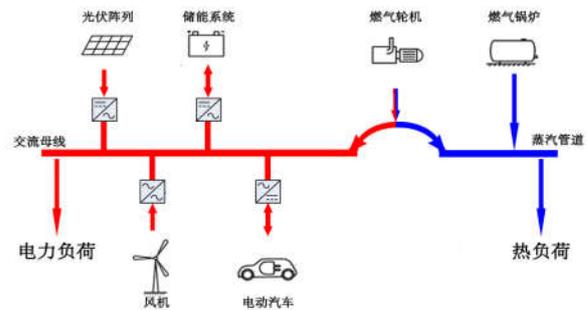


图 2 自治微电网的结构

Fig. 2 Structure of an autonomy micro-grid

如图 2 所示, 在微电网容量优化配置过程中, 电源容量规划原则如下: 微电网的热能主要是由在额定功率下工作的燃气锅炉提供, 其余所需的热能由以产热为基础运行模式的燃气轮机提供。同时燃

气轮机产生的部分电能和由风力发电机和光伏发电产生的电能一起供应给电力用户。电力负荷与系统出力的差额(可能是电力缺额或富余)会由储能系统补偿或吸收。电动汽车既可以作为负荷又可以作为电源,具有与储能系统中锂电池相似的性能。

储能系统的补偿策略考虑了不同重要程度负荷的可靠性要求<sup>[21]</sup>。按故障时最大可接受电源中断时间( $t_{lim}$ )对重要负荷进行分类,分为工业电力负荷和社会电力负荷两大类。其中工业电力负荷包含采矿、化工、冶金、电子等行业,这些行业对 $t_{lim}$ 要求比较严格,约为 200 ms~1 s。基本上是要求电源不间断供电。因此,应采用具有快速响应能力的储能设备,即超级电容器,以提高电源供电可靠性。快速响应的储能设备用于平滑系统负荷的短期波动或在长时间能源短缺的初始阶段进行供电,而电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)可用于后续的电供应。

而对于大多数社会电力负荷,对 $t_{lim}$ 要求比较宽松,约为 0.5 s~1 min,可通过年度停电限制以及全寿命周期成本计算中产生的能源短缺补偿来保证其供电可靠性。实际上,在大多数情况下,在电力短缺的初始阶段,一般负荷的短时间供电中断是可以接受的,因此不需要使用快速响应的储能设备来保证其供电可靠性。

在本文中,电池储能系统由锂电池和铅酸电池组成。锂电池具有能量密度高、短时大电流充电接收能力强、高耐受性等优点,但它的价格要远高于铅酸电池的价格,这也是阻碍锂电池大规模应用的主要原因。考虑到这些优缺点,在电池储能系统中配置合适容量的锂电池,使其充放电的优先级大于铅酸电池,可以大大减少铅酸电池的使用频率,从而提高整个电池储能系统的使用寿命。

如上文所介绍,一个包含三种储能设备的双层混合储能系统如图 3 所示。

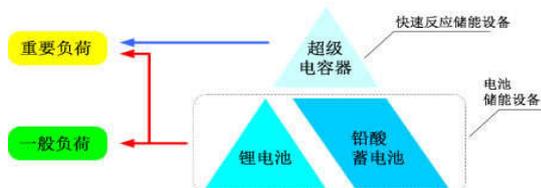


图 3 混合储能系统结构

Fig. 3 Structure of HESS

通过测量典型日的电力负荷、热负荷和各类环境参数可得到负荷曲线、风光出力曲线。将负荷和系统出力的差定义为功率差  $\Delta P$ ,由生成的  $\Delta P$  曲线与时间坐标围成的区域定义为能量差额  $\Delta E_i$ 。 $\Delta E_i$  在

某个时间间隔中的正负决定了储能设备在该时段内的充放电状态。热源和电源的总体分配策略流程具体描述如下:

1) 确定规划方案、输入数据,通过式(1)~式(3)计算可再生能源的输出功率和燃气轮机产生的电力,并计算负荷与系统出力的功率差,确定每个时段储能系统的运行状态。

2) 在一个时间间隔  $t_i$  内  $\Delta E_i > 0$  时,储能系统进行充电,将会优先给超级电容器充电。如果能量仍有富余时,电池储能系统也会进行充电,直至充满后进入浮充状态,反馈给可再生能源减少出力。

3) 在一个时间间隔  $t_i$  内  $\Delta E_i < 0$  时,储能设备进行放电。超级电容器在直到电池储能系统响应之前只给重要负荷供电,之后由电池储能系统切入给所有负荷供电,直至电量耗尽后反馈给可再生能源增加出力。

其具体分配策略流程如图 4 所示。

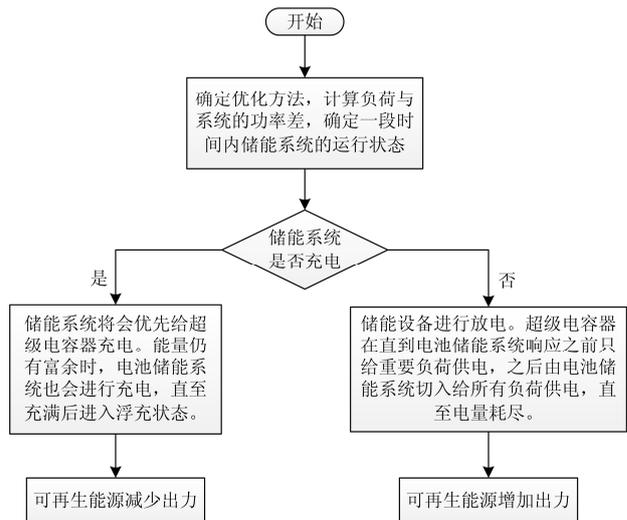


图 4 分配策略流程图

Fig. 4 Allocation strategy flow chart

### 3 算例分析

以某地实际运行的有 20 年使用寿命的微电网来进行算例分析。该微电网中的重要负荷包括工业负荷(300 kW)、电信设施(60 kW)等,一般负荷包括商业负荷(150 kW)、居民负荷(100 kW)等,并有电动汽车 10 台用于电网调度。每辆电动汽车电池容量为 24 kWh,最大充放电功率为 3 kW。

本文假设电动汽车调度时会采用有序充放电模式。在有序充放电模式下,可以通过电价引导经济手段刺激车主充放电行为<sup>[22]</sup>。通过合理的电价引导车主进行充放电,使其在负荷高峰期(18:00—22:00)进行放电行为,在负荷低谷期间(00:00—06:00)

进行充电行为。

人工蜂群算法参数设置如下： $I=1000$ ，最大迭代次数  $K_{max}=100$ ；引领蜂的种群规模  $m_1=30$ ，跟随蜂的种群规模  $m_2=10$ 。

微电网中环境的参数见文献[3]，分布式电源参数如表 2。

表 2 分布式电源的参数

Table 2 Parameters of distributed generators		
分布式电源	参数	取值
风机(WT)	单价	\$100 000
	额定功率	30 kW
	额定风速	12 m/s
	切入风速	3 m/s
	切出风速	24 m/s
光伏单元(PV)	单价	\$90
	额定功率	0.2 kWp
	额定光照强度	1 kW/m <sup>2</sup>
	额定温度	25 °C
	功率温度系数	-0.0045
燃气轮机	单价	\$66 150
	额定功率	220 kW
	系数 A	0.246 L/kWh
	系数 B	0.081 45 L/kWh
燃气锅炉	单价	\$10 000
	额定功率	50 kW
	系数	$\eta_p=0.3; \eta_l=0.5;$ $l_{hc}=0.5; M_{Gas}=0.5$
超级电容器	单价	\$2500
	单位容量	1 kWh
锂离子电池	单价	\$2.88
	单位容量	3.2 V 3000 mAh
铅酸蓄电池	单价	\$200
	单位容量	2 V 1000 Ah
	系数	$a_1=0, a_2=7753,$
		$a_3=-7.263,$
		$a_4=2603,$
$a_5=-0.8455^2$		

表 3 没有负荷分类和电动汽车调度的优化容量和各部分全寿命周期成本

Table 3 Optimized capacity and LCC components without load classification and EV scheduling

设备	容量	寿命/年	更换次数	投资费用/\$	维护费用/\$	回收利润/\$
风机	750 kW	20	0	2 500 000	196 286	-71 286
光伏电池	79.2 kWp	20	0	35 640	2798	-1016
超级电容器	23 kWh	20	0	57 500	2265	-1645
锂离子电池	27 kWh	5.07	3	24 300	17 493	-668
铅酸电池	234 kWh	1.83	10	234 000	18 338	-8080
燃气轮机	220 kW	20	0	75 000	5889	-2139
燃气锅炉	50 kW	20	0	10 000	785	-285

如表 3 中所示，因电动汽车只作为负荷使用，不并入电网参与调度，导致风机(750 kW)和光伏电

场景 1 无负荷分类和电动汽车调度

无负荷分类和电动汽车调度的典型日热负荷和典型日电力负荷曲线如图 5 所示。



图 5 典型日热负荷和典型日电力负荷曲线

Fig. 5 Curves of typical daily thermal load and electric load

如图 5 所示，无负荷分类和电动汽车调度的典型日电力负荷曲线呈双峰状，其峰谷差较大，达到 365 kW，其峰谷差率为 70%，严重影响了微电网运行的经济性。

在计算可再生能源的输出功率时，要考虑到系统的功率平衡。该场景中应用可再生能源包括 25 台 30 kW 的风机以及 79.2 kWp 的光伏电池板。风机输出功率波动较大，但夜晚出力较高，可用于一些夜晚工作的负荷。而光伏电池板出力较小，且只在白天出力，可与风机一起用于白天工作的负荷<sup>[23-24]</sup>。

在该场景中认为 10 台电动汽车只充电，不放电，将其当作负荷使用，并认为负荷是一个整体，根据功率短缺持续时间来划分其间隔。对于功率短缺持续时间短的间隔，启动超级电容器来补偿功率缺额。而对于持续时间长的间隔，当超级电容器电量耗尽后启动混合电池储能系统。其优化容量和各部分全寿命周期成本的具体结果如表 3 所示。

池(79.2 kWp)所需容量较大。又因该场景无负荷分类进行优化，导致锂离子电池和铅酸蓄电池充放电

频繁, 寿命降低, 成本提高。最后, 得到最优规划方案的生命周期成本优化成本为\$4 991 024, 其中负荷短缺的补偿成本  $C_1$  为\$884 750。

储能系统中储能设备的 SOC 状态如图 6 所示。

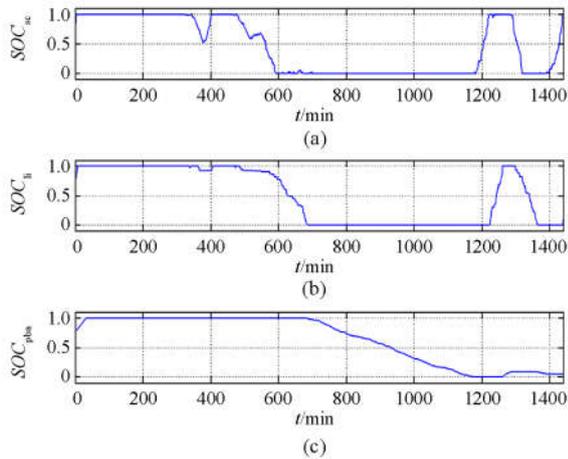


图 6 每种储能设备的 SOC 状态

Fig. 6 SOC status of each ESS component

如图 6 所示, 发现当功率短缺持续时间短时(如图中 380 min 时), 会启动超级电容器来补偿功率缺额, 而对于持续时间长的间隔(如图中 500~1200 min), 当超级电容器电量耗尽后启动电池储能系统并按照锂电池、铅酸电池的顺序进行放电。

场景 2 有负荷分类和电动汽车调度

在该算例中有 10 台电动汽车参与电网调度, 其能有效降低典型日电力负荷的峰谷差, 有无电动汽

车调度的典型日电力负荷峰谷差对比如表 4 所示。

表 4 有无电动汽车调度典型日电力负荷峰谷差

Table 4 Peak and valley difference of typical daily electric load with or without EV scheduling

类型	重要负荷峰谷差(kW)及峰谷差率	一般负荷峰谷差(kW)及峰谷差率	总电力负荷峰谷差(kW)及峰谷差率
无 EV 调度	175 (70%)	290 (81%)	365 (70%)
有 EV 调度	150 (60%)	210 (70%)	190 (44%)

另从污染物排放角度来看,  $C_1$  成本的主要部分是  $CO_2$  的补偿成本, 其他类型的污染物仅占了  $C_1$  成本很小的一部分。这是因为天然气基本上由  $CH_4$  构成, 与煤炭和柴油比较是相对清洁的燃料。污染物排放成本如表 5 所示。

表 5 污染物排放成本

Table 5 Pollutant emission cost

污染物类型	排放总量/kg	补偿单价/\$	补偿成本/\$
$CO_2$	11 750 462	0.07	822 532
$SO_2/NO_x$	4616	0.088	406

在该算例中将负荷分为重要负荷和一般负荷。对于重要负荷, 在电池储能系统响应之前, 启动超级电容器来补偿功率缺额, 在电池储能系统响应之后, 电池储能系统切入给重要负荷供电。而对于一般负荷, 则待电池储能系统响应之后, 由电池储能系统切入给一般负荷供电。其优化容量和各部分全寿命周期成本的具体结果如表 6 所示。

表 6 有负荷分类和电动汽车调度的优化容量和各部分全寿命周期成本

Table 6 Optimized capacity and LCC components with load classification and EV scheduling

设备	容量	寿命/年	更换次数	投资费用/\$	维护费用/\$	回收利润/\$
风机	660 kW	20	0	2 500 000	172 731	-62 731
光伏电池	63 kWp	20	0	28 350	2226	-808
超级电容器	19 kWh	20	0	47 500	1842	-1338
锂离子电池	36 kWh	13.7	1	10 533	7544	-258
铅酸电池	77 kWh	2.74	7	53 900	4241	-1821
燃气轮机	220 kW	20	0	75 000	5889	-2139
燃气锅炉	50 kW	20	0	10 000	785	-285

通过和表 3 对比发现, 因有 10 台电动汽车参与电网调度, 使电力负荷峰谷差率明显降低(如表 3 所示), 每种分布式电源的容量也有不同程度的减少(22 台 30 kW 风机, 63 kWp 的光伏电池板), 尤其铅酸电池容量大量降低(由 234 kWh 到 77 kWh)。又因该场景用负荷分类进行优化, 强制使用超级电容器补偿重要负荷, 导致超级电容器容量下降(由 23 kWh

到 19 kWh), 锂离子电池容量增加(由 27 kWh 到 36 kWh)。电力的小波动基本上由超级电容器和锂离子电池补偿, 因此铅酸电池平稳运行, 寿命延长。综合来看, 该微电网通过负荷分类和电动汽车调度得到明显优化, 最优规划方案的全寿命周期成本为\$3 967 221, 比无负荷分类和电动汽车调度时减少\$1 023 803。

通过负荷分类和电动汽车调度改善储能容量配置后, 储能系统每种储能设备的 SOC 状态如图 7 所示。

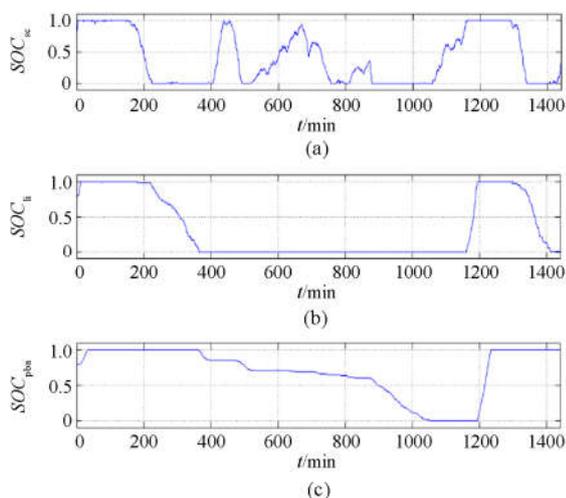


图 7 每种储能设备的 SOC 状态

Fig. 7 SOC status of each ESS component

如图 7 所示, 对于功率缺额较小的重要负荷由超级电容器来补偿(如图 7 中 400~800 min), 对于功率缺额较大的重要负荷, 先由超级电容器补偿, 后由电池储能系统补偿(如图 7 中 180~380 min)。对于一般负荷, 直接由电池储能系统补偿。

#### 4 结论

在考虑电源、储能类型和其能量特性的基础上, 本文综合考虑电源的建设成本、运行维护成本、回收成本、环境成本和停电损失成本, 提出了一种适用于自治微电网的电源容量优化配置策略和方法, 并按照负荷重要度分类和电动汽车调度构建了停电损失计算模型。然后, 采用人工蜂群算法对提出的优化方法进行寻优计算。通过典型算例分析, 得出以下结论:

1) 采用基于人工蜂群算法的容量优化配置策略, 可以使超级电容器容量下降, 锂离子电池容量增加。使电力的小波动基本上由超级电容器和锂离子电池快速补偿, 因此使铅酸电池更加平稳运行, 寿命延长, 并提高微电网运行的经济性与可靠性。

2) 通过电动汽车调度, 能减小典型日电力负荷的峰谷差, 节省分布式电源的容量, 增加电池储能系统使用寿命, 并提高微电网运行的经济性。

#### 参考文献

[1] 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 storage capacity of micro-grid considering battery life and economic operation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3256-3265.
- [2] LI B, ROCHE R, MIRAOUI A. Micro-grid sizing with combined evolutionary algorithm and MILP unit commitment[J]. Applied Energy, 2017, 188: 547-562.
- [3] 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. Optimization of micro-grid capacity considering wind/light/diesel/storage and the sea desalination load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 102-112.
- [4] 刘舒, 李正立, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
- LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [5] 陈丽丽, 牟龙华, 刘仲. 光储柴微电网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 86-91.
- CHEN Lili, MU Longhua, LIU Zhong. Analysis of the operating characteristics of a PV-Diesel-BESS micro-grid system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 86-91.
- [6] ABEYWARDANA DW, HREDZAK B, AGELIDIS V, et al. Super capacitor sizing method for energy controlled filter based hybrid energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(2): 1-10.
- [7] WANG S, TANG Y, SHI J, et al. Design and advanced control strategies of a hybrid energy storage system for the grid integration of wind power generations[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9: 89-98.
- [8] HEARN C S, LEWIS M C, PRATAP S B, et al. Utilization of optimal control law to size grid-level flywheel energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4: 611-618.
- [9] BAUDOIN S, VECHIU I, CAMBLONG H, et al. Sizing and control of a solid oxide fuel cell/gas micro-turbine hybrid power system using a unique inverter for rural micro-grid integration[J]. Applied Energy, 2016, 176: 272-281.
- [10] DONG W, LI Y, XIANG J. Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system based on battery/hydrogen with an improved ant colony optimization[J]. Energies, 2016, 9: 1-17.

- [11] BAGHAE H R, MIRSALEM M, GHAREHPETIAN G B. Multi-objective optimal power management and sizing of a reliable wind/PV micro-grid with hydrogen energy storage using MOPSO[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2017, 32: 1753-1773.
- [12] MASHAYEKH S, STADLER M, CARDOSO G A, et al. A mixed integer linear programming approach for optimal DER portfolio, sizing, and placement in multi-energy micro-grid[J]. *Applied Energy*, 2017, 187: 154-168.
- [13] 熊雄, 杨仁刚, 李建林, 等. 多元复合储能系统在含微电网配电网中的容量配比[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(10): 40-47.  
XIONG Xiong, YANG Rengang, LI Jianlin, et al. The capacity of multi-component integrated energy storage system in micro-grid distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(10): 40-47.
- [14] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] // *IEEE International Conference on Neural Networks, Proceedings*, 1995: 1942-1948.
- [15] ESMIN A A A, LAMBERT-TORRES G, DE SOUZA A C Z. A hybrid particle swarm optimization applied to loss power minimization[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(2): 859-866.
- [16] RASOULZADEH-AKHIAHANI A, MOHAMMADI B. Short-term hydro-thermal generation scheduling by a modified dynamic neighborhood learning based particle swarm optimization[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 67: 350-367.
- [17] IQBAL F, SIDDIQUI A S. Optimal configuration analysis for a campus micro-grid—a case study[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2: 12pp.  
DOI 10.1186/s41601-017-0055-z
- [18] CHEN J, WANG C, ZHAO B, et al. Economic operation optimization of a stand-alone micro-grid system considering characteristics of energy storage system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(20): 25-31.
- [19] 黄贵鸿, 雷霞, 芦杨, 等. 考虑用户满意度的电动汽车用户侧最优智能充放电策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(24): 40-47.  
HUANG Guihong, LEI Xia, LU Yang, et al. Optimus smart charge-discharge tactics in electric vehicle user profile considering user's satisfaction[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(24): 40-47.
- [20] 葛宇, 梁静, 王学平, 等. 求解函数优化问题的改进的人工蜂群算法[J]. *计算机科学*, 2013, 40(8): 252-256.  
GE Yu, LIANG Jing, WANG Xueping, et al. Improved artificial bee colony algorithm for solving function optimization problem[J]. *Computer Science*, 2013, 40(8): 252-256.
- [21] 王宝, 叶彬, 薛盘安, 等. 计及环境成本的电力系统负荷分配优化模型[J]. *陕西电力*, 2017, 45(1): 68-72, 81.  
WANG Bao, YE Bin, XUE Panan, et al. A load optimization model for power system considering environment cost[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2017, 45(1): 68-72, 81.
- [22] 陈勇刚, 黄梓瑜, 王虹, 等. 家用电动汽车充电管理系统研究[J]. *陕西电力*, 2017, 45(1): 46-50.  
CHEN Yonggang, HUANG Ziyu, WANG Hong, et al. Research on home electric vehicle charging management system[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2017, 45(1): 46-50.
- [23] 胡林献, 顾雅云, 姚友素. 并网型风光互补系统容量优化配置方法[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(3): 120-126.  
HU Linxian, GU Yayun, YAO Yousu. A capacity optimization and configuration method for compensation of wind and solar power[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(3): 120-126.
- [24] 田廓, 姚金雄, 李文辉. 面向清洁能源发电并网的低碳电力系统优化调度模型[J]. *陕西电力*, 2016, 44(1): 51-55.  
TIAN Kuo, YAO Jinxiong, LI Wenhui. Optimization scheduling model of low-carbon power system for grid-connected generation of clean energy[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2016, 44(1): 51-55.

收稿日期: 2017-05-10; 修回日期: 2017-09-07

作者简介:

马益平(1964—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 从事电力系统自动化、信息化研究、管理工作。E-mail: Myp2345@126.com

(编辑 周金梅)