

考虑电动汽车接入的风/光/水/储灵活性资源系统优化匹配研究

在分布式电源技术不断发展与电力系统灵活性要求不断提高的背景下,针对配电网侧典型的多元灵活性资源进行优化匹配研究。在传统的风/光/水/储优化配置的基础上,考虑了将电动汽车这一新型负荷接入。首先对各优化配置对象的模型进行了详尽阐述,然后建立了一套系统评价指标体系。基于该指标体系,以东部沿海某城市的风力发电场、光伏电站、水力发电站和电动汽车为例,采用多目标灰狼优化算法和熵权法对考虑了电动汽车接入的风/光/水/储多元灵活性资源系统进行优化匹配和评估分析。分析结果表明,最优配置方案下既可以实现可再生能源的有效利用,又可以满足负荷在各时间段的不同需求,且总投资也可大幅度减小。此外,电动汽车参与调度,不仅有利于综合系统的性能提升,同时可以实现车主增收的益处。

曲春辉 孙文文/中国电力科学研究院新能源与储能运行控制国家重点实验室
陶思钰 徐青山/东南大学电气工程学院 杨 博/国网辽宁省电力有限公司
经济技术研究院



曲春辉/高级工程师

关键词/Keywords

灵活性资源·
混合发电系统·
多目标灰狼优化算法·
熵权法·
优化匹配·

0 引言

随着分布式电源技术、微电网及电动汽车V2G技术的不断发展与成熟,越来越多的灵活性资源被接入了电网中,提高了电力系统的灵活性^[1]。同时,对于多元多尺度灵活性资源的优化配置,以及匹配度的综合评估方法亟需解决。灵活性资源广泛存在于电力系统“源—网—荷—储”的各个部分^[2],狭义的灵活性资源是指配电网侧的分布式电源,如风力发电机、光伏电站和小水电等,以及电动汽车和储能装置。本文仅针对狭

国家电网公司科技项目“适应分布式电源、微电网和多元负荷的配电网优化运营和规划关键技术研究”(NYB17201700114)

义的灵活性资源展开研究。

对于多灵活性资源发电系统,现有的研究大多集中针对风/光、风/水或风/光/储等两元或三元的灵活性资源的功率建模、优化仿真和评估等方面^[3-5],对于电动汽车的接入,也仅考虑了与单一部分式电源的匹配^[6-11]而较少考虑包括了风力发电场、光伏电站、水力发电站、储能系统和电动汽车等综合灵活性资源的匹配方案及优选策略。

本文首先对风/光/水/储及电动汽车的出力及充放电建立了数学模型;然后确定了该多目标优化问题的目标函数、约束条件以及优化算法,并介绍了在得到优化解集的基础上进行综合优选的策略。基于上述理论,结合我国东部某地区的实际算例,进行优化仿真研究,并对一日内电动汽车的充放电情况进行详细分析。

1 风/光/水/储/车模型

1.1 风力发电机出力模型

风力发电机的输出功率与风力发电机轮毂高度处风速的关系可以用多项式进行拟合。本文采用以下三次函数模型进行计算,即

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v \geq v_{co} \\ P_N \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_N^3 - v_{ci}^3} & v_{ci} \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{WT}(v)$ 为风机在轮毂高度处风速为 v 时的最大输出功率; P_N 为风机额定功

率； v 为折算成风机轮毂高度处的风速； v_N 为额定风速； v_{ci} 为切入风速； v_{co} 为切出风速。

1.2 光伏发电出力模型

光伏组件的稳态功率输出采用如下简化模型^[9]（标准测试条件下，太阳辐射强度为1 000 W/m²，电池温度为25 ℃）

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 + k(T_c - T_r)] \quad (2)$$

式中， P_{PV} 为光伏组件的实际输出功率，kW； G_{STC} 为标准测试条件下的太阳辐照强度，W/m²； P_{STC} 为标准测试条件下光伏电池组件的最大输出功率，kW； k 为功率温度系数，%/℃； T_c 为光伏电池温度； T_r 为参考温度； G_{ING} 为实际的太阳能辐照强度，W/m²。

光伏发电系统的出力在考虑光伏阵列出力的基础上，还需综合考虑变换器效率，最大功率跟踪控制效率及光伏阵列表面积尘等影响发电系统效率的因素。光伏发电系统在一段时间内的平均输出功率为

$$P_{V_{avipower}} = \eta_{loss} \eta_{mppt} \eta_{dust} P_{PV} \quad (3)$$

式中， η_{loss} 为DC/DC变换器效率； η_{mppt} 为最大功率跟踪控制效率； η_{dust} 为因表面积尘引起的光伏发电系统功率输出降额因子。

1.3 小水电发电功率模型

水力发电是把水的势能和动能转换为机械能，再将机械能转换为电能的发电方式。水利工程建筑物集中了天然水流的落差，形成水头，使上游水库中的水具有较高的势能，通过水轮机将能量转换为电能。

水轮机水头 H 是指水轮机进、出口断面的总单位流量差，其基本表达式为

$$H = (Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}) - (Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}) \quad (4)$$

式中， Z 为相对于基准面的单位位能； ρ 为水的密度； $p_1/\rho g$ 、 $p_2/\rho g$ 为单位压能； v_1 、 v_2 为过水断面平均流速； $v_1^2/2g$ 、 $v_2^2/2g$ 为单位动能； α_1 、 α_2 为考虑流

速沿断面分布不均的动能不均匀系数。

水轮机的额定出力为

$$P_{HD} = 9.81 \eta Q_d (H_d - \Delta H) \quad (5)$$

式中， H_d 为设计水头； ΔH 为水头损失； Q_d 为设计流量； η 为水轮机的效率； P_{HD} 为水轮机所输出的功率。

1.4 储能系统充放电模型

混合系统中蓄电池的能量是不断变化的。 t 时刻蓄电池的荷电量与前一时刻的荷电量和 $t-1$ 时刻到 t 时刻电量的供求状况有关。当可再生能源发电的总输出电量大于负载用电量时，蓄电池处于充电状态；反之，蓄电池处于放电状态。

蓄电池充电时， $P_{BAT}(t) < 0$ ，第 t 时刻的荷电量为

$$SOC(t) = SOC(t-1) - P_{BAT}(t) \eta_c - D_B Q_B^S \quad (6)$$

蓄电池放电时， $P_{BAT}(t) > 0$ ，第 t 时刻的荷电量为

$$SOC(t) = SOC(t-1) - P_{BAT}(t) / \eta_D - D_B Q_B^S \quad (7)$$

式中， $SOC(t)$ 为第 t 时刻蓄电池的剩余容量； $P_{BAT}(t)$ 为第 t 时刻蓄电池的充放电功率； η_c 、 η_D 分别为蓄电池充放电效率； D_B 为蓄电池每小时的自放电比例； Q_B^S 为蓄电池的总容量。

1.5 电动汽车调度模型

电动汽车作为一种移动式储能，近年来受到了广泛的关注和研究^[12-13]。

电动汽车在 t 时刻的荷电量与其在前一时刻的荷电量以及此时间段内的充放电情况有关。当电动汽车处于充电状态时，其在 t 时刻的荷电量为

$$EV(t) = EV(t-1) + \frac{t_{charge}}{\tau_{EV}} E_{max} \quad (8)$$

式中， $EV(t)$ 、 $EV(t-1)$ 分别为电动汽车在 t 时刻和 $t-1$ 时刻的荷电量； t_{charge} 为充电时间； τ_{EV} 为电动汽车完全充满所需的时间； E_{max} 为电动汽车的充电量上限。

当电动汽车处于放电状态时，其在 t 时刻的荷电量可表示为

$$EV(t) = EV(t-1) - \frac{t_{discharge}}{\eta_{conv}} P_{discharge} \quad (9)$$

式中, $t_{\text{discharge}}$ 为放电时间; $P_{\text{discharge}}$ 为放电功率; η_{conv} 为逆变效率。

电动汽车的调度需要考虑经济性, 即每一时间段的充放电价格。电动汽车的充放电价格如表1所示^[12]。

表1 电动汽车充放电价格

时段	充电价格 /元	放电价格 /元	时段	充电价格 /元	放电价格 /元
0:00~1:00	0.320	0.335	1:00~2:00	0.320	0.335
2:00~3:00	0.320	0.335	3:00~4:00	0.320	0.335
4:00~5:00	0.320	0.335	5:00~6:00	0.320	0.335
6:00~7:00	0.320	0.335	7:00~8:00	0.670	0.781
8:00~9:00	0.670	0.781	9:00~10:00	0.670	0.781
10:00~11:00	0.910	1.253	11:00~12:00	0.910	1.253
12:00~13:00	0.910	1.253	13:00~14:00	0.910	1.253
14:00~15:00	0.910	1.253	15:00~16:00	0.670	0.781
16:00~17:00	0.670	0.781	17:00~18:00	0.670	0.781
18:00~19:00	0.910	1.253	19:00~20:00	0.910	1.253
20:00~21:00	0.910	1.253	21:00~22:00	0.670	0.781
22:00~23:00	0.670	0.781	23:00~24:00	0.320	0.335

2 多目标优化匹配模型

2.1 多目标优化概述

多目标与单目标优化问题的本质区别在于解不唯一, 是一组由众多Pareto最优解组成的集合。相比于单目标优化, 多目标优化可以综合考虑各种指标的要求。

多目标优化问题可以归纳为如下模型, 即

$$\begin{aligned} \min F(X) &= \min(f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)) \\ \text{s.t. } X &\in \Omega \\ G(X) &= 0 \\ H(X) &\leq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, X 为优化变量; f_i 为第 i 个优化目标; Ω 为可行解空间; G 、 H 分别为等式约束和不等式约束所组成的集合。

2.2 目标函数

综合总成本最低为

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^N N_i(C_i + M_i) \quad (11)$$

式中, N 、 C_i 和 M_i 分别为风力发电机组、光伏发电系统、水电机组储能系统和电动汽车充电桩的个数、设备投资建设成本和维护费用的折现值。

失负荷概率最低为

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T [-S_{\text{LOLP}}(t)W(t)] / \sum_{t=1}^T Q_L(t) \quad (12)$$

式中, $W(t)$ 为某一时刻的能量不平衡量; $S_{\text{LOLP}}(t)$ 为布尔量, 当 $W(t) \geq 0$ 时, $S_{\text{LOLP}}(t)=0$, 当 $W(t) < 0$ 时, $S_{\text{LOLP}}(t)=1$; $Q_L(t)$ 为当前时刻负荷需求量; T 为仿真时长。

清洁能源浪费率最低为

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^T [S_{\text{LOEP}}(t)(W(t) - Q_B)] / [\gamma \sum_{t=1}^T Q_L(t)] \quad (13)$$

式中, $W(t)$ 为某一时刻的能量不平衡量; Q_B 为储能的可用容量; γ 为储能的充电效率; $S_{\text{LOLP}}(t)$ 为布尔量, 当 $W(t) \leq 0$ 时, $S_{\text{LOLP}}(t)=0$, 当 $W(t) > Q_B$ 时, $S_{\text{LOLP}}(t)=1$; $Q_L(t)$ 为当前时刻负荷需求量; T 为仿真时长。

2.3 约束条件

(1) 系统有功功率平衡

$$P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{HD}}(t) + P_{\text{BAT}}(t) + P_{\text{EV}}(t) = Q_L(t) \quad (14)$$

式中, $P_{\text{WT}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}(t)$ 、 $P_{\text{HD}}(t)$ 、 $P_{\text{BAT}}(t)$ 和 $P_{\text{EV}}(t)$ 分别为风力发电机、光伏电池、储能系统和电动汽车在仿真时刻 t 发出的实际功率; $P_{\text{BAT}}(t)$ 为正表示储能放电, 为负表示储能充电; $P_{\text{EV}}(t)$ 为正表示电动汽车放电, 为负表示电动汽车充电; $Q_L(t)$ 为时刻的负荷需求量。

灵活性资源发电量约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{WT}}(t) \leq P_{\text{WT}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{PV}}(t) \leq P_{\text{PV}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{HD}}(t) \leq P_{\text{HD}}^{\max} \\ P_{\text{BAT}}^{\min} \leq P_{\text{BAT}}(t) \leq P_{\text{BAT}}^{\max} \\ P_{\text{EV}}^{\min} \leq P_{\text{EV}}(t) \leq P_{\text{EV}}^{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中, $P_{\text{WT}}^{\max}$ 、 $P_{\text{PV}}^{\max}$ 和 $P_{\text{HD}}^{\max}$ 分别为风力发电机、光伏电池和水力发电机的出力上限; $P_{\text{EV}}^{\min}$ 、 $P_{\text{EV}}^{\max}$ 分别为储能的充放电电量上、下限; $P_{\text{BAT}}^{\min}$ 、 $P_{\text{BAT}}^{\max}$ 分别为电动汽车的充放电电量上、下限。

(3) 电池荷电量约束

$$\begin{cases} \text{SOC}^{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}^{\max} \\ \text{EV}^{\min} \leq \text{EV}(t) \leq \text{EV}^{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $\text{SOC}^{\min}$ 、 $\text{SOC}^{\max}$ 分别为储能荷电量的上、下限, $\text{EV}^{\min}$ 、 $\text{EV}^{\max}$ 分别为电动汽车电池电量的上、下限。

2.4 多目标优化算法

灰狼优化算法(Grey Wolf Optimization, GWO)是近年来由Seyedali Mirjalili等科学家提出的一种优化算法^[15-16]。该算法的基本思想是根据灰狼的种群机制以及捕食行为推演出的寻优算法。其优化求解的基本步骤如下^[17]。

(1) 种群等级分配

狼群遵从严格的等级制度, 其中适应度值最好的个体为 α 狼, 其次为 β 狼和 δ 狼, 其余个体为 ω 狼。在GWO算法中, 捕猎行为由 α 狼、 β 狼和 δ 狼领导, ω 狼负责跟随这三头狼以寻找到最优解。

(2) 包围猎物

灰狼在包围猎物时先确定自己与猎物之间的距离, 即

$$\begin{aligned} D &= |CX_p(t) - X(t)| \\ C &= 2r_1 \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $X_p(t)$ 为猎物位置; $X(t)$ 为灰狼位置; C 为摇摆系数; r_1 为 $[0,1]$ 之间的随机数。

然后, 灰狼根据自己与猎物之间的距离更新自身的位置, 即

$$\begin{aligned} X(t+1) &= X_p(t) - AD \\ A &= 2ar_2 - a \end{aligned} \quad (18)$$

(3) 捕获猎物

灰狼算法中灰狼并不知道猎物的具体位置, 为了捕捉到猎物, 由 α 狼、 β 狼和 δ 狼的位置信息来实现对猎物的定位。其数学表达式为

$$D_\alpha = |C_1 X_\alpha(t) - X(t)|, X_1 = X_\alpha - A_1 D_\alpha \quad (19)$$

$$D_\beta = |C_2 X_\beta(t) - X(t)|, X_2 = X_\beta - A_2 D_\beta \quad (20)$$

$$D_\delta = |C_3 X_\delta(t) - X(t)|, X_3 = X_\delta - A_3 D_\delta \quad (21)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (22)$$

多目标灰狼算法在灰狼算法的基础上加入了Pareto存档机制和 α 狼、 β 狼和 δ 狼选择机制。在算法的每个周期都会产生新的解, 利用Pareto存档来存放这些新解中的Pareto解, 规定存档的大小为 N , 当存入Pareto的解的个数超过 N 时, 则根据拥挤距离来进行裁剪。每 M 个距离个体 i 最近的解作为 i 的领域, 依次按照非支配关系选择 α 狼、 β 狼和 δ 狼, 若解互不支配, 再根据拥挤距离进行选择。

2.5 优选策略

熵权法^[18-19]是一种客观的赋权方法, 各指标的熵值可以表明它们所提供的信息量的大小, 因此可以根据熵值来决定各指标的权重。熵权法通过指标的熵值来赋予权重, 其可以突出数据的局部差异。在评价中, 对于某一项指标, 如果各样本在这项指标上的差异越大, 那么这项指标在方案评价中所起的作用就越大。否则, 各样本相同, 这项指标在方案评价中起的作用就很小。其计算步骤如下。

(1) 数据标准化

将各指标的数据样本进行标准化处理。假设给定了 K 个指标 $X_1, X_2, \dots, X_K$, 其中, $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}\}$, 即每个数据包含 n 个样本, 对数据进行标准化的公式为

$$Y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (23)$$

式中, Y_{ij} 为 i 指标的数据 j 标准化后的值。

(2) 求各指标的信息熵

计算各指标的信息熵。根据信息熵的定义, 一组数据 j 信息熵的计算公式为

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (24)$$

其中, $p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}}$ 。如果 $p_{ij}=0$, 则定义

$$\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln p_{ij} = 0。$$

(3) 确定各指标权重

根据信息熵的计算公式,可以得出各个指标的信息熵为 $E_1, E_2, \dots, E_k$,由信息熵计算各指标的权重的计算公式为

$$\omega_i = \frac{1 - E_i}{k - \sum E_i} (i=1, 2, \dots, k) \quad (25)$$

式中, ω_i 为指标 i 的权重; k 表示一共有 k 个指标。

据此原理,可得对于该多目标规划问题的综合评价指标CEI,即

$$CEI = \omega_1 \bar{f}_1 + \omega_2 \bar{f}_2 + \omega_3 \bar{f}_3 \quad (26)$$

式中, ω_1, ω_2 和 ω_3 为根据熵权法计算所得的赋权系数,满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$; $\bar{f}_1, \bar{f}_2$ 和 $\bar{f}_3$ 为各目标函数的归一化值。

由计算得到综合评价指标值CEI,最后根据各预选方案的综合评价指标值CEI按从小到大进行排序,排序靠前的方案为电源配置建议方案。

3 算例分析

3.1 仿真背景

本文选取我国东部沿海某地区三年的风、光、水以及负荷平均值作为典型年的数值进行分析。

1) 在典型年中风能、太阳能、水资源分布情况及负荷曲线如图1所示。

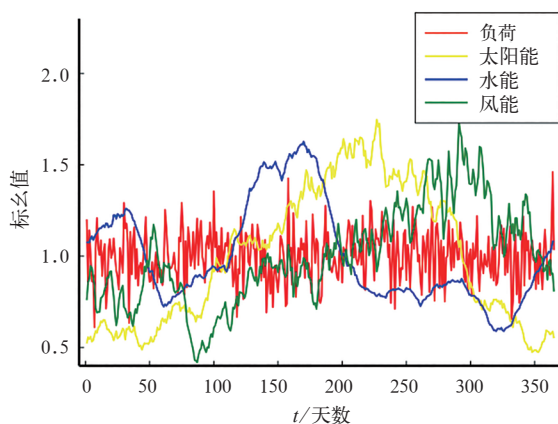


图1 东部沿海某地区典型年风能、太阳能、水能及负荷曲线

2) 混合系统中各灵活性资源的参数如表2~表5所示。

表2 光伏电池型号参数

型号	额定功率/kW	寿命/年	成本/元	运维费用/元·年
PV1	0.315	20	900	10
PV2	0.260	20	780	8
PV3	0.195	20	550	5
PV4	1	20	3 000	20

表3 水轮机型号参数

型号	额定功率/kW	寿命/年	成本/元	运维费用/元·年
H1	6	25	3 000	80
H2	20	25	25 000	250
H3	16.5	25	50 000	1 000
H4	180	25	110 000	11 000

表4 蓄电池型号参数

型号	额定功率/kW	寿命/年	成本/元	运维费用/元·年	额定容量/kW·h	循环效率(%)
B1	10	20	15 000	900	20	64
B2	15	20	50 000	4 500	60	64
B3	20	20	80 000	5 000	100	64
B4	10	20	5 300	430	4	80
B5	8	20	3 000	300	2.5	90

表5 风机型号参数

型号	额定功率/kW	寿命/年	成本/元	运维费用/元·年	切入风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	额定风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
WT1	1	20	7 200	180	3.5	12	25
WT2	3	20	10 500	200	3.5	11.5	23
WT3	8.1	20	29 000	400	3.0	13	25

3) 该地区可调度的电动汽车共有50辆,每小时充电功率上限为15 kW,放电功率上限为30 kW,即 $P_{\text{EV}}^{\min} = -15 \text{ kW}$, $P_{\text{EV}}^{\max} = 30 \text{ kW}$ 。

3.2 仿真结果

本文采用MOGWO算法求解上述多目标优化问题。狼群大小设置为100,存档大小设置为50,迭代次数设置为50,领域大小设置为8。

经过仿真优化得到Pareto解集。根据式(25)所述的熵权法求得目标函数 f_1, f_2 和 f_3 的权重系数 $\omega_1=0.7, \omega_2=0.1, \omega_3=0.2$,利用式(23)对其进行归一化处理,并由式(26)计算得到各方案的综合评价指标。根据综合评价指标对候选方案进行升序排序,表6为排序前10的方案。

综合考虑各指标因素,最终选择表6中排序第一的方案,对各灵活性资源进行优化配置,此即最优配置方案。

选取LOEP和LOLP分别作为优化目标,分别采用MOPSO和MOGWO算法进行优化求解,得

表6 根据综合评价指标CEI排序结果

方案 编号	风机 型号	数量	光伏 型号	数量	储能 型号	数量	水轮机 型号	数量	LOEP (%)	LOLP (%)	NPC/元
1	2	1	3	12	1	9	1	2	109.4	0.0000	281 457
2	2	1	2	9	1	9	1	2	109.4	0.0000	282 040
3	2	1	3	15	1	9	1	2	109.4	0.0000	283 311
4	2	1	3	18	1	9	1	2	109.4	0.0000	285 165
5	2	1	3	12	1	6	1	2	109.7	0.063 7	254 906
6	2	1	2	9	1	6	1	2	109.7	0.063 7	255 490
7	2	1	3	15	1	6	1	2	109.7	0.063 7	256 760
8	2	1	3	18	1	6	1	2	109.7	0.063 7	258 614
9	1	2	3	12	1	6	1	1	38.3	0.171 9	262 545
10	1	2	2	9	1	6	1	1	38.3	0.171 9	263 128

到的Pareto前沿分别如图2所示。由图2可知，由MOGWO所求得的Pareto前沿更接近于真实情况，且其分布更具均匀性，故采用MOGWO算法求解该优化配置问题相较于其他算法具有一定的优越性。

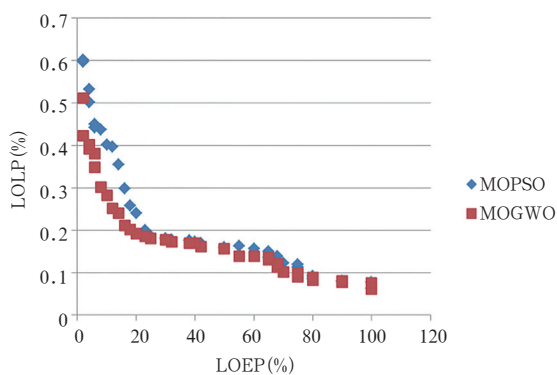


图2 采用不同算法的Pareto前沿对比图

改变灵活性资源发电量与负荷电量的比例 Y ，在不同灵活性资源发电组成所对应的储能配置比例如图3所示。

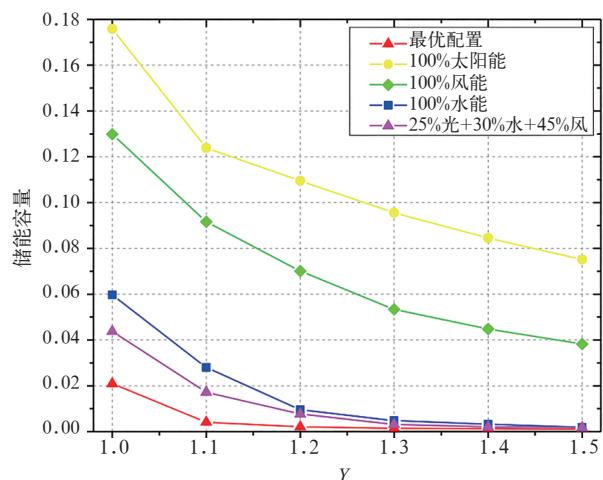


图3 不同灵活性资源发电组成所对应的储能配置比例

由图3可知，所需配置的储能容量随着新能源发电比的增加而减小。分析可知，配置更多的新能源发电设备在减小储能装置容量的同时也使得新能源配置发电成本增加，同时会舍弃多发且无法存储的新能源，从而造成浪费。在相同的新能源发电比下，通过优化各种新能源配置比例可以实现储能配置容量的大幅降低。而单一使用风、光和小水电等新能源作为新能源发电设备为满足供电可靠性，所需配置的储能容量相对较大。这不仅增加了储能容量的配置成本，也增加了新能源发电设备的投资成本与多发出新能源的浪费。由此可见，本文所求得的优化配置方案将能很好地实现新能源发电配比优化，从而使得储能装置容量配比最小化。

对于最优配置方案，随机选取其中某一天的运行工况，电动汽车24 h的充放电情况如图4所示。

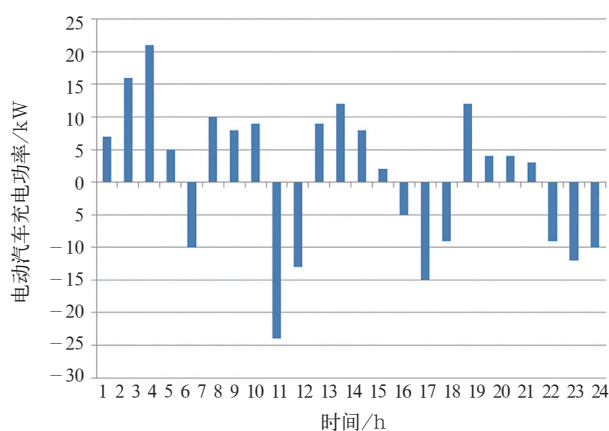


图4 最优配置方案下电动汽车一天的充放电功率

由图4可知，电动汽车的放电时间段主要分布在9:00~10:00、16:00~17:00和22:00~24:00三个时间段。电动汽车充放电情况主要受电动汽车的充放电电价、电网负荷情况以及混合能源系统中其他微电源的出力情况所影响。一般情况下，一天中负荷在9:00~11:00、14:00~17:00以及20:00~22:00较高。参考表1可知，电动汽车V2G的放电价格在上述时间段内较高。此外，由于夜间由于缺乏光照，光伏发电出力几乎为零，所以电动汽车在22:00~24:00放电量较多。而在0:00~7:00时间段内，由于电网负荷不高且电动汽车充电价格较低，故电动汽车充电功率较大。综上可知，

电动汽车作为一种灵活的移动式储能的接入,对于减轻储能压力、电网削峰填谷以及使车主增收具有其独特的优势。

4 结束语

在对各灵活性资源进行详细分析的基础上建立了关于风/光/水/储/车的多元灵活性资源系统多目标优化模型,并进行求解和优选。该模型弥补了传统混合能源优化考虑不全面的问题。经过对比分析,所求得优化配置方案能很好地实现新能源发电配比优化从而使得储能装置容量配比最小化。此外,电动汽车的接入对于改善多元灵活性资源系统的性能,弥补传统储能的不足以及减少系统的经济投资等方面具有显著优势。

参考文献

- [1] 肖定焱,王承民,曾平良,等.考虑短时灵活性需求及资源调用成本的灵活性资源优化调度[J].华东电力,2014,42(5):809-815.
- [2] 肖定焱.含大规模可再生能源的电力系统灵活性评价指标及优化研究[D].上海:上海交通大学,2015.
- [3] 夏永洪,吴虹剑,辛建波,等.考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J].电力自动化设备,2017,37(7):63-69.
- [4] Monforti F, Huld T, Bodis K, et al. Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy: a monte carlo approach[J]. Renewable Energy, 2014, 63(1): 576-586.
- [5] 叶林,屈晓旭,么艳香,等.风光水多能互补发电系统日内时间尺度运行特性分析[J].电力系统自动化,2018,42(4):158-164.
- [6] 孙波,董浩,樊亚南,等.多情形下电动汽车与分布式光伏协同优化调度算法[J].电力建设,2017,38(10):99-107.
- [7] 王璟,王利利,郭勇,等.计及电动汽车的微电网经济调度方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(17):111-117.
- [8] 茆美琴,孙树娟,苏建徽.包含电动汽车的风-光-储微电网经济性分析[J].电力系统自动化,2011,35(14):30-35.
- [9] 谈丽娟,赵彩虹,陈子奇,等.电动汽车与分布式电源的微网经济调度[J].电网与清洁能源,2015,31(4):100-105.
- [10] 魏大钧,张承慧,孙波,等.基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J].电网技术,2014,38(11):2972-2977.
- [11] Gavanidou E, Bakirtzis A G. Design of a stand alone system with renewable energy sources using trade off methods[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1992, 7(1): 42-48.
- [12] Liu C H, Chau K T, Wu D, et al. Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle and vehicle-to-grid technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(11): 2409-2427.
- [13] Niklas R, Marija I. Optimal charge control of plug-in hybrid electric vehicles in deregulated electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1021-1029.
- [14] 吴新华,赵兴勇,贾燕冰,等.计及电动汽车的并网运行微电网容量优化配置[J].电气自动化,2018,40(1):36-39.
- [15] 李星,杨秀媛,王丽婕.灰狼算法在风电水电协同运行中的应用[J].发电技术,2018,39(1):43-48.
- [16] 牛家彬,王辉.一种基于混合策略的灰狼优化算法[J].齐齐哈尔大学学报:自然科学版,2018,34(1):16-19,32.
- [17] 毛森茂,瞿凯平,陈艺璇,等.基于灰狼多目标算法的电网碳-能复合流优化调度[J].新型工业化,2016,6(9):11-17.
- [18] 贾正源,赵亮.基于熵权未知测度模型的电能质量综合评价[J].电力系统保护与控制,2010,38(15):33-37.
- [19] 欧阳森,石怡理.改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J].电力系统自动化,2013,37(21):156-164.

(收稿日期:2018-06-28)EA