

含风电及电动汽车的多目标电力系统调度

朱永胜, 乔百豪, 瞿博阳, 闫 李, 杨 璐, 李 超

(中原工学院电子信息学院, 郑州 450007)

摘 要: 为应对风电的迅速发展及电动汽车的规模化应用给电力系统调度带来的新挑战,在风电的威布尔随机描述及电动汽车分层调度策略的基础上,以污染排放最低及燃料费用最小为优化目标,构建含风电及电动汽车的电力系统多目标动态环境经济调度模型。该模型综合考虑系统功率平衡、系统网损、旋转备用、车主出行需求、电池特性等约束以及车网能量互动行为。同时,提出改进的基于非支配排序的多目标差分进化求解算法,并针对模型特点以及多重约束条件,提出决策变量行列转换方法和基于动态调整的约束处理策略。最后,以6机组系统并结合4种场景进行研究,通过对新能源接入的动态调度管理,验证所提模型的合理性及算法的正确性。

关键词: 电力系统调度; 风力发电; 电动汽车; 差分进化算法; 多目标优化

中图分类号: TM73

文献标识码: A

0 引 言

随着环境的日益恶化,保护环境、节约资源、减少污染排放已成为人类的共识。目前大多数火电厂仍使用煤炭、石油和天然气等不可再生燃料,其产生的硫化物(SO_x)、氮氧化物(NO_x)和碳氧化物(CO_2)等污染物,是空气污染的主要来源^[1,2]。因此电力系统调度中降低污染排放、减少燃料费用已成为一个研究热点^[3-5]。同时,随着以风电为代表的清洁能源的迅速发展,其并网将会大大缓解传统发电系统给环境带来的不利影响。

此外,有研究表明,到2020年、2030年和2050年美国电动汽车将分别达到35%、51%和62%^[6]。中国电动汽车在2020年的销量也将达到500万辆^[7]。未来如此多的电动汽车在给电网负荷带来负担的同时,其充电行为又具有一定的随机性。

传统的环境经济调度(environmental economic dispatch, EED)是以降低发电机组污染排放及燃料费用为目标,未考虑风电的并网及电动汽车的规模化应用带来的影响。因此,针对风电及电动汽车与电网的协同调度研究显得尤为重要。

文献[8]为应对电动汽车无序充放电给电网安

全与经济运行带来的问题,提出基于双层优化的电动汽车充放电调度策略。文献[9~11]建立含电动汽车的电力系统动态EED模型,同时考虑用户需求等约束条件,实现对电动汽车充放电有效管理。文献[12]中基于机会约束规划建立了含风电的EED调度模型,并给出随机模型确定化转换方法。文献[13]考虑碳排放配额及风电并网对电网发电成本的影响,建立含风电的日前调度模型。而文献[14]在对风电功率波动分析的基础上,预测次日风电功率和负荷,安排发电机组的发电调度计划。

然而,针对含风电及电动汽车电力系统EED问题,尤其是动态环境经济调度问题(dynamic environmental economic dispatch, DEED)研究相对较少。文献[15]考虑电动汽车充电行为,建立风电协同调度模型。文献[16]以系统总成本期望最小为目标,建立电动汽车和风电协同调度单目标经济调度模型。文献[17]中虽然考虑了污染排放目标但只是作为众多调度目标之一,并未做深入分析,也未考虑系统的网损及旋转备用约束。

本文建立含风电及电动汽车的电力系统DEED模型,并以污染排放最少及燃料费用最低为目标函

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61673404; 61473266; 61873292); 河南省科技攻关项目(182102210128); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2018GGJS104)

通信作者: 瞿博阳(1984—), 男, 博士、教授, 主要从事智能计算, 新能源优化调度等方面的研究。qby1984@hotmail.com

数,在满足常规机组约束、系统网损、旋转备用需求及机组爬坡约束外,计及风电的随机性及电动汽车V2G(vehicle to grid)能量互动技术、用户使用需求、电池特性等因素。提出采用改进的基于非支配排序的多目标差分进化算法(improve based on non-domination sorting multi-objective differential evolution, INSMODE),并与多目标粒子群(MOPSO)算法和带精英策略的非支配排序的遗传算法(NSGA-II)进行对比分析。最后,以6机组系统结合4种调度场景,验证所提模型合理性及算法的有效性。

1 模型建立

1.1 目标函数

含风电及电动汽车的电力系统 DEED 目标是要求火力发电机组燃料成本最低和污染排放最少。风能作为一种清洁能源,其本身无需消耗燃料,对环境的污染也较少。而电动汽车成本是用户一次性投入,对于电网侧的经济而言是可忽略的,其电池作为一种储能装置,在电力系统对环境的影响也非常小。因此,本文忽略二者在目标函数中的影响,只作为约束条件考虑。

燃料费用采用如式(1)所示的二次函数表示^[10]:

$$F_C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2) \quad (1)$$

式中, F_C ——调度周期内的总燃料成本; T ——调度周期; N ——发电机组的数量; $P_{i,t}$ ——机组 i 在 t 时刻的有功出力; a_i 、 b_i 、 c_i ——机组 i 的燃料费用系数。

污染排放采用如式(2)所示函数表示:

$$E_M = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [(\alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i P_{i,t}^2 + \zeta_i \exp(\varphi_i P_{i,t}))] \quad (2)$$

式中, E_M ——系统在调度周期内总的污染排放; α_i 、 β_i 、 γ_i 、 ζ_i 和 φ_i ——机组 i 的污染排放系数。

1.2 约束条件

风力发电与风速是密切相关的,而风速具有随机性和间歇性特点。本文采用威布尔概率分布函数描述风速特性^[11]。其累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)和概率密度函数(probability destiny function, PDF)分布为:

$$\begin{aligned} F(v) &= 1 - \exp[-(v/c)^k] \\ f(v) &= (k/c)(v/c)^{k-1} \exp[-(v/c)^k] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $F(v)$ 、 $f(v)$ ——风速 v 在任意时间间隔的 CDF 和 PDF; c ——尺度系数; k ——形状系数。

在风速 v 一定的情况下,风力发电机组输出功率 P_w 可表示为:

$$P_w = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ 或 } v \geq v_{out} \\ P_{rate} \frac{v - v_{in}}{v_{rate} - v_{in}}, & v_{in} \leq v < v_{rate} \\ P_{rate}, & v_{rate} \leq v < v_{out} \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_{rate} ——风电额定出力; v_{in} 、 v_{out} ——切入、切出风速; v_{rate} ——额定风速。

由式(3)可得 P_w 的 CDF 表达式如式(5)所示:

$$F(P_w) = \begin{cases} 0, & P_w < 0 \\ 1 - \exp\left\{-\left[\left(1 + \frac{v_{rate} - v_{in}}{v_{in} P_{rate}} P_w\right) \frac{v_{in}}{c}\right]^k\right\} + \exp\left[-\left(\frac{v_{out}}{c}\right)^k\right], & 0 \leq P_w < P_{rate} \\ 1, & P_w \geq P_{rate} \end{cases} \quad (5)$$

1) 功率平衡约束

机组总出力和风电及电动汽车充、放电必须满足总的负载要求,且存在一定的置信水平,如式(6)所示:

$$P\left\{\sum_{t=1}^N P_{i,t} + P_{Dch,t} + P_w \geq P_{D,t} + P_{L,t} + P_{ch,t}\right\} \geq \eta_1 \quad (6)$$

式中, $P_{ch,t}$ 、 $P_{Dch,t}$ —— t 时刻电动汽车充放电功率; $P_{D,t}$ —— t 时刻负荷需求; η_1 ——置信水平; $P_{L,t}$ —— t 时刻系统传输损耗可采用 B 系数的方法求出^[18]。

将式(5)中的 P_w 代入式(6)可得:

$$P\left\{P_w < P_{D,t} + P_{L,t} + P_{ch,t} - \sum_{t=1}^N P_{i,t} - P_{Dch,t}\right\} = \quad (7)$$

$$F(P_{D,t} + P_{L,t} + P_{ch,t} - \sum_{t=1}^N P_{i,t} - P_{Dch,t}) \leq 1 - \eta_1$$

风电场的输出功率受风速和风向变化的影响。假设风电场具有相同的风速和风向,结合式(5)和式(7)功率平衡约束可表示为:

$$\begin{aligned} P_{D,t} + P_{L,t} + P_{ch,t} - \sum_{t=1}^N P_{i,t} - P_{Dch,t} &\leq \\ \frac{c P_{rate}}{v_{rate} - v_{in}} \left[\ln \left[\eta_1 + \exp \left(-\frac{v_{out}^k}{c^k} \right) \right] \right]^{1/k} &- \frac{v_{in} P_{rate}}{v_{rate} - v_{in}} \end{aligned} \quad (8)$$

2) 电动汽车约束

在 t 时刻电池剩余电量 S_t 应满足式(9):

$$S_t = S_{t-1} + \lambda_c P_{ch,t} - \frac{1}{\lambda_D} P_{Dch,t} - \Delta P_s L \quad (9)$$

式中, λ_c 、 λ_D ——充放电效率; ΔP_s ——单位距离的平均耗电量; L ——行驶的距离。

同时为保证电动汽车运行安全及电池的使用寿命, S_t 应满足不等式:

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (10)$$

式中, S_{\min} 、 S_{\max} ——电池电量的上下限。

电动汽车最基本的功能是满足用户的使用需求, 因此在一个调度周期内电动汽车行驶过程中总耗电量需满足式(11):

$$\sum_{t=1}^T (\Delta P_s L) = \sum_{t=1}^T \lambda_c P_{ch,t} - \sum_{t=1}^T \frac{1}{\lambda_D} P_{Dch,t} \quad (11)$$

车网互动的充电、放电功率还要满足不等式(12):

$$\begin{cases} P_{ch,t} \leq P_{RCh} \\ P_{Dch,t} \leq P_{RDch} \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_{RCh} 、 P_{RDch} ——额定充放电功率。

3) 机组爬坡约束

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} - U_{Ri} \Delta t \leq 0 \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} - D_{Ri} \Delta t \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, U_{Ri} 、 D_{Ri} ——机组的上下爬坡速率。

4) 出力约束

常规发电机组及风力发电机组出力应满足不等式(14):

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \\ 0 \leq P_w \leq P_{rate} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $P_{i,t}^{\max}$ 、 $P_{i,t}^{\min}$ ——机组 i 在 t 时刻最大和最小出力。

5) 旋转备用约束

正负旋转备用约束由下列不等式表示:

$$P \left\{ \left[\sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{\max} - P_{i,t}) + P_{Dch,t} \right] \geq \omega_u P_w + P_{ch,t} + R_t \right\} \geq \eta_2 \quad (15)$$

$$P \left\{ \left[\sum_{i=1}^N (P_{i,t} - P_{i,t}^{\min}) + P_{Dch,t} \right] \geq \omega_d (P_{rate} - P_w) + P_{ch,t} \right\} \geq \eta_3 \quad (16)$$

式中, ω_u 、 ω_d ——风电出力正负备用需求系数; η_2 、 η_3 ——置信水平; R_t —— t 时刻系统旋转备用容量需求。

与式(6)一样, 式(15)和式(16)可转化为式(17)

和式(18)表示:

$$\frac{1}{\omega_u} \left[\sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{\max} - P_{i,t}) + P_{Dch,t} - P_{ch,t} - P_t \right] \geq \frac{c P_{rate}}{v_{rate} - v_{in}} \left| \ln \left[1 - \eta_2 + \exp \left(- \frac{v_{out}^k}{c^k} \right) \right] \right|^{1/k} - \frac{v_{in} P_{rate}}{v_{rate} - v_{in}} \quad (17)$$

$$P_{rate} - \frac{1}{\omega_d} \left[\sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{\max} - P_{i,t}) + P_{Dch,t} - P_{ch,t} \right] \leq \frac{c P_{rate}}{v_{rate} - v_{in}} \left| \ln \left[\eta_3 + \exp \left(- \frac{v_{out}^k}{c^k} \right) \right] \right|^{1/k} - \frac{v_{in} P_{rate}}{v_{rate} - v_{in}} \quad (18)$$

2 求解算法及改进

本文提出基于改进的非支配排序的多目标差分进化算法求解 DEED 问题。差分进化(differential evolution, DE)算法是一种快速高效的全局优化算法, 但基本的 DE 算法随着迭代次数的增加, 将会使种群的多样性减少, 导致过早进入局部最优。因此为了维持种群的多样性和预防早熟, 在 DE 算法中加入非支配排序策略。并针对模型多目标、高维度、多约束的特点。对非支配排序的差分进化(NSMODE)算法进行改进, 使求解精度和速度更加准确和快速。NSMODE 具体求解步骤如下:

1) 设置种群 N_p 及迭代次数 F_{ES} , 确定 DE 算法中交叉、变异及选择参数;

2) 初始化种群并计算其适应度函数值, 迭代次数 $g_{en} = 0$;

3) 进行差分操作, 生成子代种群并计算其适应度函数值;

4) 将子代种群与父代种群一起进行非支配排序, 生成新的种群 rep 。如果生成的 rep 的数目大于 N_p , 计算其拥挤度距离, 产生新的等于 N_p 的 $frep$ 种群。否则, $frep = rep$;

5) 停止判断, 如果 $g_{en} = F_{ES}$, 则停止迭代计算, 输出结果。否则, $g_{en} = g_{en} + 1$, 并将步骤 4) 中的种群作为新的父代种群, 转步骤 2);

由于调度模型具有高维度、多时段及强约束等特点, 为了更好的求解问题, 针对决策变量(种群)维度及约束条件的处理进行改进。

2.1 种群设置

本文中决策变量为各调度时段的机组出力及电动汽车的充放电功率, 种群 x 由式(19)表示:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{N_p}]^T \quad (19)$$

其中, 个体 \mathbf{x}_i 为一个调度方案, 为便于进行 DE 操作, \mathbf{x}_i 作如下设置:

$$\mathbf{x}_i = [P_{1,1} P_{1,2} \dots P_{1,T}; P_{2,1} P_{2,2} \dots P_{2,T}; \dots; P_{N,1} P_{N,2} \dots P_{N,T}; P_{V,1} P_{V,2} \dots P_{V,T}] \quad (20)$$

式中, $P_{V,t}$ —— t 时段电动汽车充放电功率, 充电时等于 $P_{Ch,t}$; 放电时等于 $P_{Dch,t}$ 。

每个种群共有 $(N+1) \times T$ 个决策变量。当进行适应度值计算时将个体 \mathbf{x}^i 作行列转换以便对决策变量进行调整, 如式(21)所示:

$$\mathbf{x}^i = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,T} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,1} & P_{N,2} & \dots & P_{N,T} \\ P_{V,1} & P_{V,2} & \dots & P_{V,T} \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.2 约束处理

模型中含有多个等式及不等式约束, 因此对复杂约束条件的处理是解决该调度模型的关键。本文采用惩罚函数法, 将目标函数与约束条件结合, 建立一个无约束的增广目标函数进行优化求解。但对于车主使用需求的等式约束, 将其直接加入到增广目标函数中有一定困难。另外, 由于功率平衡不等式约束中决策变量维度很高, 如将直接进行惩罚又会使得惩罚量过大, 导致求解速度下降。因此, 本文设计一种基于决策变量动态调整的约束处理方法。

1) 首先对于电动汽车使用需求约束, 根据式(11)调整不同时段的电动汽车充或放电功率以满足电量平衡。

2) 在 1) 中得到充放电功率的基础上, 根据式(8)按照各个时段的机组出力依次对其进行调整, 确保系统的功率平衡。

2.2.1 以上约束处理方法具体的操作如下:

1) 首先计算式(11)和式(8)的约束违反量 P_{en} , 如果 P_{en} 小于等于设定的阈值 ε , 或调整次数 L 达到设定的最大次数, 则转 3), 否则执行 2)。

2) 将 P_{en}/n (功率平衡约束时 n 为机组数, 电动汽车使用需求约束时 n 为时段数) 叠加到决策变量上, 并根据变量的处理范围, 对其进行越界处理。

3) 如果是车主使用需求中电动汽车充放电功率, 结束调整; 如果是功率平衡约束中机组出力, 等所有时段都调整完成后结束。

2.2.2 对于调度模型中其他约束, 进行分类处理, 步骤如下:

1) 将机组出力、爬坡约束及电动汽车充放电功率约束加入到以上动态调整中的越界处理之中。

2) 在以上动态调整过程达到最大调整次数后, 若仍是不可行解, 则将这些解得约束违反量, 及电池剩余电量约束违反量和旋转备用约束违反量, 一同作为总的约束违反量。

3) 最后在决策变量的交叉、变异、选择的基础上, 利用基于惩罚函数的动态调整约束处理方法, 实现优化计算过程中对不可行解有效处理。算法的求解流程如图 1 所示。

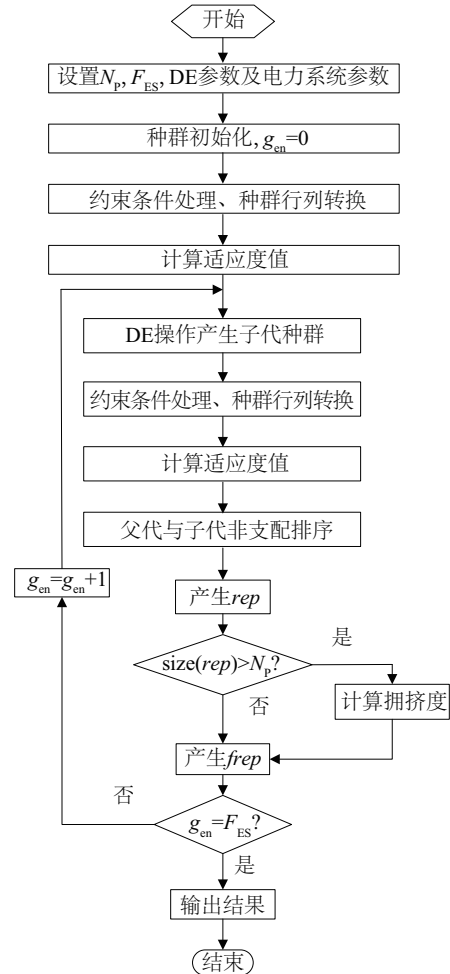


图1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of algorithm

3 算例仿真与分析

3.1 系统描述

本文以 6 机组系统为调度研究对象, 系统内含

有一个大型风电场和 5000 辆电动汽车,调度周期为 24 h。发电机组的参数及系统负荷参数见文献[18],风电场的额定发电功率为 1.0 pu(基准值为 100 MVA),风力发电机的参数见表 1。其中置信度水平 η_1 、 η_2 和 η_3 分别取 0.8、0.9 和 0.9。电动汽车容量为 21.6 kWh,行驶耗电量为 0.139 kWh/km,充放电效率为 0.75^[19](以 Toyota RAV4 为例),将每天早上离家出行的荷电状态设为 100%,并且将在上下班途中共 50 km 的时间定为在 07:00~08:00 及 17:00~18:00,其他时间均可参与电力系统调度。荷电状态限制及额定充放电功率限制均设为额定值的 20%, R_t 为 t 时段负荷值的 10%。

表 1 风力发电机参数

Table 1 Parameters of wind turbine						
$v_{in}/m \cdot s^{-1}$	$v_{out}/m \cdot s^{-1}$	$v_{rate}/m \cdot s^{-1}$	ω_u	ω_d	c	k
5	45	15	0.2	0.3	17	2.0

3.2 方法验证

为验证 INSMODE 求解结果的正确性,同时利用 MOPSO 和 NSGA-II 算法求解该模型。所有算法的种群规模及迭代次数均设为 100 和 5000, ε 、 L 分别取 10^{-6} 、10,惩罚系数设为 100,INSMODE 中控参数 F 和 CR 分别取 0.5 和 0.1,DE 策略为 DE/rand/1。MOPSO 中学习因子均取 2.05,惯性权重取 0.729^[20]。NSGA-II 中交叉和变异概率分别取 0.9 和 0.2,其分布指数取 20^[11]。3 种算法都采用本文的种群和约束处理方法。其得到的 Pareto 最优前沿分布和最优解分别如图 2 和表 2 所示。

由图 2 可见,由于本文中调度问题的复杂性,MOPSO 所得到的可行解非常少,同时 NSGA-II 也仅仅得到局部最优解。2 种算法均不能获得完整的

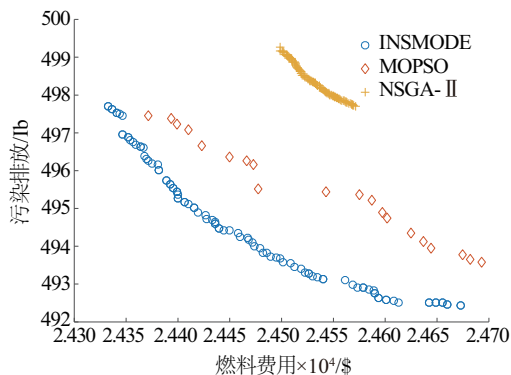


图 2 Pareto 最优前沿比较
Fig. 2 Comparison of Pareto optimal fronts

表 2 3 种算法的极端解和最优折中解比较

Table 2 Comparison of extreme solutions and optimal compromise solutions of three algorithms			
算法	目标	污染排放/lb	燃料费用/\$
INSMODE	经济最优	497.46	2.4333×10^4
	环境最优	492.43	2.4673×10^4
	最优折中解	494.46	2.4440×10^4
MOPSO	经济最优	497.45	2.4371×10^4
	环境最优	493.59	2.4693×10^4
	最优折中解	495.51	2.4477×10^4
NSGA-II	经济最优	499.26	2.4499×10^4
	环境最优	497.71	2.4571×10^4
	最优折中解	498.53	2.4520×10^4

Pareto 前沿。相比而言,本文的 INSMODE 算法得到的 Pareto 最优前分布更均匀,范围更广。且由图 3 和图 4 目标函数收敛情况可看出 INSMODE 的收敛速度最快,而且 MOPSO 过早收敛于某一值。因此所提算法在各方面均优于 MOPSO 和 NSGA-II。

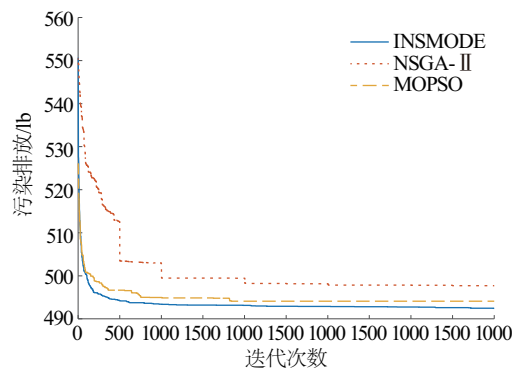


图 3 污染排放目标收敛曲线
Fig. 3 Curve of pollutant emission objective

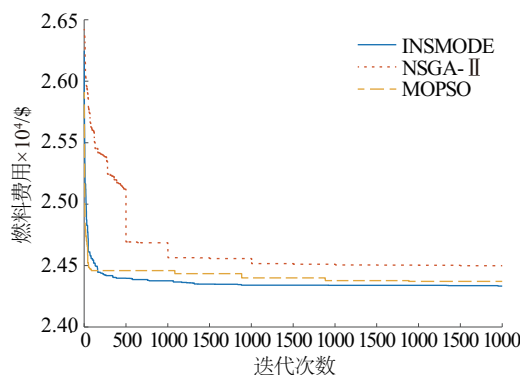


图 4 燃料费用目标收敛曲线
Fig. 4 Curve of fuels cost objective

同时由表 2 可知, INSMODE 得到的极端解中经济最优中的燃料费用分别比 MOPSO 和 NSGA-II 减少了 0.0038×10^4 和 0.0166×10^4 \$, 环境最优中污染排放分别降低 1.16 和 5.28 lb。其最优折中解中燃料费用分别减少 0.0037×10^4 和 0.008×10^4 \$, 污染排放分别降低 1.05 和 4.07 lb。

由此可知 MOPSO 和 NSGA-II 得到的极端解明显劣于 INSMODE 得到的。因此, 本文算法能为环

境保护和经济效益目标得到更佳的调度方案, 提供更为详细的调度信息, 充分显示该算法在求解 DEED 问题上的优越性。

表 3 给出了 INSMODE 最佳折中解中每个时段机组出力、电动汽车充放电功率及网损情况。各机组及电动汽车和风电承担的功率如图 5 所示, 可看出此调度组合满足功率平衡约束。

表 3 INSMODE 的最佳折中解

Table 3 Optimal compromise solutions of INSMODE

时段	常规发电机组出力/pu						风电/ pu	V2G 功率/pu	网损/ pu	负荷/ pu
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6				
1	0.3440	0.4439	0.5873	0.6993	0.4728	0.5302	0.301	0.0907	0.0332	3.25
2	0.3613	0.5730	0.7318	0.7163	0.6548	0.6194	0.301	0.0140	0.0435	3.90
3	0.4054	0.5358	0.6091	0.6916	0.6831	0.5274	0.301	0.2105	0.0429	3.50
4	0.3670	0.4132	0.5607	0.5413	0.5590	0.4257	0.301	0.1378	0.0302	3.00
5	0.4083	0.4165	0.5767	0.6505	0.6550	0.5071	0.301	0.1267	0.0384	3.35
6	0.4538	0.6082	0.6969	0.8031	0.6235	0.6384	0.301	0.0710	0.0540	4.00
7	0.4516	0.6508	0.8446	0.9484	0.8826	0.7374	0.301	—	0.0663	4.75
8	0.5411	0.6795	0.8669	1.0395	0.9499	0.7232	0.301	-0.0283	0.0795	5.05
9	0.6142	0.7181	0.9136	1.1556	1.0213	0.8199	0.301	-0.0047	0.0983	5.45
10	0.6913	0.6799	0.9831	0.8903	0.9083	0.8500	0.301	0.0046	0.0992	5.20
11	0.5521	0.8352	1.0123	1.0606	0.9841	0.8506	0.301	0.0020	0.0939	5.50
12	0.6816	0.7932	1.0440	0.9636	1.0475	1.0397	0.301	0.0055	0.1151	5.75
13	0.5278	0.7214	0.8906	1.1229	0.8936	0.8363	0.301	-0.0419	0.0855	5.25
14	0.5527	0.7372	0.8430	0.9751	1.0272	0.7659	0.301	-0.0327	0.0848	5.15
15	0.5467	0.6085	0.7912	0.8808	0.9058	0.7885	0.301	-0.0027	0.0751	4.75
16	0.7014	0.8168	0.9274	0.9095	1.0012	0.7436	0.301	-0.0030	0.1039	5.30
17	0.5620	0.7294	1.0170	0.9950	0.8795	0.7483	0.301	—	0.0821	5.15
18	0.6391	0.7971	1.0458	1.2629	1.0207	0.7656	0.301	-0.0236	0.1057	5.75
19	0.6217	0.7006	0.9160	1.0474	0.8816	0.8778	0.301	0.0012	0.0948	5.25
20	0.6311	0.6797	0.9537	1.0015	0.9593	0.7898	0.301	-0.0258	0.0919	5.25
21	0.5257	0.5847	0.8083	0.9391	0.7771	0.6958	0.301	0.0003	0.0677	4.56
22	0.4611	0.6781	0.6776	0.8722	0.7266	0.6027	0.301	0.0075	0.0595	4.25
23	0.4472	0.5010	0.7106	0.9158	0.8605	0.5783	0.301	0.0096	0.0548	4.25
24	0.4411	0.5787	0.6870	0.8193	0.6778	0.6188	0.301	0.0713	0.0524	4.00

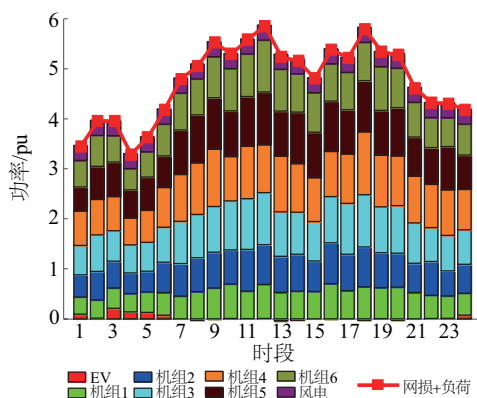


图5 功率平衡验证图

Fig. 5 Chart of power balance verification

3.3 模型验证

为进一步验证所提调度模型的可行性,且能够减少燃料费用和降低污染排放。分别对以下4种场景进行动态环境经济调度研究。

场景1:调度系统中包含1个大型风电场及5000辆电动汽车,且电动汽车采用可调度的V2G模式。

场景2:调度系统中包含的风电及电动汽车与场景1一样。但是,电动汽车采用直接控制充电模式,只对充电的时间进行限制。充电时间为18:00开始,第2天07:00离家出行时结束。假设在这一期间所充电量满足均匀分布,5000辆电动汽车一共所需电能为4633 kWh。

场景3:调度系统中不含风电,仅含有电动汽车,其调度方式与场景1一样。

场景4:同样调度系统中仅含有电动汽车,其控制方式场景2一样。

上述场景中,场景1和场景2 DEED模型中含有风电和电动汽车,场景3和场景4仅含有电动汽车不含风电,且场景1和场景3中电动汽车以V2G模型进行调度研究,场景2和场景4中电动汽车采用直接控制充电模式。所有场景都采用本文的INSMODE进行求解,其算法种群,迭代次数等数与4.2节一致。在此给出不同场景下的极端解和折中解及折中解对应的每个时段发电机组的出力曲线,分别见表4和图6。

对比解的情况和发电机组出力曲线,若DEED模型中含有风电场和电动汽车,但电动汽车采用场景2中接入方式,相比于场景1中采用V2G方式的

接入模型。其极端解最优燃料费用和最优污染排放分别增加102 \$和0.77 lb。若模型中仅含有电动汽车,且电动汽车接入模式与上述场景一样,对比场景4和场景3,极端解最优燃料费用和最优污染排放分别增加118 \$和0.76 lb。

表4 不同场景下的极端解和折中解

Table 4 Extreme solutions and optimal compromise solutions of different scene

场景	目标	污染排放/lb	燃料费用/\$
1	经济最优	497.46	2.4333×10^4
	环境最优	492.43	2.4673×10^4
2	经济最优	497.61	2.4435×10^4
	环境最优	493.20	2.4676×10^4
3	经济最优	571.74	2.5565×10^4
	环境最优	507.54	2.6734×10^4
4	经济最优	571.80	2.5683×10^4
	环境最优	508.30	2.6866×10^4

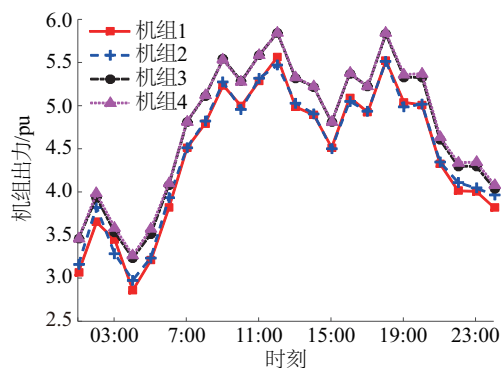


图6 不同场景下机组出力

Fig. 6 Units output power of different scenes

由此可见,电动汽车以单一充电方式接入电网,将会增加发电机组的出力,从而增加了发电机组的燃料费用和污染排放。因此电动汽车以V2G模式接入电网能缓解其对化石能源的过度依赖,减少发电机组的燃料费用和污染物的排放。

同时,DEED模型中风电的接入,场景1和场景3对比,其最优燃料费用和最优污染排放分别减少1232 \$和15.11 lb。场景2和场景4对比,其最优燃料费用和最优污染排放分别减少1248 \$和15.10 lb。由此,风电的加入降低了发电机组的出力,同时减少发电机组的燃料费用和污染排放。

由上述分析可知,含风电场和电动汽车电力系统多目标动态环境经济联合调度模型,不仅缓解了

传统火电厂对化石能源的依赖,而且对保护环境和节约能源起到一定作用。同时,也表明风电与电动汽车充、放电之间具有一定的互补性。

4 结 论

本文建立含风电及电动汽车协同调度的电力系统多目标 DEED 模型,充分考虑风电随机性、系统网损、旋转备用约束、机组爬坡约束及车主用户使用需求等约束,该模型不仅起到减少燃料费用和污染排放的作用,同时,实现对电动汽车充放电的有序管理及与风电之间的互动。

设计一种 INSMODE 优化求解方法,针对模型维度高的特点提出决策变量行列转换法;对于多重约束条件提出基于决策变量动态调整的约束处理方法,最终实现对高维度、多约束问题的有效处理。

以 6 机系统结合不同的调度场景对 DEED 模型进行仿真研究,结果验证了所提模型的正确性和合理性,以及方法的有效性和优越性。

[参考文献]

- [1] Denny E, O'Malley M. Wind generation, power system operation, and emissions reduction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 341—347.
- [2] Qiao Baijie, Zhang Xingwu. Sparse deconvolution for the large-scale ill-posed inverse problem of impact force reconstruction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 83: 93—115.
- [3] Granelli G P, Mongtagna M, Pagini G L, et al. Emission constrained dynamic dispatch [J]. Electric Power Systems Research, 1992, 24(1): 55—64.
- [4] 张晓花, 谢 俊, 朱正伟, 等. 考虑不确定性的智能电网多目标机组组合研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(12): 3055—3062.
- [4] Zhang Xiaohua, Xie Jun, Zhu Zhengwei, et al. Research of multi-objective unit combination in smart grid with uncertainty[J]. Acta Energies Solaris Sonica, 2016, 37(12): 3055—3062.
- [5] 聂永辉, 王中杰, 李 江, 等. 大规模风电并网电力系统优化潮流[J]. 太阳能学报, 2017, 38(11): 3180—3187.
- [5] Nie Yonghui, Wang Zhongjie, Li Jiang, et al. Optimal power flow for larger-scale wind power integration[J]. Acta Energies Solaris Sonica, 2017, 38(11): 3180—3187.
- [6] Duvall M, Knipping E, Alexander M, et al. Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles. volume1: nationwide greenhouse gas emissions [R]. Palo Alto, USA: Electric Power Research Institute, 2007.
- [7] 中华人民共和国国务院.《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020 年)》[EB/OL]. http://www.gov.cn/jzwgk/2012/07/09/content_2179032.htm2012-07-09.
- [8] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 30—37.
- [8] Yao Weifeng, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. A charging and discharging strategy for electric vehicles based on bi-level optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30—37.
- [9] 蔡秋娜, 文福拴, 薛禹胜, 等. 基于 SCUC 的可入网混合电动汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 38—46.
- [9] Cai Qiuna, Wen Fushuan, Xue Yusheng, et al. An SCUC-based optimization approach for power system dispatching with plug-in hybrid electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 38—46.
- [10] 朱永胜, 王 杰, 瞿博阳, 等. 含电动汽车的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 16—23.
- [10] Zhu Yongsheng, Wang Jie, Qu Boyang, et al. Dynamic environmental and economic dispatch of power system with EVs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 16—23.
- [11] Qu Boyang, Qiao Baihao, Zhu Yongsheng, et al. Dynamic power dispatch considering electric vehicles and wind power using decomposition based multi-objective evolutionary algorithm[J]. Energies, 2017, 10(12): 1991.
- [12] 朱永胜, 王 杰. 采用 MOEA/D 算法的含风电系统环境经济调度[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(4): 96—100.
- [12] Zhu Yongsheng, Wang Jie. Environmental economic dispatch integrating wind power adopting MOEA/D algorithm [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2014, 35(4): 96—100.
- [13] 张程飞, 袁 越, 张新松, 等. 考虑碳排放配额影响的含风电系统日前调度计划模型[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2114—2120.
- [13] Zhang Chengfei, Yuan Yue, Zhang Xinsong, et al. Day-

- ahead dispatching scheduling for power grid integrated with wind farm considering influence of carbon emission quota[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(8): 2114—2120.
- [14] 常俊晓, 游文霞, 肖隆恩. 含风电的发电资源优化调度与仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2015, 32(4): 120—123, 128.
- [14] Chang Junxiao, You Wenxia, Xiao Longen. Optimized dispatching and simulation for generation resources with wind power connection[J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(4): 120—123, 128.
- [15] 于大洋, 黄海丽, 雷 鸣, 等. 电动汽车充电与风电协同调度的碳减排效益分析[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(10): 14—18.
- [15] Yu Dayang, Huang Haili, Lei Ming, et al. Analysis on carbon emission reduction benefits of electric car charging and wind power co-scheduling[J]. *Power system automation*, 2016, 36(10): 14—18.
- [16] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(20): 22—29.
- [16] Zhao Junhua, Wen Fushuan, Xue Yusheng, et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(20): 22—29.
- [17] 施泉生, 邸 超, 孙佳佳, 等. 风电与电动汽车协同并网调度环境及经济模型[J]. *上海电力学院学报*, 2017, 33(2): 113—118.
- [17] Shi Quansheng, Di Chao, Sun Jiajia, et al. An environmental and economic model of grid dispatching coordinated with wind powers and plug-in electric vehicles [J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2017, 33(2): 113—118.
- [18] Guo Chuangxin, Zhan Junpeng, Wu Q H Dynamic economic emission dispatch based on group search optimizer with multiple producers [J]. *Electric Power Systems Research*, 2012, 86: 8—16.
- [19] Zhao Junhua, Wen Fushuan, Dong Zhaoyang, et al. Optimal dispatch of electric vehicles and wind power using enhanced particle swarm optimization [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(4): 889—899.
- [20] Zhao Shizheng, Suganthan P N. Two-lbests based multi objective particle swarm optimizer [J]. *Engineering Optimization*, 2011, 43(1): 1—17.

MULTI-OBJECTIVE POWER SYSTEM DISPATCH WITH WIND POWER AND ELECTRIC VEHICLES

Zhu Yongsheng, Qiao Baihao, Qu Boyang, Yan Li, Yang Lu, Li Chao

(College of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: To cope with the new challenges of power system dispatch bring by the rapid development of wind power and large-scale use of electric vehicles, based on the Weibull stochastic description of wind power and the hierarchical scheduling strategy for electric vehicles, the multi-objective dynamic environmental economic dispatch with wind power and electric vehicles model is proposed to minimize pollution emissions and fuel costs. The model takes into account constraints such as system power balance, system loss, spinning reserve and users travel demand, and battery characteristics etc., and vehicles network energy interaction behavior. An improved multi-objective differential evolution algorithm based on non-domination sorting is proposed. For the characteristics of the model and multiple constraints, the decision variables row-column conversion method and the constraints adjustment processing strategy based on dynamic adjustment are proposed. Finally, the 6-unit of the system and four scenarios are researched. Through the dynamic scheduling management of new energy access, the rationality of the proposed model and the correctness of the algorithm are verified.

Keywords: power system dispatch; wind power; electric vehicle; differential evolution algorithm; multi-objective optimization