

考虑网内实时电价的微电网经济优化运行研究

赵 峰¹, 罗 鑫¹, 高峰阳^{1,2}

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃交达工程检测科技有限公司, 兰州 730070)

摘 要: 为提高风-光的利用率,结合需求响应中的基于负荷率的实时电价模型与微电网优化运行模型,采用混沌烟花算法对微电网中需求侧负荷使用时间与电源侧微源的有功出力进行综合优化。Matlab 仿真结果表明,当负荷曲线得到合理优化后,风-光的利用率有明显提升,微电网系统运行的经济性相应地也有所提升,验证该算法求解此类问题的可行性和精确性。

关键词: 微电网; 优化运行; 需求响应; 实时电价; 混沌烟花算法

中图分类号: TM743

文献标志码: A

0 引 言

随着中国可再生能源发电技术的快速发展,微电网(micro-grid, MG)作为一种新型的可再生能源供应与管理技术,可将分布式电源(distributed generation, DG)、储能系统、能量转换装置、各类负荷、监控、保护以及通讯装置有机整合在一起的小型发电系统^[1-2],可使风电、光伏发电等可再生能源在并入大电网时,避免其随机性与波动性对大电网的冲击。MG 系统优化运行作为 MG 能量管理的一个重要组成部分,通过 MG 系统中可控 DG 出力的合理调用,达到既定目标的最优,是实现 MG 系统高效、经济、环保及灵活运行的关键^[3]。

随着现今 MG 系统研究的深入与其多元化的发展与完善,仅考虑电源侧资源的优化已难以满足当今电力产业的发展需求^[4]。因此,进一步的研究需要从微电源、MG 以及负荷三者间进行协调互动,考虑从需求侧资源入手进行优化。在需求响应(demand response, DR)中,基于价格的需求响应(price-based demand response, PBDR)主要是用户针对峰谷分时电价和实时电价等价格信息的变化来引导自身电力需求^[5-6]。

文献[7]在峰谷分时的电价条件下,构建了基于电量电价弹性矩阵的用户多时段电价响应模型,提出在分时电价条件下储能充放电策略及微网优化运行策略。

文献[8]基于价格弹性系数分析价格型需求响应调度成本与互动响应量之间的关系,建立实时优化调度模型。但是峰谷分时电价缺乏灵活性会出现价格策略的引导与实际情况不相符的情况。文献[9]基于准实时电价建立负荷模型,将柔性负荷作为系统的备用调峰,并考虑了火发电机组的排污特性,建立相应的调度模型,但是所建立准实时电价模型较简单。文献[10-11]分别建立基于实时电价的考虑不确定性的风电消纳模型和基于负荷分类的负荷水平对实时电价的响应模型,不仅使得所研究对象的经济性有所提升,还提高了系统内可再生能源的利用率。

综上所述, PBDR 已经开始在 MG 系统优化运行问题中扮演重要角色。在 MG 系统孤岛运行且风-光接入比例较大时,由于不与大电网进行交互,仅仅通过储能系统的调用难以对 MG 系统进行高效且经济的调整,而通过制定相应实时电价来控制用户用电量,可使 MG 系统的运行更加经济。当 MG 系统中风-光出力较大,且在负荷水平较低时,为避免“弃风弃光”问题,较低的电价可使用户用电量增加,在提高 MG 系统经济性的同时,又可提高风-光利用率;反之,当负荷水平较高,风-光出力不足时,较高的电价使得用户用电量降低以满足 MG 系统内功率平衡,可保证 MG 系统安全可靠运行,并尽可能地避免可中断负荷

收稿日期: 2018-03-22

基金项目: 兰州市人才创新创业项目(2017-RC-95)

通信作者: 罗 鑫(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源及分布式发电技术方面的研究。luox1101@163.com

赔偿支出。

本文首先根据电网的负荷率,建立实时电价模型,进而由需求弹性模型得出微电网价格响应后的负荷曲线;其次,考虑微电网结构和各 DG 的发电特点,以 DG 的有功出力为控制变量,从微电网发电成本、环保成本和需求侧可中断负荷补偿费用 3 个方面建立微电网优化运行模型,并采用混沌烟花算法(chaotic firework algorithm, C-FWA)作为优化模型求解算法;最后,将本文所提方案应用于实际算例当中,分析验证需求响应对微电网优化运行方案的影响。

1 价格型需求响应模型

本文将 MG 系统内的负荷做如下划分:

$$LQ(t) = LQ_B(t) + LQ_R(t) + LQ_C(t) \quad (1)$$

式中, $LQ_B(t)$ ——基线负荷,是根据生活和工作方式的需求自然发生,任何时刻都要处在运行状态的负荷; $LQ_R(t)$ ——随机负荷,是用户随机启动的负荷;由于 $LQ_B(t)$ 和 $LQ_R(t)$ 二者的不可调控性和不可预测性,因此,电价的变化对二者影响不大,变化量忽略不计; $LQ_C(t)$ ——可控负荷,是功率可调整甚至被间歇性中断的负荷,用户可根据电价的变化来调整使用时间,是价格型需求响应模型的关键。

本文采用基于电网负荷率的实时电价模型^[12],首先定义电网负荷率为:

$$\eta(t) = \frac{LQ(t)}{\sum_{i=1}^T LQ(i)} \quad (2)$$

式中, $\eta(t)$ —— t 时段电网负荷率预测值; $LQ(t)$ —— t 时段预测负荷值; $\sum_{i=1}^T LQ(i)$ ——长周期(24 h)内预测负荷总量,其中, T 为划分的短周期数,本文取 24 h。

用 $\Delta\eta(t)$ 可确定短周期内负荷的大致变化趋势,定义 $\Delta\eta(t)$ 为:

$$\Delta\eta(t) = \eta(t+1) - \eta(t), \quad t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (3)$$

由式(3)可知,当 $\Delta\eta(t) > 0$ 时, t 时段网内负荷上升,当 $\Delta\eta(t) < 0$ 时, t 时段网内负荷下降。据此,定义实时电价的表达式为:

$$p(t) = a\eta^2(t) + b\eta(t) + c \quad (4)$$

式中, $p(t)$ ——基于负荷率的实时电价; a 、 b 、 c ——电价调节参数,可根据风-光预测曲线改变取值来调整 $p(t)$ 的取值,以达到提高风-光利用率的目的。

根据基于价格弹性系数的 PBDR^[13]的定义,负荷用

电量与电价之间近似成反比例关系,电价越高,负荷用电量越少,实时电价下的响应负荷与电价之间用线性关系表示为:

$$L(t) = \alpha p(t) + \beta, \quad L(t) \in [L_{\min}(t), L_{\max}(t)] \quad (5)$$

式中, $L(t)$ —— t 时段需求响应后负荷; $p(t)$ ——为 t 时段的实时电价,价格弹性系数 $\alpha < 0$, $\beta > 0$ 恒成立; $L_{\min}(t)$ 与 $L_{\max}(t)$ —— t 时段负荷的最大值与最小值。

2 微电网系统运行优化模型

2.1 微电网运行策略

孤岛运行的 MG 系统由于地理位置(海岛、偏远山区等)的限制,很难实现并网,因此风-光机组的装机容量较高。但是在风-光机组的装机比例较高时,又存在风-光的消纳问题。具体体现为:风-光出力曲线与电力负荷曲线不吻合,在有的时段,风-光出力过剩,而负荷需求较低,无法消纳;有的时段负荷需求较高而风-光出力不足,难以保证功率平衡。因此本文结合实时电价模型,通过调节电价参数 $a \sim c$,在风-光出力大于负荷需求的时段设置相对较低的电价,在负荷需求大于风-光出力的时段设置相对较高的电价,从而引导更多负荷转移至风-光出力充裕的时段,以此使得实施实时电价后的负荷曲线与风-光出力曲线最大化的吻合,提高风-光利用率,也相当于降低了 MG 系统的经济性。

孤岛运行的策略:当风-光出力大于 MG 系统内负荷需求时,安排储能系统进行充电;当 MG 系统内负荷需求无法由风-光出力满足时,首先安排风力发电和光伏发电机组优先出力;其次安排储能系统放电,最后安排燃料电池与微型燃气轮机启动以满足 MG 系统内负荷需求。

2.2 目标函数

优化模型以 MG 系统日运行费用最小为目标,其中包括 MG 系统一个周期(24 h)内 DG 的发电成本^[14](包括燃料消耗成本、运行维护成本)、环保成本^[15]和需求侧中断负荷的补偿费用。设定风力发电和光伏发电 100%消纳且发电成本忽略不计。

综上,建立目标函数为:

$$\min C = \sum_{t=1}^T [C_F(t) + C_{OM}(t) + C_E(t)] + C_{DR} \quad (6)$$

$$C_F(t) = \sum_{i=1}^N C_{fi} \cdot P_i(t) \quad (7)$$

$$C_{OM}(t) = \sum_{i=1}^N K_{OM,i} \cdot P_i(t) \quad (8)$$

$$C_E(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^D 10^{-3} \alpha_{ij} \beta_j P_i(t) \quad (9)$$

式中, T ——运行周期(取值为 24 h); $C_f(t)$ 、 $C_{OM}(t)$ 、 $C_E(t)$ —— t 时刻各 DG 的燃料成本、运行维护成本、环境治理成本; C_{grid} ——MG 系统与配电网之间电能交互的成本; C_{DR} ——需求侧中断负荷的补偿费用; i ——各 DG 的编号, $1 \leq i \leq N$; t 为运行时刻; $P_i(t)$ ——为在 t 时段第 i 个 DG 运行的有功功率输出; $C_{f,i}$ ——第 i 个 DG 运行时的燃料成本; $K_{OM,i}$ ——第 i 个 DG 运行时的运行维护系数; j ——污染气体(CO、CO₂、SO₂、NO_x)类型; D ——污染物种类, $D=4$; α_{ij} ——第 i 个 DG 运行时污染物排放系数; β_j ——治理第 j 类污染气体所需成本。

2.3 约束条件

2.3.1 MG 系统约束

MG 系统功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^N P_{DG,i}(t) + P_{ESS}(t) = \tilde{P}_L(t) \quad (10)$$

式中, $P_{DG,i}(t)$ ——第 i 个 DG 在 t 时段的输出功率, $P_{ESS}(t)$ ——储能系统在 t 时段的充(放)电功率, 储能系统工作在放电模式时, 该值取正, 反之, 则取负; $\tilde{P}_L(t)$ —— t 时段的负荷值。

2.3.2 DG 发电约束

出力约束:

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (11)$$

2.3.3 微型燃气轮机与燃料电池爬坡速率约束

增加出力时:

$$\hat{P}_i(t) - \hat{P}_i(t-1) \leq R_{up} \quad (12)$$

减少出力时:

$$\hat{P}_i(t-1) - \hat{P}_i(t) \leq R_{down} \quad (13)$$

式中, $P_{i,min}$ 、 $P_{i,max}$ ——第 i 个 DG 的最小与最大功率; $\hat{P}_i(t)$ ——第 i 个可控 DG 在 t 时段的功率; R_{up} 、 R_{down} ——可控 DG 的上爬坡与下爬坡速率。

2.3.4 储能系统充放电约束

$$\begin{cases} P_{ESS,min} \leq P_{ESS}(t) \leq P_{ESS,max} \\ 0 \leq P_{ch}(t) \leq P_{ch,max}, 0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis,max} \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $P_{ESS,min}$ 、 $P_{ESS,max}$ ——储能系统最小、最大功率; $P_{ch,max}$ 、 $P_{dis,max}$ ——储能系统最大充、放电功率限度; SOC_{min} 、 SOC_{max} ——储能系统剩余容量的最小、最大值。

3 模型求解算法

3.1 烟花算法

烟花算法(firework algorithm, FWA)由中国学者谭营等^[16]于 2010 年提出。作为一种新颖的优化算法, FWA 优缺点明显。因此, 本文采用文献[17]中所提出的改进混沌烟花算法来解决传统烟花算法容易陷入局部最优的问题。在 FWA 中, 每一个烟花被看作为解空间中的一个可行解, 其邻域搜索的过程为烟花爆炸产生一定数量火花的过程。算法中, 爆炸算子实现了算法中的邻域搜索, 变异算子可进一步增加种群的多样性, 提高算法搜索效率, 选择规则可保证烟花种群中优秀的信息能够传递到下一代种群中, 保证搜索精度^[18]。

FWA 算法采用优胜劣汰的方式淘汰适应度低的个体, 收敛速度较快。但是, 影响算法陷入局部最优的主要原因之一是所求解问题的解空间分布。由于 FWA 算法中爆炸火花的个体数量有限, 其分布具有一定的随机性, 对于较复杂的问题而言, 当前优质解的前进方向不一定就是全局最优解的收敛方向。当最优解区域附近种群个体适应度跨度变化较大或者代表最优解的个体和次优解的个体适应度相差较小时, 就会出现提前收敛, 进而陷入局部最优的情况。

在实际的算法应用中, 为加快运算速度, 采用的种群规模有限。个体的初始状态一般随机生成, 故爆炸位置覆盖的解空间是不确定的。在初始种群没有覆盖到全局最优解的情况下, 如果在有限迭代次数内, 无法覆盖到最优解区域, 则算法陷入局部最优是难以避免的。为改善算法的收敛性能, 一方面要改善种群的多样性, 一方面要能够跳出局部最优的约束。针对前者, FWA 中已经引入了高斯变异火花来改善种群的多样性, 针对后者, 就需要结合 3.2 节中的混沌搜索机制来进行改进。

3.2 混沌搜索机制改进烟花算法^[17]

本文所引入的混沌基本思想是将需要优化的变量, 通过一定的混沌映射规则, 映射到混沌变量空间的取值区间内, 利用混沌变量的遍历性和规律性寻优搜索, 最后再将优化后的解线性转换到原优化空间^[19]。逻辑自映射函数产生的混沌序列遍历性优于其他映射函数, 且易于计算^[20]。因此, 本文采用逻辑自映射函数来产生混沌序列, 数学表达式为:

$$L_{i+1}^k = 1 - 2(L_i^k)^2, L_i^k \in (-1, 1) \quad (15)$$

式中, 映射的定义域为 $(-1, 0) \cup (0, 1)$; k ——搜索空间的维度。

在执行搜索的过程中,每一个烟花个体皆位于 D 维空间内,用 m_{ik} 表示第 i 个个体的第 k 维位置,作为初始值,首先将个体空间位置的每一维映射到定义域上,进行尺度变换,即:

$$L_i^k = 2(m_{ik} - F_{ik})(E_{ik} - F_{ik}) - 1 \quad (16)$$

其次,按照式(15)产生的混沌序列将混沌变量加载于待搜索的个体变量,得到混沌算子操作后的新个体,最后将产生的混沌变量序列变换到原解空间,表达式为:

$$\tilde{m}_{ik} = \frac{1}{2}(E_{ik} - F_{ik}) \cdot L_i^k + \frac{1}{2}(E_{ik} + F_{ik}) \quad (17)$$

在此搜索过程中,若有更优解,则更新当前最优函数值,来代替烟花 i 的初始位置;否则,继续进行混沌搜索直到最近多次迭代中最优函数值没有更新或者达到最大混沌搜索次数。式(16)与式(17)中, k 为 $1 \sim D$ 的正整数, E_{ik} 与 F_{ik} 分别表烟花 i 第 k 维变量的搜索下界和上界。

由于混沌搜索的遍历性,使其易摆脱局部极值的束缚,具有良好的搜索机制;而 FWA 具有模型简单、收敛速度快以及全局搜索能力强的特点,利用各自优势将两者有机结合,使得混沌烟花算法 (chaotic firework algorithm, C-FWA) 具有优异的性能。

3.3 混沌烟花算法步骤

根据上述 C-FWA,结合实际的 MG 系统的优化运行问题,算法步骤如下:

1) 输入负荷基础数据,各 DG 的运行参数、各时段燃料价格、污染排放系数、其他各种费用系数以及微电网的典型日风光和负荷日前预测数据;

2) C-FWA 参数初始化,设定算法种群规模 $NumPop$ 、最大迭代次数 $genMax$ 、火花决定常数 SM 、爆炸半径决定常数 R 、个体搜索空间上限 $M_{k,UB}$ 和下限 $M_{k,LB}$ 以及变异概率 P 等;

3) 确定实时电价下的负荷曲线,由预测的风光和负荷数据,根据式(2)计算 MG 系统的负荷率,通过确定合理参数,由式(4)制定各个时段的实时电价,由式(5)确定 DR 后的负荷曲线。

4) 种群初始化,随机产生 M 个烟花个体,将控制变量(各 DG 的出力情况以及与配电网的交互情况)对应算法中的烟花个体当前位置并进行编码,编码矩阵表示为: $P = [P_{DG,i}]_{N \times T}$, 其中的列向量对应各时刻各 DG 的出力情况。根据式(6)计算所有个体的适应度值并记录,计算出爆炸半径 R_i 、产生的火花数目 A_i ;

5) 种群的变异及更新,按照爆炸半径和火花数量生成爆炸火花种群 EN 和高斯变异火花种群 GN ;对超

出边界的火花应用映射规则映射到新位置,再应用选择策略得到下一代烟花群体;

6) 合并 N (最优烟花)、 EN 以及 GN ,形成候选种群 K 。对 K 中 20% 的个体按式(15)、式(16)进行混沌搜索更新;

7) 判断是否满足停止条件,若满足条件,则跳出程序;若不满足条件,则在候选中选择前 N 个最优烟花,并重复步骤 4)~步骤 6)继续循环;

8) 输出结果,输出最优响应负荷曲线、各时段 DG 的最优出力情况以及最优个体所对应的目标函数值。

4 算例分析

为验证本文所提优化方法,对一个新能源接入比例较大的孤岛 MG 系统进行分析研究。该 MG 系统配有 2 台 65 kW 的微型燃气轮机 (micro-turine, MT), 1 台 40 kW 的燃料电池 (fuel cell, FC), 光伏 (PV) 装机容量为 150 kW, 风电 (wind turbine, WT) 装机容量为 200 kW, 储能系统 (energy storage system, ESS) 容量上限为 250 kWh, MG 系统中的各个 DG 的运行参数与成本如表 1 所示^[21], 各个 DG 污染物排放系数及成本如表 2 所示^[22]。MT 与 FC 的发电成本曲线见文献[23]。研究周期 T 为 24 h, 单位时间间隔为 1 h。MG 系统原始电价为全天 0.52 元/kWh, 天然气的价格为 2.05 元/m³。假设预测误差由 MG 系统备用吸收。

C-FWA 算法的参数设定: 最大迭代次数为 150, 混沌搜索次数为 30, 种群数量为 50, 爆炸火花决定常数为 100, 爆炸半径决定常数为 120, 变异概率为 0.05, 烟花个体搜索空间上下限为 512 和 -512。

MG 系统内的典型日风、光和负荷日前预测数据如图 1 所示^[11], 由图 1 可看出在 00:00~17:00 这个很长的时段内, 风光出力值都超过 MG 系统内负荷需求值, 存在着很大的风光消纳问题。

表 1 微电网系统的运行参数

Table 1 Operation parameters of micro-grid system

类型	$P_{min}/$ kW	$P_{max}/$ kW	$R_{down}/$ kW·min ⁻¹	$R_{up}/$ kW·min ⁻¹	$K_{om}/$ 元·kWh ⁻¹
WT	0	200	—	—	0.045
PV	0	150	—	—	0.0096
MT	5	65	5	10	0.128
FC	5	40	2	2	0.0293
ESS	10	30	—	—	0.045

表2 污染物排放系数及成本

Table 2 Emission factor and cost of pollution harness

污染物 类型	费用/ 元·kg ⁻¹	污染物排放系数/g·kWh ⁻¹				
		WT	PV	MT	FC	ESS
CO	0.125	0	0	0.172000	0.0544	0
CO ₂	0.210	0	0	184.082900	635.04	0
SO ₂	14.842	0	0	0.000928	0	0
NO _x	62.964	0	0	0.618800	0.023	0

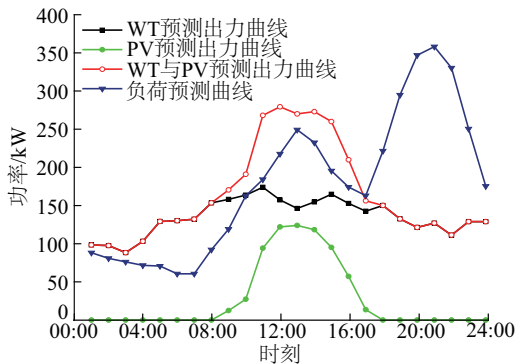


图1 风、光功率和负荷预测值

Fig. 1 Predictive values of wind power, PV power and loads

在 MG 系统内实施原始电价的情况下,将响应前原始负荷值作为负荷输入,结合目标函数与算例参数,对 MG 系统的经济运行进行优化后,相应可控 DG 与 ESS 运行方案如图 2 所示,风-光输出未被充分利用,尤其是在 07:00~08:00、11:00~12:00 以及 15:00~16:00 这 3 个时段“弃风弃光”较为严重。在 20:00~22:00 负荷高峰期,由于系统无法满足负荷需求,还需中断部分负荷以保证系统平衡,因此需要通过 DR 措施使负荷向风-光充裕时段转移,可提高风-光的利用率的同时“削峰填谷”。

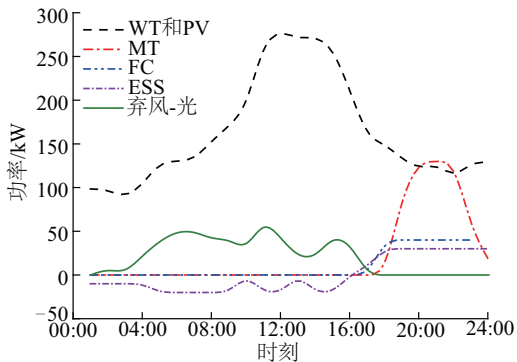


图2 需求响应前 DG 出力情况

Fig. 2 Result of output of DG before demand response

采用基于电网负荷率的实时电价模型,根据图 1 中的风光预测曲线,调节式(4)中的电价参数 a 、 b 、 c 得到

MG 系统实时电价曲线如图 3 所示,根据式(5)得到原始电价与实时电价下的负荷曲线如图 4 所示。

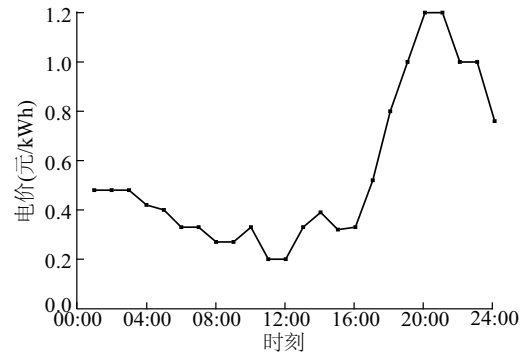


图3 微电网实时电价曲线

Fig. 3 Curve of real-time Price in micro-grid

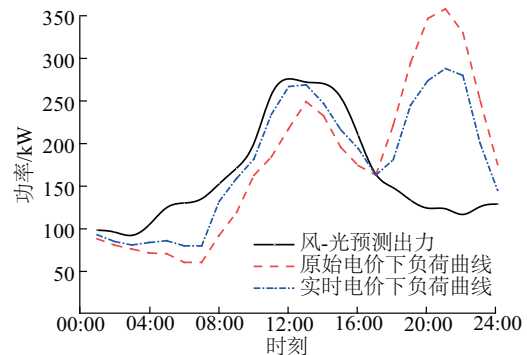


图4 需求侧负荷优化结果

Fig. 4 Result of load transfer on demand side

由图 3 与图 4 可看出,风-光出力在高峰时段实时电价相对较低,而负荷高峰时段实时导更多负荷转移至低电价时段,使得负荷曲线尽量与风-光出力曲线吻合,提高风-光的利用率,并使负荷的峰值从 358.1 kW 降低到 287.4 kW,避免中断负荷的情况。在 MG 系统内实施上文所制定实时电价的情况下,将电价响应后负荷值作为负荷输入,结合目标函数与算例参数,对 MG 系统运行进行优化后,相应可控 DG 与 ESS 运行方案如图 5 所示。对比图 2 与图 5 可知,在 DR 优化负荷曲线后,风-光利用率从 87.13% 提高到 95.16%,有明显改善。ESS 的充放电更为合理,FC 与 MT 等可控 DG 的使用率有所下降,根据式(5),由 DR 前负荷值计算得到日运行总费用为 1209.25 元;DR 后负荷值计算得到日运行总费用为 1137.05 元,较 DR 前减少约 72 元。可见,在考虑实时电价进行负荷优化后,MG 运行更加经济。

为验证 C-FWA 的性能,本文针对 DR 后负荷值采用 FA 和 C-FWA 对目标函数各优化计算 20 次。2 种算法的最优适应度变化曲线如图 6 所示。从图 6 可看

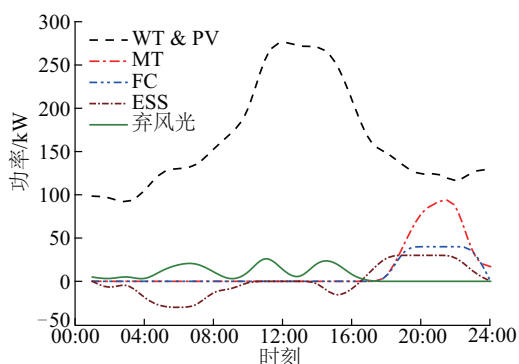


图5 需求响应后 DG 出力情况

Fig. 5 Results of output of DG after demand response

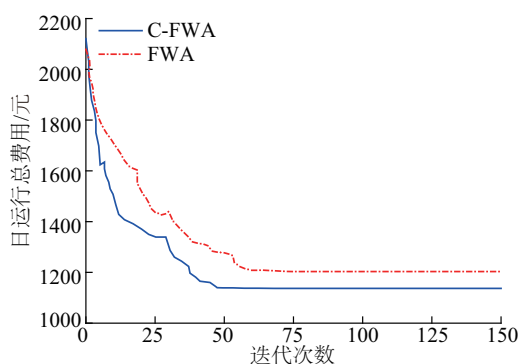


图6 2种算法的迭代曲线对比

Fig. 6 Iterative curves comparison of two algorithms

出应用 C-FWA 计算所得最优总成本优于应用 FWA 计算所得最优总成本。另外还可看出,FWA 陷入局部最优;而通过结合混沌搜索机制对传统 FWA 进行改进得到的 C-FWA,提高了传统 FWA 的全局搜索能力和收敛性能,同时有效避免了传统 FWA 陷入局部最优,从而得到更优结果。

5 结 论

1) 本文结合 PBDR 模型,根据风-光出力的预测曲线,制定实时电价,引导用户调整随机负荷负荷和可控负荷的使用时间,使得 MG 系统内负荷曲线得到合理优化;

2) 采用 C-FWA 作为模型求解算法,通过引入混沌搜索机制,较好地克服了 FWA 易陷入局部最优的缺陷,保证了良好的全局搜索能力和寻优性能;

3) 同时考虑电源侧优化与需求侧优化时, MG 系统运行的经济性有所提高,并且在孤岛运行模式下,风-光的利用率有明显提升。

[参考文献]

[1] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发

展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.

WANG C S, LI P. Development and challenge of distributed generation, microgrid and smart distribution network[J]. Automation of electric power systems, 2010, 34(2): 10-14.

[2] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids: an overview of ongoing research, development, and demonstration projects[J]. IEEE power & energy magazine, 2007, 5(4): 78-94.

[3] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.

YANG X F, SU J, LYU Z P, et al. Review on microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[4] 李鹏, 张玲, 王伟, 等. 微网技术应用与分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 109-115.

LI P, ZHANG L, WANG W, et al. Application and analysis of microgrid technology[J]. Automation of electric power systems, 2009, 33(20): 109-115.

[5] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-107.

ZHANG Q, WANG X F, WANG J X, et al. Research on demand response under electricity market[J]. Automation of electric power systems, 2008, 32(3): 97-107.

[6] 田世明, 王蓓蓓, 张晶. 智能电网条件下的需求响应关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3576-3589.

TIAN S M, WANG B B, ZHANG J. Key technologies of demand response in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3576-3589.

[7] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709-1716.

ZHOU N, FAN W, LIU N, et al. Optimization of multi-objective capacity of photovoltaic microgrid energy storage system based on demand response[J]. Power system technology, 2016, 40(6): 1709-1716.

[8] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 应对风电消纳中基于安全约束的价格型需求响应优化调度建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5571-5578.

ZENG D, YAO J G, YANG S C, et al. Optimization of price-based demand response optimization scheduling based on safety constraints in wind power consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5571-5578.

- [9] 傅利, 周步祥, 王小红, 等. 计及用户侧响应的含风电电力系统清洁经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 74-79.
FU L, ZHOU B X, WANG X H, et al. A clean economy dispatch of wind power system accounting for user response[J]. Acta automatica systems & automation, 2014, 26(12): 74-79.
- [10] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 基于实时电价的大规模风电消纳机组组合和经济调度模型[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2955-2963.
LIU X C, WANG B B, LI Y, et al. A large scale wind farms combined unit based on real-time electricity price and economic dispatch model [J]. Power system technology, 2014, 38(11): 2955-2963.
- [11] 陈安伟, 华浩瑞, 李鹏, 等. 实时电价机制下交直流混合微网优化运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 13-20.
CHEN A W, HUA H R, LI P, et al. Optimization of AC/DC hybrid microgrid operation under real-time electricity price mechanism [J]. Power system protection and control, 2017, 45(7): 13-20.
- [12] 曾勇. 基于智能电网的实时电价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
ZENG Y. Research on real-time electricity price based on smart grid [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [13] SU C, KIRSCHEN D. Quantifying the effect of demand response on electricity markets[J]. IEEE transactions on power systems, 2009, 24(3): 1199-1207.
- [14] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 不同运行调度模式下微网经济运行对比分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 106-113.
CHEN J, YANG X, ZHU L, et al. Comparative analysis of micro- grid economic operation under different operation dispatching modes [J]. Electric power automation equipment, 2013, 33(8): 106-113.
- [15] 邢龙, 张沛超, 方陈, 等. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 7-12.
XING L, ZHANG P C, FANG C, et al. Optimization of microgrid operation based on generalized demand side resources [J]. Automation of electric power systems, 2013, 37(12): 7-12.
- [16] 谭莹, 郑少秋. 烟花算法研究进展[J]. 智能系统学报, 2014, 9(5): 515-528.
TAN Y, ZHENG S Q. Research progress of fireworks algorithm [J]. Journal of intelligent systems, 2014, 9(5): 515-528.
- [17] 包晓晓, 叶春明, 计磊, 等. 改进混沌烟花算法的多目标调度优化研究[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(9): 2601-2605.
BAO X X, YE C M, JI L, et al. Multi- objective scheduling optimization for improved chaotic fireworks algorithm [J]. Application research of computers, 2016, 33(9): 2601-2605.
- [18] TAN Y, ZHU Y C. Fireworks algorithm for optimization [C]// International Conference, Advances in Swarm Intelligence, Part 1 Springer, Lecture Note in Computer Science, Beijing, China, 2010: 355-364.
- [19] EL GOHARY A, AL RUZAIZA A S. Chaos and adaptive control in two prey, one predator system with nonlinear feedback [J]. Chaos solitons & fractals, 2007, 34(2): 443-453.
- [20] 刘长平, 叶春明, 基于逻辑自映射的变尺度混沌粒子群优化算法 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(8): 2825-2827.
LIU C P, YE C M. Optimized scale chaos particle swarm optimization algorithm based on logic self-mapping [J]. Application research of computers, 2011, 28(8): 2825-2827.
- [21] 吴雄, 王秀丽, 崔强. 考虑需求侧管理的微网经济优化运行 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(6): 90-96.
WU X, WANG X L, CUI Q. Optimal operation of micro-grid economy considering demand- side management [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(6): 90-96.
- [22] 胡晓通, 刘天琪, 何川, 等. 计及蓄电池损耗特性的微网多目标优化运行 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2674-2681.
HU X T, LIU T Q, HE C, et al. Micro-objective multi-objective optimization operation considering battery loss characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2674-2681.
- [23] 李乐. 微网的经济运行研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
LI L. The economic operation of micro-grid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

RESEARCH ON OPTIMAL OPERATION FOR MICRO-GRID CONSIDERING REAL-TIME PRICE

Zhao Feng¹, Luo Xin¹, Gao Fengyang^{1,2}

(1. *College of Electrical Engineering and Automation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;*

2. *Gansu Jiao Da Engineering Testing & Technology Company Limited, Lanzhou 730070, China*)

Abstract: In order to improve the utilization rate of wind power and photovoltaic power, the micro-grid optimization operation model is combined with the real-time electricity price model based on load rate in demand response, and the chaotic firework algorithm (C-FWA) is used to optimize synthetically the load using time of demand side and the active power output of the power supply side in this paper. The simulation results with Matlab show that the utilization rates of wind power and photovoltaic power are improved obviously when the load curve is reasonably optimized, and the economy of the microgrid system is improved accordingly. Besides this, the validity and feasibility of C-FWA for solving this type of problem are verified.

Keywords: micro-grid; optimal operation; demand response; real-time price; chaotic firework algorithm