

基于协同进化遗传算法的配电网风光储联合经济调度

许多红, 郭靖琪, 丁筱筠, 丁家涌

(国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730046)

摘要: 在当前气象及负荷曲线预测条件下,建立了综合考虑网络损耗、电压稳定、风光发电、储能套利等经济效益的风光储联合调度模型。为了解决光伏、风力发电的随机性与储能充放电的有限时序性之间协调配合问题,引入了协同进化遗传算法的多种群进化机制对模型进行求解,利用多个种群分别对光伏、风力、储能的出力进行优化控制,并通过种群的整体生态进化,达到目标最优。最后,利用 PG&E 69 节点算例,进行了多情景仿真分析,仿真结果充分验证了风光储联合优化对提高配电网系统经济运行的作用。

关键词: 风光储调度;经济运行;协同进化;遗传算法

DOI: 10.12067/ATEEE1811009

文章编号: 1003-3076(2020)06-0051-07

中图分类号: TM615

1 引言

近年来,随着分布式电源并网技术的发展与成熟,光伏、风力发电等新能源接入电网的比例逐步升高,高渗透率的清洁能源可以为电力系统提供新动力,有效降低电网对化石能源的依赖,极大地推动了低碳经济的发展^[1,2]。然而,风、光发电受自然条件影响,具有很强的不确定性和波动性,大规模的风光发电并网会对系统安全稳定造成不利影响。因此,以提高系统消纳能力为目标的光伏、风力等新能源出力问题已成为研究热点。

储能系统充放电功率响应迅速,可以实时跟踪平衡电网的功率波动,是目前解决光伏、风力等新能源发电不确定性的有效途径^[3,4]。与此同时,随着国家储能补贴政策的相继出台,储能系统在电网商业化应用日益凸显^[5,6]。储能电站可以通过调频辅助服务、需求响应服务、赚取峰谷电价差等多种途径获取收益。

风光储新能源的大规模接入以及电力市场改革的逐步发展,为未来配电网运行模式提供了很大的想象空间。国内外专家学者从多个层面展开了风光储新能源在电网的建设投资、位置接入、容量配置、协调控制、运行调度等问题的研究,并且取得不错的

进展^[7-10]。其中,储能充放电策略以及风光出力曲线的研究,可以充分挖掘新能源电站参与配电网调度的潜力,进一步降低系统弃风弃光现象,提高设备利用率,具有很高的应用价值^[11-13]。

为此,本文在当前气象预测以及负荷曲线预测条件下,以有功损耗、电压稳定、风力光伏发电、储能套利等整体经济效益最大为目标,建立了配电网风光储系统日前经济调度优化模型。为了解决光伏、风力发电的随机性与储能充放电的有限时序性之间协调配合问题,引入了协同进化遗传算法的多种群进化机制^[14,15]对模型进行求解,利用多个种群协同将风光储多变量任务分解成若干子任务以提高优化速度,并通过种群的整体生态进化,达到目标最优。最后,利用 PG&E 69 节点算例,进行了多情景环境的仿真分析,仿真结果充分验证了风光储联合优化对提高配电网系统经济运行的作用。

2 风光储联合调度模型

2.1 风光储潮流计算模型

在配电网潮流计算中,为简化分析,风光储新能源通常以等效 PQ 节点接入电网。其中,储能装置既能以储能电站的方式构成独立的发电系统,也可以与光伏、风力组建联合发电体。对于独立发电系

收稿日期: 2018-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(61202285)

作者简介: 许多红(1966-),男,甘肃籍,高级工程师,硕士,从事电力营销技术研究;
郭靖琪(1976-),男,河南籍,高级工程师,硕士,从事电力营销技术研究。

统,并网节点接入的有功功率 P 、无功功率 Q 表示为:

$$\begin{cases} P_i = P'_i + P_V^i + P_W^i + P_E^i \\ Q_i = Q'_i + Q_V^i + Q_W^i + Q_E^i \end{cases} \quad (1)$$

式中, i 为第 i 个节点; P_i, Q_i 分别为未接入新能源时的有功、无功功率; P'_i, Q'_i 分别为接入新能源后的等效有功、无功功率; P_V^i, Q_V^i 分别为光伏发电的有功、无功功率输出; P_W^i, Q_W^i 分别为风力发电有功、无功功率输出; P_E^i, Q_E^i 分别为储能充、放电功率,且在充电时 P_E^i, Q_E^i 为负值,放电时 P_E^i, Q_E^i 为正值。

对于光储、风储联合发电系统,储能装置通常并接在直流单元,并与光伏、风力共用逆变单元输出功率,此时并网节点接入的有功功率 P 、无功功率 Q 表示为:

$$\begin{cases} P_i = P'_i + P_{VE}^i + P_{WE}^i \\ Q_i = Q'_i + Q_{VE}^i + Q_{WE}^i \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{VE}^i = P_V^i + P_E^i \\ P_{WE}^i = P_W^i + P_E^i \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Q_{VE}^i = P_{VE}^i \sqrt{\frac{1 - \cos^2 \varphi_{VE}}{\cos^2 \varphi_{VE}}} \\ Q_{WE}^i = P_{WE}^i \sqrt{\frac{1 - \cos^2 \varphi_{WE}}{\cos^2 \varphi_{WE}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_{VE}^i, Q_{VE}^i 分别为光储有功、无功功率输出; P_{WE}^i, Q_{WE}^i 分别为风储有功、无功功率输出; $\cos \varphi_{VE}, \cos \varphi_{WE}$ 分别为光储、风储并网功率因数。

2.2 储能充放电模型

储能出力控制模型中需要充分考虑储能电池荷电状态(State of Charge, SOC)维持、充放电功率深度、动作时机等问题。由于整流、逆变单元的存在,储能系统在充放电过程中会有较大的功率损耗,其并网功率与充放电功率的关系为:

$$\begin{cases} P_E = \eta_{out} P_D \\ P_C = \eta_{in} |P_E| \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_C, P_D 分别为储能系统的充、放电功率; η_{in}, η_{out} 分别为储能系统充、放电效率; P_E 为储能系统并网功率。

t 时刻储能电池剩余电量简化为:

$$\begin{cases} E(t) = E_0 - \sum_{h=1}^{t-1} \Delta E^h \\ \Delta E^h = (1 - \sigma)E(h-1) + [\lambda P_C(h) + (1 - \lambda)P_D(h)] \Delta h \end{cases} \quad (6)$$

式中, E_0 为 $t=0$ 时刻的初始电量; E 为储能电池剩余电量; σ 为电池自放电率; λ 为充放电标志, $\lambda=1$ 表示充电, $\lambda=0$ 表示放电; Δh 为充电时间段, 本文 $\Delta h=1h$; $P_C(h), P_D(h), \Delta E^h$ 分别为 h 时段的储能系统的充、放电功率及电池电量变化量。

2.3 收益计算

风光储新能源作为配电网电力供应的新动力,在参与电网调度运行中具有很大经济效益和社会效益。对电网公司而言,一方面可以提高可再生能源的比例,减少碳排放;另一方面,通过合理的调度策略,可以达到削峰填谷、降低网络损耗、提高电压稳定的作用。对新能源供应商而言,则可根据“自发自用,余电上网”的原则,减少购电成本并获取售电收益,其中储能装置还可以从峰谷电价中利用低储高放获得收益。

(1) 发电收益:

$$f_G = \sum_{t=1}^T P_{DG}(t) k_{DG} \Delta t \quad (7)$$

式中, f_G 为分布式新能源的日发电收益; $P_{DG}(t)$ 为风、光、储发电系统的时段 t 的并网功率; k_{DG} 为上网电价; Δt 为发电时间, 本文设计为 $1h$; T 为收益统计时长, 本文取 $T=24h$ 。

(2) 储能峰谷电价差套利收益:

$$f_E = \sum_{t=1}^T P_E(t) h(t) \Delta t \quad (8)$$

式中, f_E 为储能装置依靠低储高放获得收益; $h(t)$ 为分时电价。

(3) 园区光储、风储发电收益:

$$\begin{cases} f_{GE} = \sum_{t=1}^T \{u \Delta P(t) k_{DG} + (1 - u) \Delta P(t) h(t)\} \Delta t \\ \Delta P(t) = |P_{GE}(t) - P_L(t)| \end{cases} \quad (9)$$

式中, f_{GE} 为园区光储、风储的发电收益; P_{GE} 为光储或风储合成出力; P_L 为园区负荷; u 为上网标志, $u=1$ 时表示光储或风储发电大于园区负荷,通过余电上网获得收益, $u=0$ 时表示发电不够,通过节约园区购电成本获得收益。

(4) 节约网损收益:

$$f_L = \sum_{t=1}^T \Delta P_{loss}(t) h(t) \Delta t \quad (10)$$

式中, f_L 为通过降低网络损耗获得电能节约收益; ΔP_{loss} 为网络有功损耗变化量。

(5) 电能质量改善收益:

$$f_D = m_d \sum_{t=1}^T \Delta U_d(t) h(t) \Delta t \quad (11)$$

式中, f_D 为通过提高网络电压质量获得电能改善收益; ΔU_d 为网络电压质量变化量; m_d 为电压质量评价的转换系数。

2.4 约束条件

(1) 功率平衡

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 的有功和无功发电功率; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功和无功负荷功率, 对于风光储并网节点, 用等效负荷代替; V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 电压向量的幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的电导、电纳和相角。

(2) 电压约束

为保证供电稳定性, 配电网的节点电压 V_i 不能超过其运行范围:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (13)$$

式中, V_i^{\max} 、 V_i^{\min} 分别为节点 i 的电压上下限。

(3) 风光出力约束

考虑自然光照强度、风力大小的限制, 风电光伏的有功功率具有最大出力约束:

$$\begin{cases} P_V^{\min} \leq P_V \leq P_V^{\max} \\ P_W^{\min} \leq P_W \leq P_W^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中, P_V^{\max} 、 P_V^{\min} 分别为光伏发电的有功上下限; P_W^{\max} 、 P_W^{\min} 分别为风力发电的有功上下限。 P_V^{\max} 、 P_W^{\max} 采用次日最大预测出力曲线表示。

(4) 储能出力约束

储能系统出力不仅需要考虑充放电功率限制, 为了保证储能电池的使用寿命, 还需要保证储能剩余电量在一定范围内, 同时从日前经济调度出发, 还需要日结储能剩余容量满足一定的期望:

$$\begin{cases} P_C^{\min} \leq P_C \leq P_C^{\max} \\ P_D^{\min} \leq P_D \leq P_D^{\max} \\ E^{\min} \leq E \leq E^{\max} \\ E_{\text{end}} \geq E_e \end{cases} \quad (15)$$

式中, P_C^{\max} 、 P_C^{\min} 分别为充电功率上下限; P_D^{\max} 、 P_D^{\min} 分别为放电功率上下限; E^{\max} 、 E^{\min} 分别为剩余电量上

下限; E_{end} 为日结储能剩余容量; E_e 为储能剩余容量期望。

3 协同进化遗传算法求解

3.1 协同进化遗传算法

在人工智能计算领域, 协同进化是指多个对象通过一定的机制和策略开展协同搜索的进化技术。协同进化算法种类繁多, 协同进化遗传算法是最为广泛应用的一种合作型种群进化算法, 其基本思想是利用“分治”实现种群间合作, 把复杂问题分解成若干子问题以缩小搜索范围, 并由各种群分别求解, 通过多种群合作实现协同评价。

协同进化遗传算法的基本原理如图 1 所示, 算法通过决策变量分组实现子问题的分解, 并为每个子问题指定一个种群进行独立的遗传操作, 然后从各个种群中选出精英个体合成完整决策变量进行适应评价, 并将评价结果及时反馈以调整种群进化方向。最后通过多种群的轮流迭代, 完成协同进化。

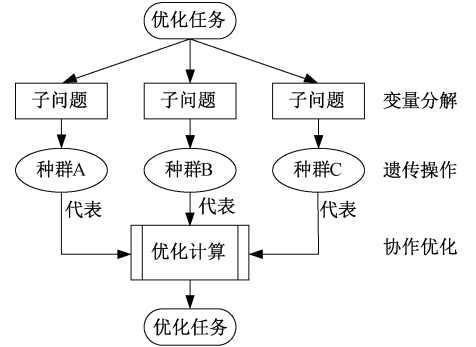


图 1 协同进化算法原理

Fig.1 Theory of co-evolutionary algorithm

3.2 目标函数及控制变量设计

风光储新能源可以为配电网优化运行提供新的调控手段, 本文将以光伏、风力、储能的有功功率输出为控制变量, 通过对风光储出力曲线进行日前优化计算, 以期达到降低网络损耗, 改善电压质量, 提高发电收益的目标。

设配电网中共有 N 个光伏或光储电站, M 个风力或风储电站, H 个储能电站, 并将日前优化时间划分成 T 个时段。同时, 假设 $\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_V, \mathbf{X}_W, \mathbf{X}_E\}$ 是优化目标函数的决策变量集合, 其中, \mathbf{X}_V 、 \mathbf{X}_W 、 \mathbf{X}_E 分别为光伏、风力、储能出力, 并且第 t 个时段内, 第 n 个光伏出力变量为 $x'_{v,n}$, 第 m 个风电出力变量为 $x'_{w,m}$, 第 h 个储能出力为 $x'_{e,h}$, 则控制变量集合为:

$$\mathbf{X}_V = \begin{bmatrix} x_{v,1}^1 & x_{v,1}^2 & \cdots & x_{v,1}^T \\ x_{v,2}^1 & x_{v,2}^2 & \cdots & x_{v,2}^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{v,N}^1 & x_{v,N}^2 & \cdots & x_{v,N}^T \end{bmatrix}$$

(16)

$$\mathbf{X}_E = \begin{bmatrix} x_{e,1}^1 & x_{e,1}^2 & \cdots & x_{e,1}^T \\ x_{e,2}^1 & x_{e,2}^2 & \cdots & x_{e,2}^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{e,M}^1 & x_{e,M}^2 & \cdots & x_{e,M}^T \end{bmatrix}$$

(17)

$$\mathbf{X}_W = \begin{bmatrix} x_{w,1}^1 & x_{w,1}^2 & \cdots & x_{w,1}^T \\ x_{w,2}^1 & x_{w,2}^2 & \cdots & x_{w,2}^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{w,H}^1 & x_{w,H}^2 & \cdots & x_{w,H}^T \end{bmatrix}$$

(18)

根据上述的收益计算,并且考虑算法对不可行解的抑制,构建了如下综合考虑风光储发电收益、降低网络损耗收益、提升电压稳定收益以及越限惩罚函数 $S(X)$ 的目标函数如下:

$$\begin{aligned} \max f(X) = & \omega_1 f_G + \omega_2 f_E + \omega_3 f_L + \\ & \omega_4 f_{EG} + \omega_5 f_D + S(X) \end{aligned}$$

(19)

3.3 算法求解流程

基于协同进化算法的风光储出力优化调度的求解流程如图 2 所示。算法依据新能源类型将决策变量分成光伏控制变量 \mathbf{X}_V 、风力发电控制变量 \mathbf{X}_W 、储能出力控制 \mathbf{X}_E 三组。算法收敛条件设计为 $|f_k - f_{k-1}| \leq \epsilon, \epsilon$ 为一个较小的正数。

4 仿真研究

4.1 仿真模型

本文以 PG&E 69 标准节点算例作为仿真对象,各光伏、风力、储能接入位置如图 3 所示。节点 16、20、18、35 分别接入光伏、风力、风储以及入独立储能系统。其中,光伏组额定功率是 200kW,风机组额定功率是 300kW,独立储能组额定容量是 300kW,风储风机额定功率是 200kW,风储储能额定容量是 100kW。

考虑区域负荷的多样性,并以典型日气象及节点负荷预测为基础,得到各光伏、风力发电的最大出力曲线以及各区域节点负荷曲线如图 4 所示。

此外,本文峰谷平时段及电价设定为:平段时间是[7:00~10:00],电价为 0.66 元/(kW·h);谷段时间是[24:00~6:00]和[17:00~18:00],电价为 0.36 元/(kW·h);峰段时间是[11:00~16:00],电价 1.27 元/(kW·h)。

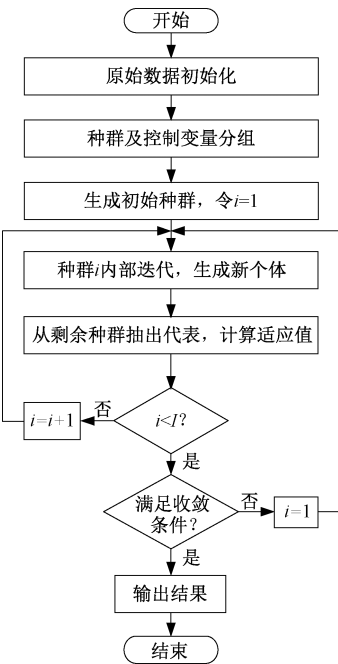


图 2 协同进化遗传算法流程

Fig.2 Flow chart of co-evolutionary genetic algorithm

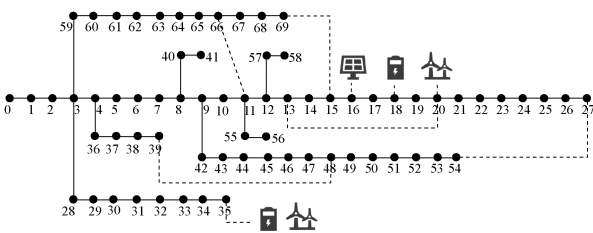


图 3 PG&E 69 节点算例

Fig.3 Bus case of PG&E 69

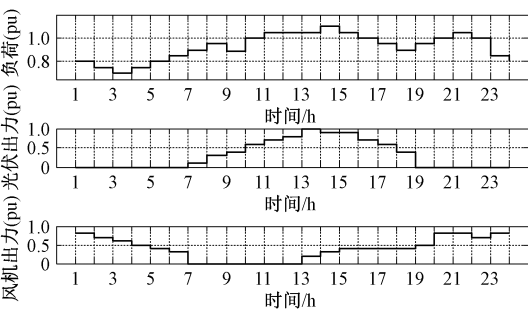


图 4 典型日负荷、光伏及风机预测功率

Fig.4 Predictive power of typical day

4.2 仿真结果

配电网功率损耗如图 5 所示、节点电压波动如图 6 所示,线路重载时段,光伏、风力发电的接入有助于降低配电网的功率传输,减少了网络损耗,提高了节点电压;线路轻载时段,由于潮流功率变化,光伏、风电的接入反而会增加网络损耗,逆向功率的过

多输出也会增加电压越限的风险。由此可知,若对光伏、风力发电的波动性不加以限制,则会极大影响电网的安全稳定运行。

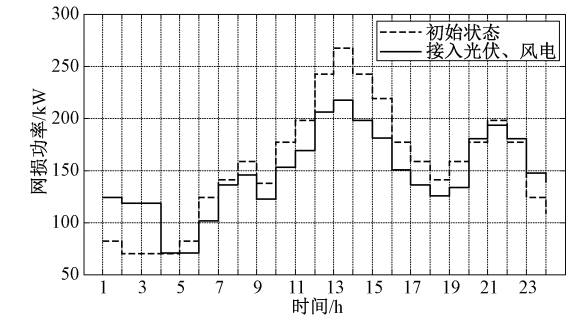


图 5 优化前配电网功率损耗
Fig.5 Power loss of distribution network before optimization

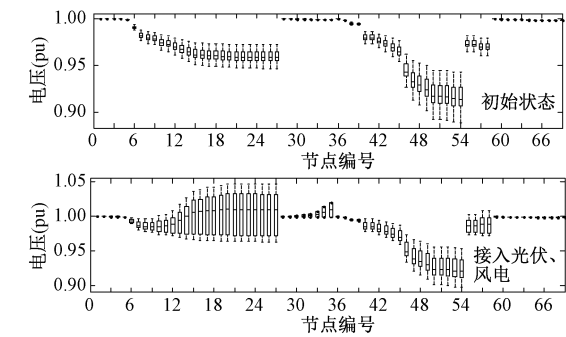


图 6 优化前节点电压波动
Fig.6 Voltage fluctuation before optimization

为保证电网的安全,同时兼顾新能源发电的经济效益,本文建立综合考虑光伏、风力发电收益,网损节约收益,电压稳定收益的目标函数,对光伏、风电出力进行优化控制,配电网功率损耗结果如图 7 所示、节点电压波动如图 8 所示。线路轻载时,电网的电压和网络损耗得到改善,但是风力发电输出被限制,电网弃风现象严重。

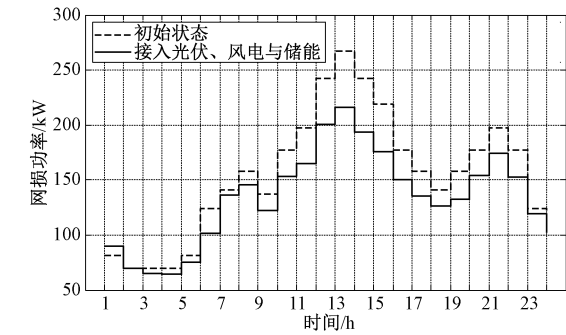


图 7 优化后配电网功率损耗
Fig.7 Power loss of distribution network after optimization

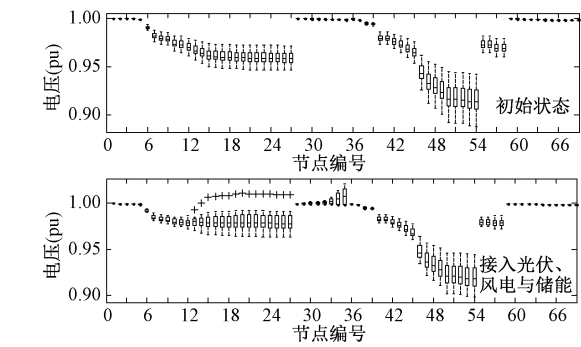


图 8 优化后节点电压波动
Fig.8 Voltage fluctuation after optimization

为进一步提高风力发电的利用率,本文在配电网系统中配置了储能发电系统,利用储能装置的负荷转移作用,优化电网潮流的时空特性,并建立综合考虑光伏、风力发电收益,网损节约收益,电压稳定提高收益,储能套利收益的多目标函数,对光伏、风电出力以及储能充放电曲线进行优化控制。多情景仿真结果见表 1,光伏、风机功率如图 9 所示,电网的电压和网络损耗得到持续改善,并由于储能的吸收作用,电网弃风现象减弱。其中,节点 18 的储能装置出力曲线如图 10 所示,节点 35 的联合储能装置出力曲线如图 11 所示。

表 1 多情景仿真结果						
Tab.1 Simulation results of multi-condition						
项目	光伏收益	风电收益	储能收益	风储收益	网损节约	电压稳定
G1	2944	12462	0	4945	316	-3923
G2	2449	4093	0	3937	478	-315
G3	2693	4447	276	4289	495	-56

注:各类型收益及网损节约、电压稳定、目标函数等效收益单位均为:元。

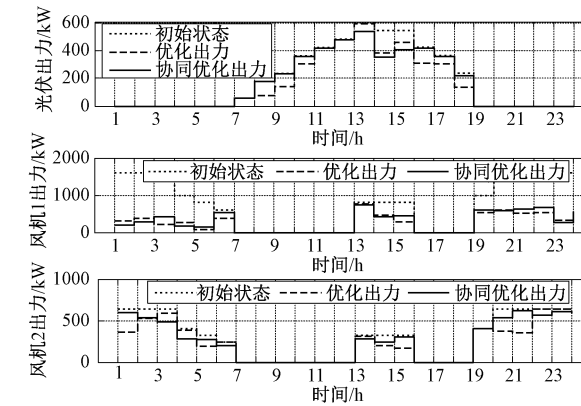


图 9 光伏、风机功率
Fig.9 Power of photovoltaic and wind

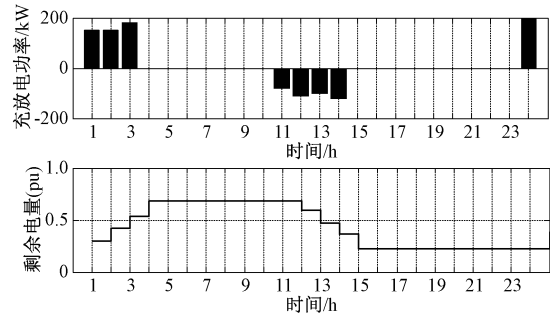


图 10 储能 1 出力
Fig.10 Output of energy storage 1

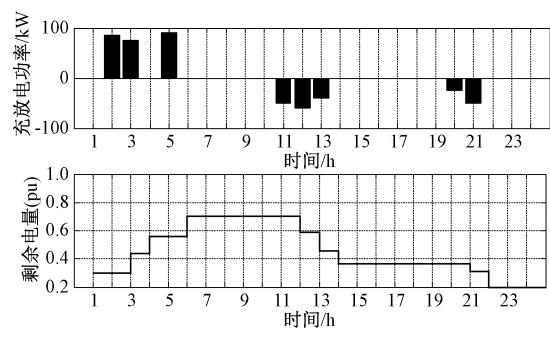


图 11 储能 2 出力
Fig.11 Output of energy storage 2

5 结论

(1)建立了综合考虑网络损耗、电压稳定、风光发电、储能套利等经济效益的风光储联合调度模型,为充分研究风光储联合优化对提高配电网系统经济运行的作用提高了理论支持。

(2)引入了协同进化遗传算法的多种群进化机制对模型进行求解,利用多个种群协同将风光储多变量任务分解成若干子任务以提高优化速度;利用PG&E 69 节点算例,进行了多情景环境的仿真分析,仿真结果验证了算法的有效性。

(3)风光储新能源,特别是储能装置在运行调控中会产生一定的损耗,影响设备使用寿命。综合考虑设备全生命周期的运行成本与发电收益,方可得到更合理的投资回报方案,本文下一阶段工作将对此展开深入研究。

参考文献 (References):

[1] 肖浩,裴玮,孔力,等 (Xiao Hao, Pei Wei, Kong Li, et al.). 综合能源微网运行优化调度方法研究 (Research on optimal operation method of integrated energy microgrid system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced

Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (12): 1-11.

[2] 黄煜,徐青山,蒋贤强,等 (Huang Yu, Xu Qingshan, Jiang Xianqiang, et al.). 含新能源接入的区域电网低碳电力调度方法 (A low-carbon regional power dispatch method with integration of renewable energy sources) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (12): 19-26.

[3] 李盛伟,李鹏飞,白星振,等 (Li Shengwei, Li Pengfei, Bai Xingzhen, et al.). 计及储能和用户需求响应的并网型微网优化调度模型 (Optimal scheduling model of grid-connected microgrid considering effects of demand response and energy storage) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (9): 51-58.

[4] 朱永强,赵娜,王福源,等 (Zhu Yongqiang, Zhao Na, Wang Fuyuan, et al.). 能源互联网中多种储能的协调 (Energy storage coordination among various energy networks in Energy Internet) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 10-16.

[5] 娄素华,杨天蒙,吴耀武,等 (Lou Suhua, Yang Tianmeng, Wu Yaowu, et al.). 含高渗透率风电的电力系统复合储能协调优化运行 (Coordinated optimal operation of hybrid energy storage in power system accommodated high penetration of wind power) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (7): 30-35.

[6] 孙冰莹,杨水丽,刘宗歧,等 (Sun Bingying, Yang Shuili, Liu Zongqi, et al.). 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示 (Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (11): 8-16, 38.

[7] 厉伟,颜宁,张博,等 (Li Wei, Yan Ning, Zhang Bo, et al.). 基于情景分析法风电场中储能系统经济调度 (Economic dispatch of energy storage system in wind farm based on scenario analysis method) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (2): 47-52.

[8] 修晓青,唐巍,李建林,等 (Xiu Xiaoqing, Tang Wei, Li Jianlin, et al.). 基于层次分析法的储能配置综合评估技术 (Comprehensive evaluation technology of energy storage configuration based on analytic hierarchy process) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (11): 72-78.

[9] 吴杰,温晨阳,李珊,等 (Wu Jie, Wen Chenyang, Li

- Shan, et al.). 基于分时电价的光伏-储能系统容量优化配置 (Optimal allocation of PV and accumulator system based on time-of-use price) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 23-30.
- [10] 王林川, 高云鹏 (Wang Linchuan, Gao Yunpeng). 平抑光伏出力波动的混合储能系统控制策略设计 (Design of hybrid energy storage system control strategy to suppress output fluctuations of photovoltaic generation system) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2015, 52 (14): 49-54.
- [11] 朱泽锋, 赵晋泉, 魏文辉, 等 (Zhu Zefeng, Zhao Jinquan, Wei Wenhui, et al.). 主动配电网中电池储能系统最优充放电策略 (Optimal charging and discharging scheme of battery energy storage system in active distribution network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (20): 47-53, 99.
- [12] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等 (Li Xiulei, Geng Guangfei, Ji Yuqi, et al.). 考虑实际运行的配电网电池储能系统的优化配置研究 (Study on optimal allocation of battery energy storage in distribution network considering the actual operation) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2017, 45 (9): 88-94.
- [13] 刘健, 雷霞, 闵伟成, 等 (Liu Jian, Lei Xia, Min Weicheng, et al.). 考虑负荷与分布式电源随机性的配电网无功优化 (Dynamic reactive power optimization of distribution network considering randomness of load and distributed generation) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2016, 53 (12): 92-97, 128.
- [14] 张宏立, 李远梅 (Zhang Hongli, Li Yuanmei). 基于滤子混合协同进化算法的无功优化 (The research of reactive power flow based on filter hybrid co-evolutionary algorithms) [J]. 控制与决策 (Control and Decision), 2017, 32 (9): 1701-1706.
- [15] 王凌, 沈婧楠, 王圣尧, 等 (Wang Ling, Shen Jingnan, Wang Shengyao, et al.). 协同进化算法研究进展 (Advances in co-evolutionary algorithms) [J]. 控制与决策 (Control and Decision), 2015, 30 (2): 193-202.

Economic dispatch of distribution network with wind-solar-battery system based on co-evolutionary genetic algorithm

XU Duo-hong, GUO Jing-qi, DING Xiao-yun, DING Jia-yong

(State Grid Gansu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Lanzhou 730046, China)

Abstract: Under conditions of current weather and load curve forecasting, and considering the economic benefits of network loss, voltage stability, wind-solar power generation and energy storage arbitrage, a hybrid power dispatch model of wind-solar-battery system is established. The multi-population evolutionary mechanism of co-evolutionary genetic algorithm is introduced to solve the coordination problem between the randomness of photovoltaic and wind power generation and the limited time sequence of energy storage charge-discharge. The output of photovoltaic, wind and energy storage is optimized by using multiple populations, and the target is optimized through the overall ecological evolution of the population. Finally, a multi-scenario simulation analysis was carried out with the example of PG&E69 node, and the simulation results fully verified the effect of the combined optimization of landscape storage on improving the economic operation of the distribution network system.

Key words: dispatch of wind-solar-battery system; economic operation; co-evolutionary; genetic algorithm