

离网型微电网优化运行策略研究

何瑞东¹,周文²,路艳巧¹,刘烨³,李卓君²,蒋曦⁴

(1. 国网河北省电力有限公司,河北 石家庄 050000;2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院,河北 石家庄 050000;3. 国网河北省电力有限公司石家庄供电分公司,河北 石家庄 050000;4. 国网河北省电力有限公司沧州供电分公司,河北 沧州 061000)

摘要: 目前对微电网的研究主要集中在并网模式,而对离网模式的研究较少。在满足离网型微电网电能质量等供电需求的情况下,考虑风/光/柴/储的出力约束及启停成本,构建了离网型微电网经济优化模型,在提高可再生能源利用率的同时,优化系统的经济性运行。再者,通过算例分析,对比了专家策略和所提优化策略。最后,通过不同时间尺度仿真分析,验证了所提优化策略的优越性。

关键词: 离网型微电网;优化策略;利用率;经济性

中图分类号: TM614 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd21309

Research on Optimal Operation Strategy of Islanded Microgrid

HE Ruidong¹, ZHOU Wen², LU Yanqiao¹, LIU Ye³, LI Zhuojun², JIANG Xi⁴

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China ;2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Power Science Research Institute, Shijiazhuang 050000, Hebei, China ;3. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Shijiazhuang Power Supply Company, Shijiazhuang 050000, Hebei, China ;4. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Cangzhou Power Supply Company, Cangzhou 061000, Hebei, China)

Abstract: At present, there are more studies on grid-connected microgrids, but less on islanded microgrids. In order to meet the power supply requirements of islanded microgrids such as power quality, an islanded microgrid economic optimization model was constructed considering the output constraints and start-stop costs of wind/PV/diesel/storage. It could not only improve the utilization of renewable energy, but also optimize the economical operation of the system. Furthermore, the expert strategy and the optimization strategy proposed were compared through examples analysis. Finally, the superiority of the optimization strategy proposed was verified through different time scale simulation analysis.

Key words: islanded microgrid; optimization strategy; utilization; economy

全球能源的逐渐枯竭和环境问题的日益突出,加快了风电、光伏等分布式能源的发展进程。但分布式能源大规模并网时,其出力的随机性和不确定性会对电网的频率、电压和电能质量等带来较大影响^[1-3]。而微电网作为分布式能源的有效利用形式,为解决上述问题提供了技术可行性。微电网既能够并网运行,有效补充大电网;也可以离网运行,为独立区域提供可靠供电^[4-7]。

离网型微电网是由多种分布式电源、柴油机/微燃机、储能、负荷等组成的小型供电系统,能够

实现区域管理和自治^[8-9]。为了保证离网型微电网中源侧和负荷侧的能量平衡,需要进行系统级的能量管理与控制,实现分布式能源的高效利用及个性化电能的安全、可靠、优质供应,最终实现离网型微电网的经济性运行。

目前,在离网型微电网的运行控制方面开展了一些研究。文献[10]在微网孤岛运行模式中,考虑分布式电源的发电成本、环境成本以及维护成本,优化微网内不同分布式电源和储能的出力,从而使系统的总运行成本最小。文献[11]在

基金项目: 国网技术改造项目(CN201810020)

作者简介: 何瑞东(1982—),男,硕士,高级工程师,Email: ruidonghe@126.com

兼顾光伏最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)运行的同时,设计了基于BP神经网络算法的PID控制器,以控制柴油机的转速,进而调节其功率输出,以达到维持光、柴独立微网系统频率恒定的目的。文献[12]研究了微网中的需求侧管理与调度方法,建立了孤岛型微网能量管理的优化调度模型。文献[13]建立了以微电网系统运行维护成本和环保效益为目标函数的优化调度模型,并采用基于评价函数的交互式多目标优化方法进行多目标转换。文献[14]提出了一种基于需求侧响应的实时调度方法,进而建立负荷优化分配模型,实现各可控型微源的出力优化,从而减小微网的运行成本。文献[15]提出了一种分布式发电与负荷协调控制的能量管理策略。文献[16]以某海岛微网为例,通过建立的能量管理系统提高了可再生能源的利用率。文献[17]提出一种考虑可转移负荷效率的风/光/柴/储微网能量优化控制方法,并在制淡水负荷一定的情况下,验证了该策略的成本优势。文献[18]为保证分布式电源出力和负荷波动时,微网系统中的能量平衡及快速响应,提出了一种分布式发电和蓄电池之间的协同控制能量管理策略。

本文在上述研究的基础上,在实现离网型微电网经济性运行的同时,使可再生能源的利用率最大化。首先,考虑各单元的出力特性约束,建立离网型微电网经济性运行策略。然后,通过专家策略和本文所提优化策略的对比,分析本文所提优化策略的优势。最后,通过不同时间尺度的仿真,量化了本文所提优化策略的经济性,这可以为离网型微电网的运行提供理论参考。

1 离网型微电网经济性运行优化策略

本文建立的离网型微电网如图1所示,包括光伏、风电、储能、柴油机和负载。其能量管理系统能够对各单元进行实时监控,并通过优化策略实现微电网的高效可靠运行。

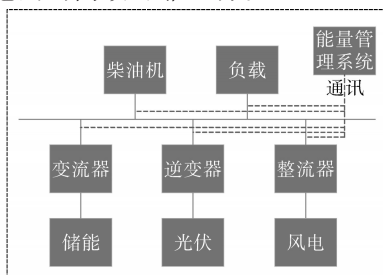


图1 离网型微电网拓扑图

Fig.1 Islanded microgrid topology

在满足供电需求的情况下,以系统经济成本最低为优化目标,对系统各单元进行实时监控,优先采用发电成本较低的分布式能源进行供电。另外,在系统运行过程中最大化利用分布式能源,以提高其利用率。分布式能源利用率 r 计算如下:

$$r = \frac{P_{\text{res}}}{P_{\text{d}} + P_{\text{res}}} \quad (1)$$

式中: P_{res} 为分布式能源出力; P_{d} 为柴油机出力。

进而,系统应满足以下的不等式关系:

$$P_{\text{d}} = \sum_{t=1}^{24} P_{\text{d}}(t) \leq \frac{1-C}{C} \left\{ \sum_{t=1}^T [P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{w}}(t)] \right\} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{d}}(t)$, $P_{\text{pv}}(t)$, $P_{\text{w}}(t)$ 分别为每h柴油机、光伏单元、风机的输出功率; C 为可再生能源渗透率。

以离网型微电网经济性为优化目标,同时考虑供需平衡、各单元出力的约束,进而考虑发电单元启停费用和发电特性,优化系统运行以满足负荷的需求,使系统整体经济性成本最低。

构建离网型微电网优化控制的目标函数:

$$\min C_{\text{total}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_i(t) B_{Gi}(t) P_{Gi}(t) + S_{Gi} |u_i(t) - u_i(t-1)|] + C_{\text{bat}} \quad (3)$$

式中: N 为系统中发电单元的个数; $u_i(t)$ 为 t 时刻发电单元的开、关机状态,等于1时,表示开机,等于0时,表示关机; P_{Gi} 为第 i 个发电单元出力; S_{Gi} 为第 i 个单元的启停成本; $B_{Gi}(t)$ 为第 i 个发电单元 t 时刻的成本; C_{bat} 为单位运行周期内储能的运行费用。

柴油机的能耗成本为

$$C_{\text{d}} = a + bP_{\text{d}} + cP_{\text{d}}^2 \quad (4)$$

式中: a , b , c 分别为系数,取值分别为 $a=3.2584$, $b=1.7544$, $c=0.0556$ 。

储能的运行成本与其输出功率成正比:

$$C_{\text{bat}} = \alpha P_{\text{E}} \quad (5)$$

铅酸电池储能的比例系数 α 为0.0832。

约束条件如下。

1.1 功率平衡约束

功率平衡约束条件如下:

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi} + \sum_{j=1}^M P_{Ej} = \sum_{k=1}^S P_{Lk} \quad (6)$$

式中: P_{Ej} 为第 j 个储能出力; P_{Lk} 为第 k 个负荷功率; M 为储能个数。

1.2 备用设备启停约束

备用设备启停约束条件如下:

$$\sum_{i=1}^N u_i(t) P_{Gi}^{\max} + \sum_{j=1}^M P_{Ej} \geq \sum_{k=1}^S P_{Lk} \quad (7)$$

式中: $P_{Gi}^{\max}$ 为第 i 个发电单元的最大出力约束。

式(7)成立,表明目前启动的发电单元能够满足负荷的需求;反之,则需要开启下一个发电单元。

1.3 发电单元出力约束

发电单元出力约束条件如下:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (8)$$

式中: $P_{Gi}^{\min}$ 为第*i*个发电单元的最小出力约束。

1)柴油机出力约束。柴油机应该运行在一定功率范围之内,否则会影响柴油机的使用效率与经济性。

$$k_d P_{\text{drate}} \leq P_d(t) \leq P_{\text{drate}} \quad (9)$$

式中: P_{drate} 为柴油机额定出力; k_d 为柴油机最小出力对应的比例系数。

2)风机、光伏出力约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_w(t) \leq P_{w_max} \\ 0 \leq P_{pv}(t) \leq P_{pv_max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{w_max} , P_{pv_max} 分别为风机、光伏最大出力。

1.4 储能约束

储能约束条件如下:

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (11)$$

$$0 \leq |P_E(t)| \leq P_{E\max} \quad (12)$$

式中: $SOC(t)$ 为*t*时段储能剩余容量(state of charge, SOC)约束; $SOC_{\min}$ 为最小值; $SOC_{\max}$ 为最大值; $P_E(t)$ 为*t*时刻储能出力约束。

基于上述模型,利用二次规划方法求解,从而保障系统的最优运行。

2 算例分析

基于Matlab构建微电网系统,包括风机3 kW、光伏100 kW、柴油机100 kW和储能100 kW·h,采用专家策略和本文所提的优化策略进行对比,进而证明本文所提微电网能量管理策略的有效性。

专家策略^[19]介绍如下:1)当分布式能源出力大于负荷功率时,柴油机不启动,储能吸收过剩功率。当过剩功率超出储能的充电功率限制,或者储能SOC达到上限时,分布式能源限功率运行。2)当分布式能源和储能的总出力小于负荷功率时,启动柴油机。当柴油机运行在功率区间下限,且储能系统达到充电功率限制或者SOC达到上限,分布式能源限功率运行;当柴油机运行在功率区间上限,且储能达到放电功率限制或者SOC达到下限,柴油机变为满功率运行。

2.1 优化策略

选取晴天和非晴天两种典型天气进行仿真,其中光伏、风电和负载功率仿真波形如图2~图5所示。风电非晴天的出力和晴天相比,虽然有一

定的变化,但是由于风电装机容量较小,其出力变化较小;再者,对于整个微电网来看,风电非晴天的出力变化对系统的影响很小,几乎可以忽略不计,因此本文假定非晴天和晴天的出力相同。

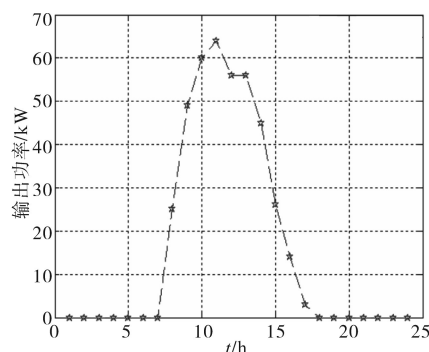


图2 光伏出力(晴天)

Fig.2 Photovoltaic power (sunny day)

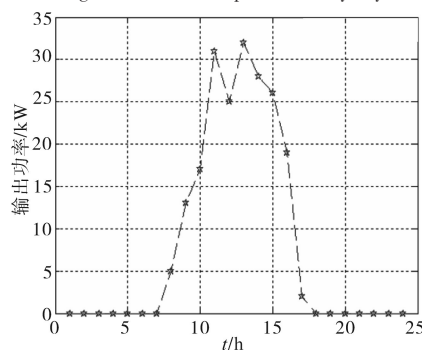


图3 光伏出力(非晴天)

Fig.3 Photovoltaic power (not sunny day)

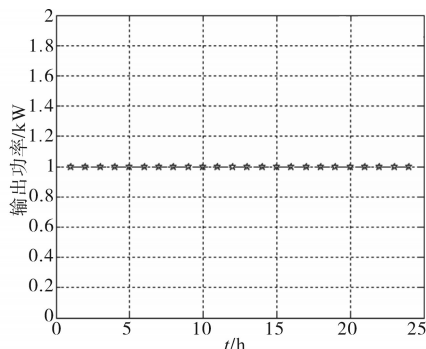


图4 风电出力

Fig.4 Wind power

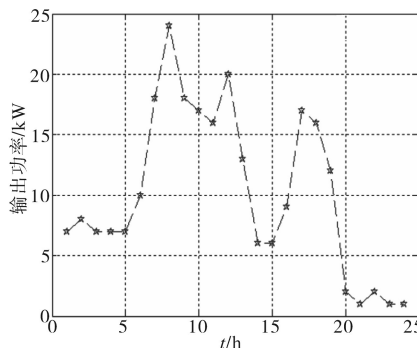


图5 负载功率

Fig.5 Load power

专家模式下各单元出力曲线(晴天)如图6所示。专家策略下储能SOC曲线(晴天)如图7所示。晴天的时候,主要由光伏、风电和储能向负载供电,柴油机处于关机状态。初始时刻可再生能源出力不足,主要由储能向负载供电,随着光伏出力的逐渐增大,光伏替代储能给负载供电,当光伏出力大于负载功率时光伏给储能充电,16点时储能SOC达到上限,如图7所示,随后光伏限功率运行。该策略下系统运行成本为229.65元,主要为储能的运行成本,柴油机一直处于关闭状态,其运行成本为0元,此时计算可再生能源利用率为58.67%。

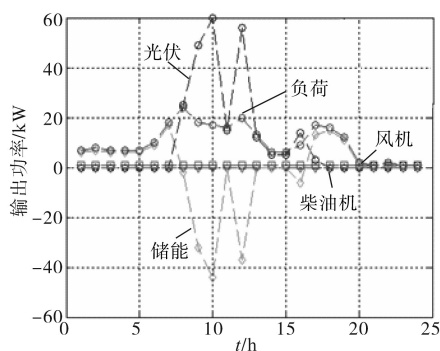


图6 专家策略下各单元出力(晴天)

Fig.6 Each unit power with expert strategy (sunny day)

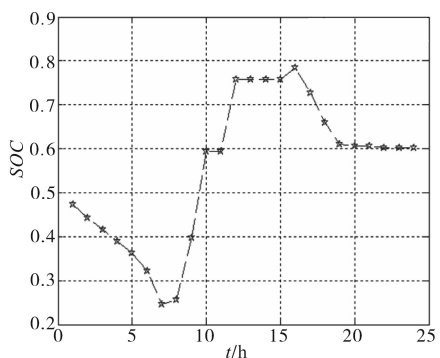


图7 专家策略下储能SOC(晴天)

Fig.7 Energy storage SOC with expert strategy (sunny day)

专家策略下系统各单元的出力结果(非晴天)如图8所示。与图6对比可得,非晴天时候,由于可再生出力不足,主要由储能对负载供电,8点时SOC较低,此时开启柴油机向储能充电,当SOC达到上限时柴柴油机关闭,该过程中主要由可再生能源向负载供电。当可再生能源功率不足时,储能再继续向负载提供电能。储能SOC如图9所示。该模式下的系统运行成本为532.9元,其中柴油机运行成本为295.3元,储能运行成本为237.6元,可再生资源利用率为55.86%。

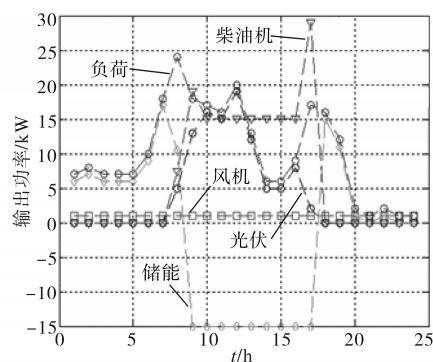


图8 专家策略下各单元出力(非晴天)

Fig.8 Each unit power with expert strategy (not sunny day)

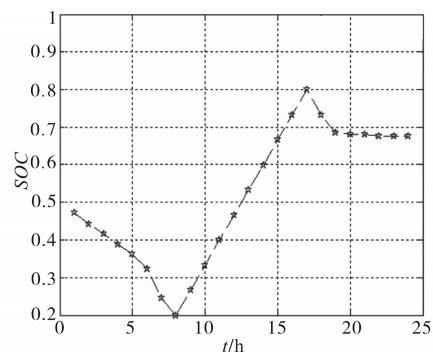


图9 专家策略下储能SOC(非晴天)

Fig.9 Energy storage SOC with expert strategy (not sunny day)

综上,专家模式下,当可再生能源出力不足时,系统的运行费用会大大增加,主要为柴油机运行成本。

优化策略的晴天模式下,系统各单元运行结果如图10、图11所示。与专家模式一样,可再生能源出力充足时,柴油机处于停机状态。在8~16时可再生出力大于负载功率,多余功率给储能充电,16点时达到SOC上限。之后光伏出力逐渐减小,且负载功率逐渐增大,储能放电以满足负载的需求。该模式下系统运行成本为218.05元,柴油机运行成本为0元,储能运行成本为218.05元,可再生能源利用率为58.77%。

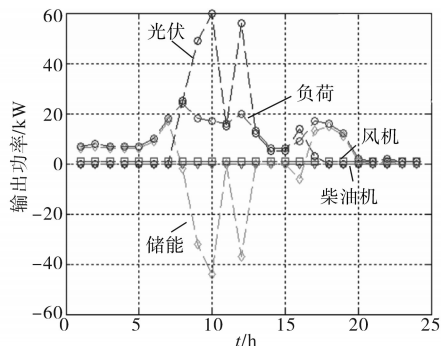


图10 优化策略下各单元出力(晴天)

Fig.10 Each unit power with optimization strategy (sunny day)

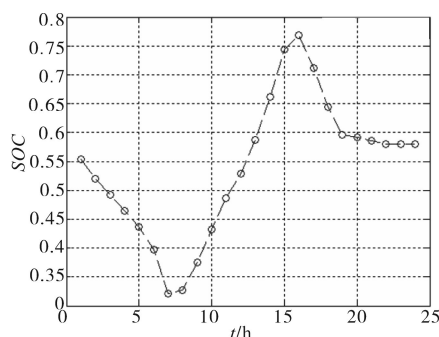


图11 优化策略下储能SOC(晴天)

Fig.11 Energy storage SOC with optimization strategy (sunny day)

优化策略下的非晴天仿真结果如图12所示。优化策略下的非晴天储能SOC结果如图13所示。在非晴天的时候主要依靠可再生能源和光伏供电,在两者均不足的情况下才启动柴油机,与图8相比,柴油机的出力大大减小。该模式系统的运行成本为260.86元,柴油机运行成本为42.32元,储能运行成本为218.54元,可再生能源利用率为99.55%。

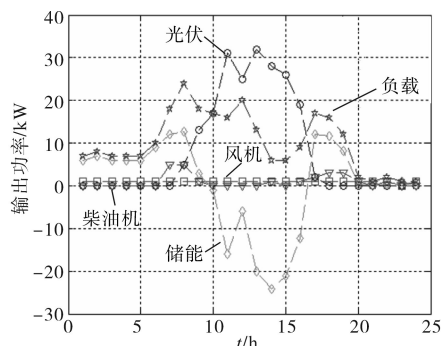


图12 优化策略下各单元出力(非晴天)

Fig.12 Each unit power with optimization strategy (not sunny day)

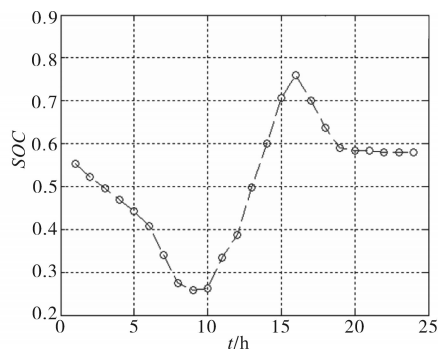


图13 优化策略下储能SOC(非晴天)

Fig.13 Energy storage SOC with optimization strategy (not sunny day)

将专家策略和优化策略进行对比,如表1所示。

表1 系统运行费用与可再生能源利用率

Tab.1 System operating costs and renewable energy efficiency

策略	总费用/ 元	柴油机费用/ 元	储能费用/ 元	r/%
专家策略(晴天)	229.65	0.00	229.65	58.67
优化策略(晴天)	218.05	0.00	218.05	58.77
专家策略(非晴天)	532.90	295.30	237.60	55.86
优化策略(非晴天)	260.86	42.32	218.54	99.55

从表1可以看出,优化策略下的可再生能源与专家策略基本相同,因为在储能的调节下,柴油机不用启动,可再生出力基本全部消纳,以满足负载需求。虽然两种策略下都充分利用了可再生能源发电,专家策略下的运行成本高于优化策略,增加了5.32%。这是因为优化策略下,储能的运行得到了优化,不会出现过充、过放等现象,经济性较好。

再者,非晴天时候,优化策略下的运行成本较专家策略降低了49.02%,同时可再生能源利用率提高了43.69%。这就说明在可再生能源出力与负载需求相匹配时,优化策略能够最大化的利用可再生能源进行供电。而专家策略下由于优先使用储能供电,在光伏出力还未达到负载功率时储能已经处于低SOC状态,这时为了保证系统正常运行,需启动柴油机供电。因此,两种策略下,储能的运行成本基本相同,主要的成本差异是由柴油机产生的。

综上所述,优化策略在运行成本和可再生资源利用方面均优于专家策略。

2.2 多时间尺度下的优化策略分析

为了进一步证明优化策略的优越性,本文对不同的时间尺度进行了仿真,包括7 d,15 d,30 d,仿真结果如下。

2.2.1 连续运行7 d

连续运行7 d两种策略对比图如图14所示。从图14可以看出,优化策略下的仿真结果优于专家策略,前者中的储能一直运行在可再生能源有效调节的情况下,其放电深度明显低于专家策略下的放电深度,能够提高储能的使用寿命。连续运行7 d系统运行费用与可再生能源利用率如表2所示。从表2可以看出,优化策略下系统运行成本、柴油机运行成本和储能运行成本分别低于专家策略11.0%,4.62%,23.91%,但前者的可再生能源利用率较后者高出1.68%。

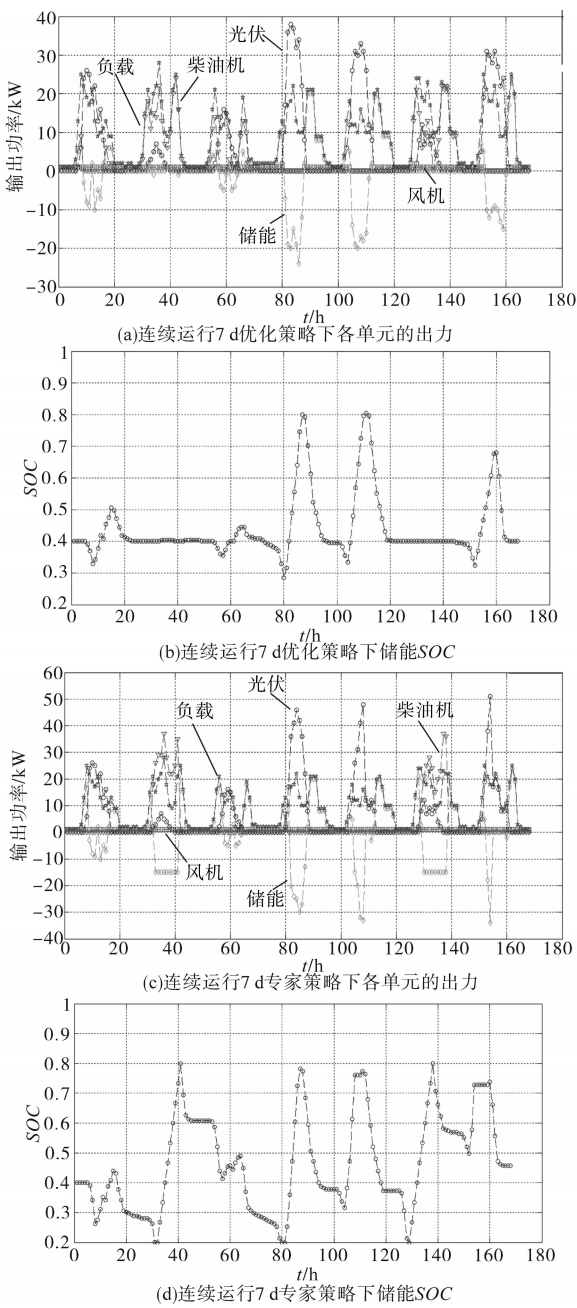


图14 连续运行7天两种策略对比图
Fig.14 The result of two strategies with 7 days

策略	综合成本/元	柴油机费用/元	储能费用/元	r/%
优化策略	3 110.98	910.80	1 082.12	83.09
专家策略	3 495.13	954.95	1 422.12	81.41

2.2.2 连续运行 15 d

连续运行 15 d 两种策略对比图如图 15 所示。根据图 15 的仿真结果可以获得系统在两种策略下连续运行 15 d 的仿真数据如表 3 所示。

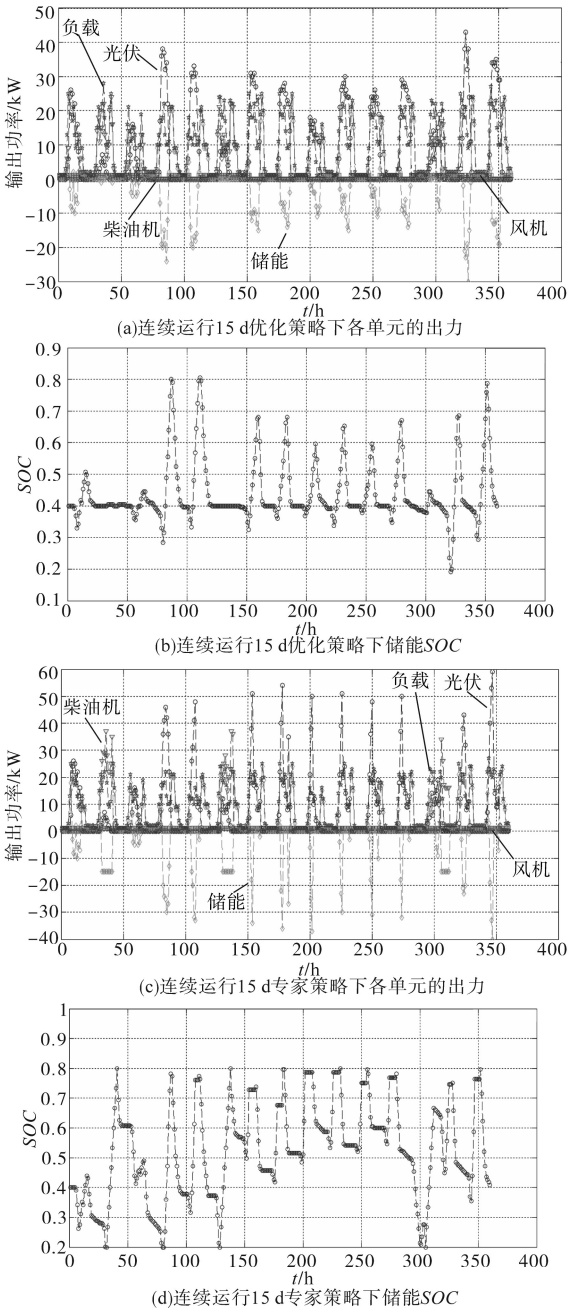


图15 连续运行15天两种策略对比图
Fig.15 The result of two strategies with 15 days

策略	综合成本/元	柴油机费用/元	储能费用/元	r/%
优化策略	5 071.08	1 116.88	2 277.12	69.22
专家策略	5 667.09	1 219.91	2 770.10	66.12

优化策略下系统运行成本、柴油机运行成本和储能运行成本分别低于专家策略 10.5%, 8.45%, 17.80%, 但前者的可再生能源利用率较后者高出 3.1%。可见随着运行时间的延长, 优化策

略的优势越显著。

2.2.3 连续运行30 d

连续运行30 d两种策略对比图如图16所示。

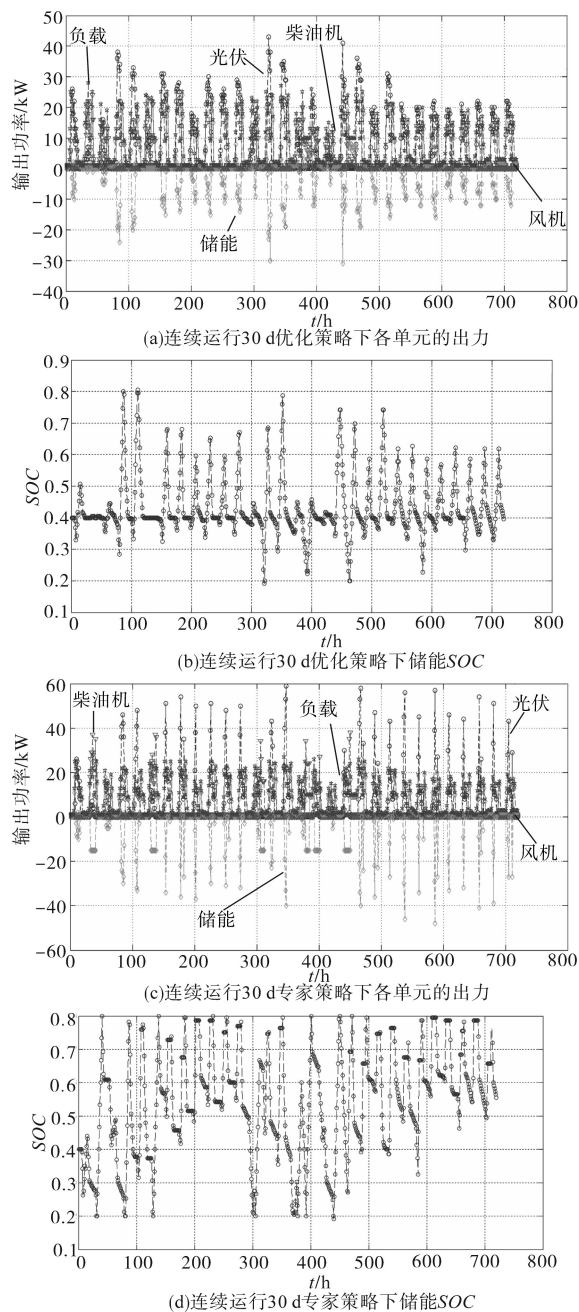


图16 连续运行30 d两种策略对比图

Fig.16 The result of two strategies with 30 days

根据上述仿真结果可以获得系统在两种策略下连续运行30 d的仿真数据如表4所示。

表4 连续运行30 d系统运行费用与可再生能源利用率

Tab.4 System operating costs and renewable energy efficiency with 30 days

策略	综合成本/元	柴油机费用/元	储能费用/元	r/%
优化策略	9 442.41	1 784.80	4 576.00	60.22
专家策略	10 750.34	2 152.79	5 243.38	54.17

优化策略下系统运行成本、柴油机运行成本和储能运行成本均低于专家策略,分别低于12.1%,17.10%,12.73%,但前者的可再生能源利用率高出后者6.05%。随着运行时间的增加,优化策略的优势明显增加。

3 结论

本文考虑风光储柴的特性和约束,构建了离网型微电网经济性优化运行模型,并通过二次规划方法求解,实现了各单元的功率优化分配运行。通过算例分析,将专家策略和本文所提优化策略进行了对比,本文所提优化策略能够在成本较小的情况下,提高可再生能源的利用率。最后,通过7 d,15 d和30 d的仿真尺度,进一步验证了本文优化策略的有效性,随着时间尺度的延长,本文所提优化策略下的可再生能源利用率和系统经济性优势越得到发挥。因此,本文的研究对改善离网型微电网电能质量和提高系统的优化运行具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] GAO F, TANG W, YAN T, *et al.* Day-ahead energy optimal scheduling of household microgrid considering the user satisfaction[C]//Power and Energy Engineering Conference, New York, USA, 2016:1-5.
- [2] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [3] Luo JQ, Shi LB, Ni YX. A solution of optimal power flow incorporating wind generation and power grid uncertainties[J]. IEEE Access, 2018, 6: 19681-19690.
- [4] 周贤正,荣飞,吕志鹏,等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51.
- [5] Zeng Z, Zhao R, Yang H, *et al.* Policies and demonstrations of micro-grids in China: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 701-718.
- [6] 徐少华,李建林. 光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 25-33.
- [7] 张晓雪,牛焕娜,赵静翔. 含微电网的配电网优化调度[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 165-173.
- [8] 徐少华,李建林,惠东. 多储能逆变器并联系统在微网孤岛条件下的稳定性分析及其控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3266-3273.
- [9] 曾正,邵伟华,李辉,等. 孤岛微网中虚拟同步发电机不平衡电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 372-380.
- [10] 朱博,陈民铀,徐瑞林,等. 孤岛模式下的微网优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 35-40.

(下转第80页)

- tem for sightseeing car supercapacitor charge[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3301–3316.
- [6] 朱望诚, 谢振超, 万信书. 基于无线电能传输技术的电动汽车 V2G 系统关键参数监测技术[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 8–14.
- [7] Nagendra G R, Covic G A, Boys J T. Sizing of inductive power pads for dynamic charging of EVs on IPT highways[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(2): 405–417.
- [8] Lee E S, Choi B H, Nguyen D T, *et al.* Static regulated multi-stage semiactive LED drivers for high-efficiency applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6543–6552.
- [9] Yao Y, Wang Y, Liu X, *et al.* A novel unsymmetrical coupling structure based on concentrated magnetic flux for high-misalignment IPT applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3110–3123.
- [10] Li S, Li W, Deng J, *et al.* A double-sided LCC compensation network and its tuning method for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2261–2273.
- [11] Wang Y, Mai J, Yao Y, *et al.* Analysis and design of an IPT system based on S/SP compensation with improved output voltage regulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3256–3266.
- [12] Choi S Y, Gu B W, Lee S W, *et al.* Generalized active EMF cancel methods for wireless electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 11(29): 5770–5783.
- [13] 刘晓胜, 顾轩溥, 姚友素, 等. 基于电容调制的无线电能传输系统信号电能同步传输[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 140–146, 154.
- [14] 赵争鸣, 张艺明, 陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 1–13, 21.
- [15] SAE TIR J2954_201904. Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology[S]. SAE International, 2019.
- [16] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [17] Yan Z, Zhang Y, Zhang K, *et al.* Fault-tolerant wireless power transfer system with a dual-coupled LCC-S topology[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12): 11838–11846.
- [18] Wang Y, Yao Y, Liu X, *et al.* S/CLC compensation topology analysis and circular coil design for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(2): 496–507.
- [19] Hou J, Chen Q, Wong S, *et al.* Analysis and control of series/series-parallel compensated resonant converter for contactless power transfer[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 124–136.
- [20] Steigerwald R L. A comparison of half-bridge resonant converter topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(2): 174–182.

收稿日期: 2020-01-13

修改稿日期: 2020-03-02

—————
 (上接第 65 页)

- [11] 胡钢, 范伟东, 李忠. 基于 BP 神经网络光柴孤网运行优化控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 129–134.
- [12] 张忠, 王建学, 曹晓宇. 基于负荷分类调度的孤岛型微网能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 17–23.
- [13] 聂瀚, 杨文荣, 马晓燕, 等. 基于改进鸟群算法的离网微电网优化调度[J]. 燕山大学学报, 2019, 43(3): 228–237.
- [14] 杨明玉, 韩旭. 基于需求侧响应的微网孤网运行实时调度策略研究[J]. 现代电力, 2015, 32(4): 12–18.
- [15] Bourouni K, Ben M' Barek T, Al Taei A. Design and optimization of desalination reverse osmosis plants driven by renewable energies using genetic algorithms[J]. Renewable Energy, 2011, 36(3): 936–950.
- [16] 王坤林, 游亚戈, 张亚群, 等. 海岛可再生独立能源电站能量管理系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 13–17.
- [17] 魏繁荣, 随权, 林湘宁, 等. 考虑可转移负荷效率的风/光/柴/蓄孤岛微网日运行能量控制优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1045–1053.
- [18] 姜世公, 李琰, 王卫. 一种微网系统孤岛运行条件下的能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 130–135.
- [19] 包侃侃. 考虑需求侧响应的微电网优化配置研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.

收稿日期: 2019-12-25

修改稿日期: 2020-01-05