

DOI: 10.7667/PSPC151073

计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置

许健¹, 刘念¹, 于雷¹, 雷金勇², 张建华¹

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080)

摘要: 工业光伏微电网配置储能时需考虑其负荷特性, 在保证供电可靠性的前提下最大化提升光伏利用率。在详细分析工业重要负荷的运行特性和启动冲击特性基础上, 结合工业分时电价机制, 给出了适合工业微电网的储能系统充放电策略。进而以光伏利用率最大和年净利润最大为目标, 构建了工业光伏微电网的储能容量优化配置的多目标优化模型, 并采用 NSGA-II 算法对所建模型进行求解。将优化方法应用于广东某实际工业光伏微电网中, 结果表明经过优化的储能系统可在离网情况下保证系统中重要负荷的稳定运行, 在并网运行时促进光伏的就地消纳。

关键词: 工业光伏微电网; 重要负荷; 储能优化配置; 光伏消纳率; 多目标优化

Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load

XU Jian¹, LIU Nian¹, YU Lei¹, LEI Jinyong², ZHANG Jianhua¹

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The load characteristics should be considered in allocation of energy storage for industrial PV microgrid. The purposes of the allocation are ensuring the reliability of power supply and improving the photovoltaic utilization. The paper analyzes the operating characteristics and the impact of starting feature of industry sensitive loads in the PV microgrid for industries. In this paper, energy storage system charging and discharging control strategy based on industry time of use electricity price (TOU) mechanism which is applicable to industrial PV microgrid is proposed. Based on the analysis of main issues of the problem, a multi-objective optimization model is proposed and optimization approach based on NSGA-II algorithm is presented to search the optimal solution. The proposed operating strategy and optimization method are then tested on a Guangdong photovoltaic micro-grid. Results demonstrate that the optimized storage system can meet the requirement of expectation of system uptime under extreme conditions when operate autonomously and improve the PV power consumption rate while interconnect to the grid.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2014AA052001).

Key words: industrial PV microgrid; important load; capacity optimal allocation; photovoltaic power consumptive rate; multi-objective optimization

0 引言

工业用户属于典型的高耗能类型负荷, 用电量较大, 对供电可靠性要求高。近年来, 随着光伏产业政府补贴政策力度的加大和光伏组件价格的显著下降, 已经有越来越多的投资商将光伏微电网发电模式引入到工业领域。光伏微电网模式的普及能够减轻工业领域对化石资源的依赖, 具有重大的节能和环保效益^[1-9]。

为了保证工业微电网的供电可靠性, 最大限度利用光伏资源, 通常需要为微电网系统配置合适的储能。现阶段, 由于储能器件价格昂贵, 储能容量的配置不宜过大, 过大的储能容量将显著增加投资成本; 储能容量的配置也不能过小, 过小的储能容量无法保证系统在离网时段的稳定运行, 也不利于促进光伏的消纳。因此, 如何合理配置微电网的储能容量已成为当今众多学者关注的焦点。

目前, 储能系统容量配置和优化方法主要分为单一储能配置^[10-13]和复合储能配置^[14-17]两种应用场景。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2014AA052001)

对于单一储能配置,优化的方法主要有差额补充法、波动平抑分析法和经济特性优化法。文献[10]和[11]分别提出了采用光伏平均输出功率和采用离散傅里叶变化方法对输出功率进行频谱分析的优化配置方法,但两者仅是平抑光伏波动的单目标优化。文献[12]研究了离网运行微电网多能互补电源容量配置方法,但其优化对象并非储能,而是整个微电网。文献[13]针对工业光伏微电网,以降低单位电能成本和投资回收期,提高污染物减排收益为综合经济性目标,采用粒子群算法,定量分析了系统运行模式、光伏产业政策和电网电价对用户收益、系统的经济和环境性能的影响,但忽略了工业负荷中重要负荷的冲击特性,未考虑供电可靠性。

对于复合储能配置,文献[14]针对微电网群和子微电网的离网运行情况,提出了基于最大允许连续离网运行时间和极端条件下系统期望稳定运行时间 2 个指标的复合储能系统容量配置方法,但忽略了并网运行时储能配置对于提高光伏利用率方面的贡献。文献[15-17]根据能量型与功率型储能的技术特点分析不同类型储能在微电网中的适用情形,研究复合型储能的互补配置原则:对于能量型储能主要考虑微电网离网运行时保证系统稳定运行要求;对于功率型储能,考虑微电网短时功率支撑、能量缓冲、改善电能质量的要求。但这些文献往往给出了满足要求的基本配置方案,未对配置方案进行优化。

综上,已有的微电网容量配置方面的研究仅仅单方面关注微电网(群)并网运行或者离网运行的情景,也未能充分考虑工业负荷本身的负荷特性,对于工业微电网中的水泵、电机负荷频繁启动的冲击特性缺乏进一步的分析。

本文针对实际的工业光伏微电网模型,提出了一种储能优化配置方法,主要创新点如下:

(1) 详细分析了工业负荷的运行特性,结合工业分时电价情况,制定了适合工业光伏微电网的储能充放电控制策略。

(2) 在优化配置储能电池容量和变流器功率时,综合考虑工业光伏微电网并网、离网运行场景:离网条件下,考虑微电网达到期望稳定运行时间的能量要求和重要负荷启动冲击的功率要求,保证微电网离网运行的稳定性;并网运行时,考虑提高系统中的光伏利用率,增加系统净收益。

1 工业光伏微电网典型结构分析

本文所述的工业光伏微电网结构如图 1 所示,主要包括光伏电池阵列、光伏 DC/AC 逆变器、储能系统、储能双向 AC/DC 变流器、重要负荷、产

线负荷和中央控制器几部分组成。

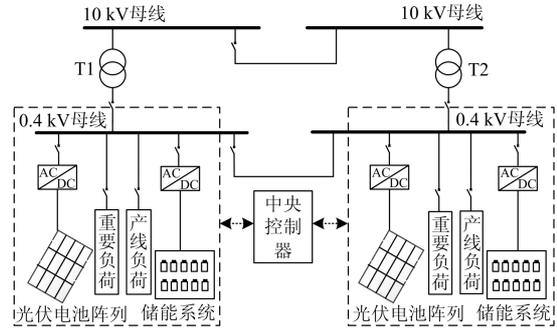


图 1 工业光伏微电网典型结构

Fig. 1 Typical structure of industrial PV microgrid system

1.1 光伏发电系统

光伏发电系统(PV)由光伏电池阵列和相应的 DC/AC 变流模块构成。一般情况下,根据日照情况,PV 采用最大功率跟踪点控制模式,从而尽可能提高太阳能的利用效果。

1.2 储能系统

储能系统一般由锂离子电池或铅酸电池并配备合适的双向 AC/DC 变流器组成。本文将储能电池中用于满足离网运行时系统期望稳定运行时间要求的这部分储能容量定义为刚性容量(The Rigid Capacity, RC),用符号 Q_{RC} 表示。将用于促进光伏消纳对应的储能容量定义为柔性容量(The Flexible Capacity, FC),用符号 Q_{FC} 表示。根据光伏发电及负荷情况,储能系统可处于充电或放电状态。

1.3 用电负荷

工业微电网中的负荷可分为产线负荷和重要负荷两类。其中,产线负荷是指主要生产设备所对应负荷。除产线设备外,实际的工厂里必须安装相应的辅助设备来保证整个生产过程的安全进行,如工厂中的冷却塔和各类服务器,冷却塔主要功能是对生产过程中产生的余热进行处理,而服务器的主要功能是对生产情况进行实时监测,制定下一步生产计划。当此类辅助生产设备突然断电时,如不能及时恢复供电,则可能会对整个系统造成严重的损害。比如冷却塔突然停电后,会由于塔内温度过高而造成爆炸等严重事故,同时损坏生产线上其他设备,使得产品报废。本文把此类因突然停电而造成严重损失的辅助设备归类为工业微电网中的重要负荷。工业光伏微电网在转入离网运行后,为保证系统有足够时间有序关闭生产线的各类设备,完成冷却塔降温等停止生产的安全规程,要求储能系统必须能够满足此时的用电电量和用电功率需求。

2 工业微电网特性分析

现阶段,全国各地对于自发自用的分布式光伏微电网是否可将余电上网的政策并未统一,本文将研究对象设定为不能向大电网售电的工业光伏微电网。

如图2所示,本文所述工业光伏微电网特性主要包括工业分时电价特性、光伏出力特性和产线负荷特性三部分。

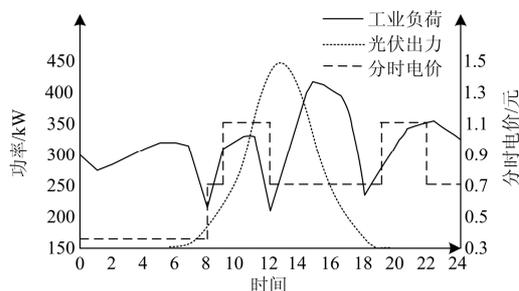


图2 工业光伏微电网特性分析示意图

Fig. 2 Schematic diagram of characteristic analysis for industrial PV microgrid

2.1 工业分时电价特性

工业负荷用电量较大,且一般执行分时电价政策,各时段的电价差别较大。因此,工业微电网配置储能时,有必要针对本地区的工业分时电价政策,制定适合电价机制的能量控制策略。广东某地现行分时电价情况如表1所示。

表1 广东工业用电峰谷电价表

Table 1 Guangdong industrial TOU power price

峰谷时段	备选时段	电价(元)
高峰	09:00~12:00 19:00~22:00	1.11
平段	08:00~09:00 12:00~19:00 22:00~24:00	0.71
低谷	00:00~08:00	0.36

根据上述分时电价情况,工业光伏微电网的投资者可在电价低谷时段从电网购电为储能电池充电,将存储的电能在电价峰值时段向负荷供应,以获得最大的经济效益。

2.2 光伏出力特性分析

由图2可以看出,工业光伏微电网光伏系统出力具有明显的单峰分布规律:12:00~14:00,光伏出力处于一天中最大值时段,此段时间内,光伏出力大于产线负荷,可将剩余的光伏出力存入储能电池中;19:00~22:00,光伏出力为零,可在此段时间内将储存的电能进行释放,供给负荷。

2.3 产线负荷特性分析

工业负荷曲线与常规的居民、商业负荷曲线相

比存在显著的差别,这是工业生产模式及用电特性的不同造成的。以某玻璃厂为例,由于生产工艺技术要求,要求工厂全年24h不间断生产。工业负荷仅在工人换班和用餐时间由于部分生产设备的关闭出现三个明显的负荷低谷。日负荷曲线被分为4段,每段负荷的波动都比较平缓,下午两点左右为日负荷最高峰。

2.4 储能充放电策略

综合分析上述工业分时电价特性、光伏出力特性以及产线负荷特性,可得工业光伏微电网内储能系统每日充放电策略和对应的荷电状态(State of Charge, SOC)如表2所示。

表2 储能电池充放电控制策略

Table 2 Control strategy of energy storage battery

时间段	储能系统充放电状态	SOC 变化过程
0:00~6:00	充电	$M \sim SOC_{max}$
9:00~11:00	放电	$SOC_{max} \sim M$
11:00~14:00	充电	$M \sim N$
19:00~22:00	放电	$N \sim M$

表中: M 表示储能电池中仅剩余刚性容量时对应的储能电池SOC值; N 表示中午时段充电结束后储能电池SOC值, N 取值范围为 $M \sim SOC_{max}$ 。

由储能系统充放电控制策略可以得到一天内不同时刻电池状态特性如图3所示。

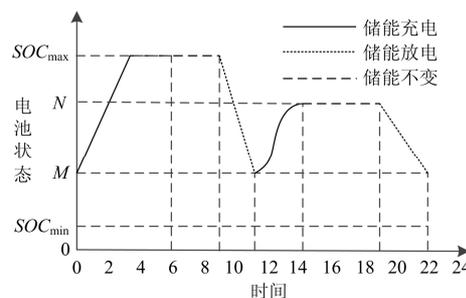


图3 不同时刻电池状态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of battery SOC

图3中,各部分线段的斜率即为本段时间内的储能电池充放电平均功率。在午间光伏出力较大时段,充电功率随着光伏剩余功率的变化而波动,因此,其充电过程在图3中显示为曲线,其余时段储能系统的充放电功率可根据需要设定为常数。

图3所示各时间段内微电网功率平衡关系如下。

1) 每天0:00~8:00为电价的低谷时期,可在这段时间内从电网购电对储能电池的功率缺额进行弥补,储能系统SOC(荷电状态)变化范围为 M 到 SOC_{max} 。为了获得最佳的电池使用状态,该时段内

储能电池充电电流可设定为电池厂家推荐值^[18](如额定电流的 1/3)。充电过程从 0 点开始,至电池 SOC 达到 SOC_{max} 结束。

该段时间内,系统的功率平衡表达式为

$$P_{buy}(t) = P_L(t) + P_{bat}(t)/\eta_E \quad (1)$$

式中: $P_{buy}(t), P_L(t), P_{bat}(t)$ 分别为 t 时刻系统的购电功率、负荷功率、储能系统充电功率; η_E 为储能系统充放电效率。

2) 早上 9:00 起利用储能电池对微电网供电,至 11:00 结束,储能系统 SOC 变化范围为 $SOC_{max} \sim M$ 。

则系统的功率平衡方程为

$$P_{buy}(t) + P_{PV}(t)\eta_{PV} + P_{bat}(t)\eta_E = P_L(t) \quad (2)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 为 t 时刻光伏系统出力; η_{PV} 为光伏逆变器效率。

3) 每天 11:00~14:00,将光伏发电对工厂供电的剩余电能对储能进行充电,储能系统 SOC 变化范围为 M 到 N 。充电过程从光伏出力大于负荷需求开始,到光伏出力小于负荷需求结束。若 14:00 后光伏出力仍大于负荷需求,可继续给储能电池充电,直至光伏出力小于负荷需求或电池 SOC 达到 SOC_{max} 结束。则该段时间内,系统中的功率平衡表达式为

$$P_{PV}(t)\eta_{PV} = P_L(t) + P_{bat}(t)/\eta_E \quad (3)$$

如遇恶劣天气,光伏本身出力小于负荷,则在该时段不对储能进行充电,工厂的功率缺额由电网提供。

此时系统中的功率平衡表达式为

$$P_{PV}(t)\eta_{PV} + P_{buy}(t) = P_L(t) \quad (4)$$

4) 设定在每天电价高峰的 19:00 起开始进行放电,至 22:00,根据该时段负荷需求,控制储能系统放电功率,使得储能系统 SOC 下降至 M ,放电停止。则系统的功率平衡方程为

$$P_{buy}(t) + P_{bat}(t)\eta_E = P_L(t) \quad (5)$$

2.5 重要负荷特性分析

由于工业光伏微电网中的重要负荷多为水泵、风机等感应电机,这些设备在实际的生产过程中会频繁地启停,依据感应电机本身的电磁特性,其启动电流可达到额定值 4 倍以上,启动功率较高,持续时间非常短。通常对于含有重要负荷的微电网可采取分时软启动策略来进行启动。感应电机的启动电流模型如图 4 所示。

设定工业重要负荷软启动最大冲击功率值为 P_B ,工业光伏微电网中的储能电池容量和储能变流

器功率配置应能够满足敏感设备的启动冲击要求。

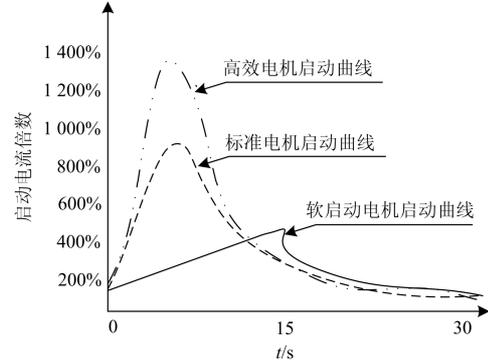


图 4 感应电机启动电流模型

Fig. 4 Soft-started current model of induction motor

3 工业光伏微电网成本收益分析

3.1 系统的总成本

本文所述的系统年成本 C 主要包括光伏系统年成本 C_{PV} , 储能系统年成本 C_B , 储能双向变流器模块年成本 C_C 和由于为储能充电而带来的年购电费用 C_F , 如式(6)所示。

$$C = C_{PV} + C_B + C_C + C_F \quad (6)$$

各项成本计算公式如下。

$$C_{PV} = Q_{PV} \cdot \left(I_{PV} \cdot \frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} \right) + u(A) \quad (7)$$

$$C_B = Q_B \cdot \left(I_B \cdot R_E \cdot \frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} \right) + u(B) \quad (8)$$

$$C_C = P_C \cdot \left(I_C \cdot \frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} \right) + u(C) \quad (9)$$

$$C_F = \sum E_{cha}(t) V_P(t) \quad (10)$$

式中: Q_{PV} , Q_B 分别为光伏系统容量、储能电池容量; P_C 为储能双向变流器总功率; I_{PV} , I_B , I_C 分别为光伏组件单价、储能电池单价和储能变流器单价; R_E 为更换储能电池所带来的附加成本; $u(A)$, $u(B)$, $u(C)$ 分别为光伏组件、储能电池和储能双向变流器的年运行和维护费用; m 为系统年限, r_0 为贴现率; $E_{cha}(t)$ 为 t 时刻从电网购电给储能系统充电的平均电能; $V_P(t)$ 为对应时刻的电价。

3.2 系统的年收益

本文以发电电价补贴的方式来计算微电网的收益。整个光伏微电网的日收益 B_0 主要由两部分构成: 光伏发电的补贴收益 B_1 , 因使用光伏带来的省电收益 B_2 。如式(11)所示。

$$B_0 = B_1 + B_2 \quad (11)$$

$$B_1 = E_{pV} V_B \quad (12)$$

$$B_2 = \sum_{t=1}^{24} V_p(t) E_{SC}(t) + \sum_{t=1}^{24} V_p(t) E_{dis}(t) \quad (13)$$

式中: E_{pV} 为每天光伏的发电电能; V_B 为光伏的补贴电价; $E_{SC}(t)$ 为 t 时段由负荷消纳的光伏发电电能; $E_{dis}(t)$ 为 t 时段储能系统的放电电能; $V_p(t)$ 为 t 时段电价。得到系统典型日收益后, 考虑天气因素影响, 一年取 R 个相似日计算, 可得系统的年收益 B 为

$$B = B_0 R \quad (14)$$

4 多目标优化配置模型及求解方法

4.1 目标函数

基于上述光伏充电站系统结构, 建立各组成单元成本收益的数学模型和容量优化配置的目标函数。在满足负荷用电需求的情况下, 设计优化目标如下。

- ① 工业光伏微电网系统的年净利润 S 最大
- ② 光伏自消纳率 R_{pV} 最大化

$$\begin{cases} \max S = B - C \\ \max R_{pV} \end{cases} \quad (15)$$

光伏的自消纳率 R_{pV} 可通过式(16)进行计算。

$$R_{pV} = \frac{E_{SC} + E_{FC}}{E_{pV}} \times 100\% \quad (16)$$

式中: E_{pV} 为每天光伏总发电量; E_{SC} 为每天由负荷消纳的光伏发电电能; E_{FC} 为 FC 储能所消纳的光伏电能, 当配置储能容量能够完全消纳午间的过剩能量时, $R_{pV} = 100\%$ 。

4.2 约束条件

4.2.1 微电网可靠性能量约束

为保证系统在离网运行时能够达到系统期望稳定运行时间的要求, 并且在并网运行时能够实现尽量提高光伏消纳的目的, 配置的储能电池总容量应既包括刚性容量 RC, 又包括柔性容量 FC, 据此可构造如式(17)约束。

$$\begin{cases} Q_B = Q_{FC} + Q_{RC} \\ Q_{RC} \geq Q_{RC.min} \end{cases} \quad (17)$$

式中: Q_{RC} 为微电网所需配置的刚性储能容量; Q_{FC} 为微电网所需配置的柔性储能容量; $Q_{RC.min}$ 为离网运行时, 为保证系统达到期望稳定运行时间要求所需配置的最小刚性储能容量。

4.2.2 微电网可靠性功率约束

为了保证离网运行时, 系统中重要负荷启动成

功, 储能变流器的配置应能满足相应的启动功率要求。由于感应电机的启动时间较短, 一般在 30 s 以内, 通常可配合变流器短时允许过载功率进行配置。

$$kP_C \geq P_B \quad (18)$$

式中: k 为储能双向变流器的短时允许过载系数; P_B 为工业微电网中重要负荷启动时的最大冲击功率值。

4.2.3 光伏自消纳率约束

为了满足特定的光伏消纳率的要求, 由式(17)可推导得到需要配置柔性储能的容量 Q_{FC} 应满足如式(19)约束。

$$Q_{FC} \geq E_{pV} \cdot R_{EPV} - E_{SC} \quad (19)$$

式中: E_{pV} 为每天光伏总发电量; R_{EPV} 为期望达到的光伏消纳率; E_{SC} 为每天由负荷消纳的光伏发电电能。

4.2.4 储能电池性能约束

考虑到电池放电倍率对电池寿命的影响, 结合文献[18-19], 本文取放电约束如式(20)。

$$\begin{cases} DOD \leq 0.8 \\ I_{cha} \leq 2C \\ I_{dis} \leq 2C \end{cases} \quad (20)$$

式中: DOD 为电池放电深度; I_{cha} 和 I_{dis} 分别为锂电池充放电电流, 单位 C 代指电流倍率。

4.3 模型求解

优化模型的求解需要计算系统的投资运行成本、年收益和光伏发电利用率。综合考虑光伏出力与负荷需求后确定各决策变量的上、下限。采用 NSGA-II 算法对所提模型进行求解。算法流程图如图 5。

5 算例分析

本文选取广东某个实际工业光伏微电网进行储能容量配置分析。以图 1 所示每条 0.4 kV 交流母线所带负荷为一个独立的微电网, 为其中一个微电网进行储能容量优化配置。每个工业光伏微电网光伏的装机容量为 600 kW, 光伏逆变器的效率为 0.97, 微电网在离网运行时期望稳定运行时间为 0.5 h。

5.1 基础数据

根据车间生产要求, 系统离网运行时, 微电网需为 435 kW 的系统负荷持续供电 0.5 h, 从而安全停止生产过程, 有序关闭生产设备。此外, 系统中的重要负荷启动时, 其启动过程持续 23 s, 最大启动功率为 538 kW。上述微电网的负荷特性如表 3 所示。

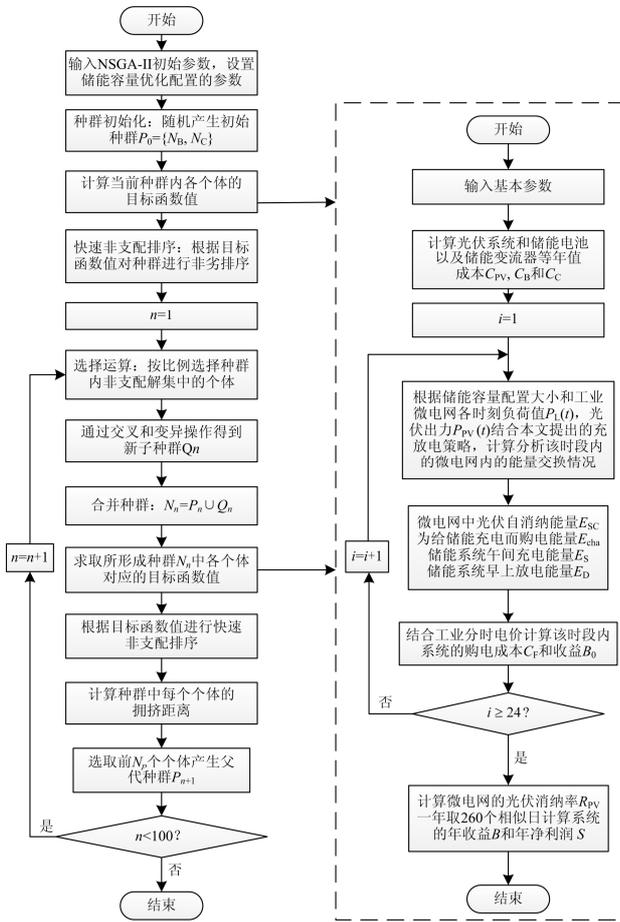


图 5 NSGA-II 算法求解流程图

Fig. 5 Algorithm flow chart of NSGA-II

表 3 微电网负荷特性

Table 3 Load characteristics of the industrial PV microgrid

kW			
峰值负荷	谷值负荷	稳定运行负荷	最大启动冲击功率
450	210	435	538

工业光伏微电网中各组件参数如表 4 所示。

表 4 微电网各组件参数^[20-21]

Table 4 Parameters of the components in the industrial PV microgrid

系统参数	数值
光伏组件价格/(万元/kW)	0.85
光伏逆变器效率	0.97
储能电池价格/(万元/kWh)	0.3
储能电池效率	0.96
储能变流器价格/(万元/kW)	0.2
储能变流器效率	0.96
储能电池寿命/次	3 000
光伏电池寿命/年	20
贴现率	0.04
光伏补贴电价/(元/kWh)	0.42

需要说明的是表 4 中的光伏组件价格指的是 1 kW 光伏电池板和光伏逆变器价格及施工维护费用总和。储能电池若采用锂电池,其使用寿命为 3 000 次,每年以 230 个相似日进行计算,系统运行年限 $m = 20$ 年,因此需要更换 3 次。储能系统的总效率取为 $\eta_E = 0.96 \times 0.96 \approx 0.92$ 。

5.2 储能配置

5.2.1 刚性容量配置

1) 储能电池容量配置

系统离网运行时,微电网需为 435 kW 的系统负荷持续供电 0.5 h,可确定储能系统中刚性容量的配置应大于 217.5 kWh。进一步考虑到储能系统的能量转换效率 $\eta_E = 0.92$ 以及储能电池放电深度约束 ($DOD \leq 0.8$),可计算需要刚性容量最小值 $Q_{RC.min} = 296$ kWh。

2) 储能变流器配置

为满足工业微电网中感应电机等设备的启动冲击要求(最大冲击功率为 538 kW),考虑双向变流器的短时允许过载系数 $k = 1.2$,所选储能双向变流器的额定功率值 $P_B \geq 450$ kW。

5.2.2 柔性容量优化

由典型日光伏出力与工业负荷匹配数据可计算得工业负荷对光伏的自消纳率为 86.87%,由光伏与负荷的净功率数据,并考虑微电网各部分组件效率,若将午间剩余的光伏能量完全储存起来,则需配置储能柔性容量为 $Q_{FC} = 384$ kWh。此外,已经配置的 450 kW 储能变流器功率足够满足工厂的峰值负荷供给,因此不必继续增加储能变流器的功率值。

根据得到的决策变量范围,结合本文提出的容量优化配置模型,对用于促进光伏消纳部分的柔性容量配置进行双目标优化,利用 NSGA-II 算法对优化模型进行编程并求解,设定种群数量为 50,最大迭代次数为 100 次,交叉率为 0.9,变异率 0.1。计算得到 Pareto 前沿如图 6 所示。

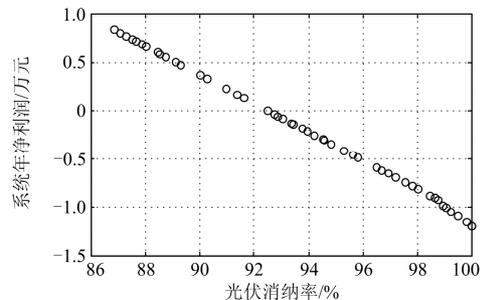


图 6 NSGA-II 两目标优化结果

Fig. 6 Optimizing results of double-objective by NSGA-II

由 NSGA-II 算法搜索得到的 Pareto 前沿如图 6 所示,一定程度上可为折中选取提高净利润和提高

光伏消纳率这组对立的目标提供丰富的信息。由优化结果可知, 储能系统中仅包含 RC 储能(图 6 中光伏消纳为 86.87%)时对应的系统年净利润为 0.84 万元, 继续配置 FC 储能促进光伏消纳, 由于现在储能器件价格昂贵, 通过提高光伏消纳带来的收益小于对应增加的储能成本, 因此系统的年净利润继续随着储能总容量的增大而减少, 从图 6 可知, 增加 FC 储能使得光伏消纳率超过 92%后, 系统将会亏损。

不同光伏消纳率目标下所需的储能容量配置方案和系统净利润以及电池使用情况如表 5 所示。

表 5 容量优化配置方案

Table 5 Optimum solutions

优化参数	$R_{EPV}=90\%$	$R_{EPV}=95\%$	$R_{EPV}=100\%$
柔性储能 Q_{FC}/kWh	92	238	384
刚性储能 Q_{RC}/kWh	296	296	296
储能总量 Q_B/kWh	388	534	680
储能变流器功率 P_C/kW	450	450	450
系统净利润 $S/万元$	0.37	-0.40	-1.2
并网最大放电深度 DOD	0.23	0.45	0.56
最大充电倍率	0.64C	0.47C	0.37C
最大放电倍率	1.34C	1C	0.79C

并网运行时, 该微电网中光伏出力与负荷的最大净功率值不超过 250 kW, 据此和不同光伏消纳水平下的储能电池容量估算对应储能电池的最大充电倍率; 在微电网离网运行时, 为了保证微电网重要负荷正常启动, 要求储能系统提供的放电功率达到 538 kW, 据此和不同光伏消纳水平下的储能电池容量估算对应储能电池最大的放电倍率。由于工业负荷供电可靠性相对较高, 整个微电网在大多数时间处在并网运行状态, 由表 5 中结果并结合文献[18]可知, 并网时储能电池处于健康的放电深度, 储能电池寿命能够得到较好的保障。

近年来锂电池成本和储能变流器组件价格一直呈现着下降趋势。为此, 本文将储能系统成本下降对工业光伏微电网的年净利润影响进行分析, 结果如表 6 所示。

表 6 灵敏度分析结果

Table 6 Summary of the sensitivity analysis

储能系统成本下降比例	系统年净利润/万元		
	$R_{EPV}=90\%$	$R_{EPV}=95\%$	$R_{EPV}=100\%$
20%	1.62	1.23	0.76
40%	2.86	2.82	2.71
60%	4.10	4.42	4.66

通过灵敏度分析可以看出, 在电价、光伏组件价格等其他条件不变的情况下, 随着储能系统成本的降低, 配置相同容量(相同光伏消纳率下)的储能, 系统的年净利润呈现线性的增长; 另一方面, 当储能系统成本下降到一定程度时, 随着光伏消纳率的提高, 系统的年净利润也呈现出了增长的趋势, 这是由于此时, 通过配置 FC 储能促进光伏消纳带来的利润大于对应的储能安装成本。经过计算当储能成本下降约 42%时, 系统的净利润会随着储能容量的增加而增加。

当储能系统成本下降 60%时, 工业光伏微电网的年净利润随系统储能容量配置的变化关系如图 7 所示。

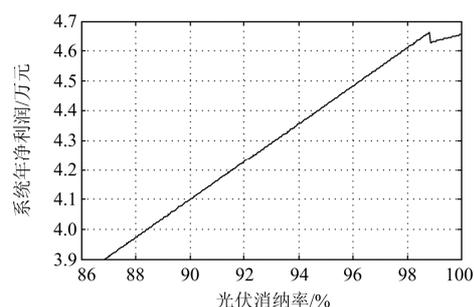


图 7 系统年净利润随光伏消纳率变化关系

Fig. 7 Variation curve of the annual net profit changing with storage capacity

从图 7 可以看出, 储能成本下降 60%后, 随着光伏消纳率的上升, 投资者的收益呈阶段性增长。这是因为, 根据本文提出的充放电策略, 在上午 9:00~11:00 时段, 储能系统给负荷供电, 但此时段内负荷的用电量需求(工厂负荷与光伏出力匹配后)为 257 kWh, 所需 FC 为 350 kWh, 对应的消纳率为 98.82%, 继续配置 FC 储能, 提高光伏消纳率, 夜间多储存的电能只能在早上 8:00~9:00 这段时间内释放, 由于两时段的电价分别属于峰值时段和平值时段, 因此, 系统省电收益不同, 所以, 图 7 中柔性容量达到 350 kWh 后, 系统年净利润的增长率出现了明显的下降。

6 结论

本文针对工业光伏微电网的储能容量优化配置问题, 将所需配置储能分为刚性容量和柔性容量两部分, 首先以保证系统在离网运行时的可靠性为原则配置 RC 储能, 接着对促进光伏消纳的 FC 储能进行优化分析。选取广东某实际运行的光伏微电网为研究对象, 在分析工业负荷运行特性和重要负荷启动冲击特性的基础上, 结合分时电价机制, 给出

了适合工业光伏微电网的储能系统充放电运行策略, 针对促进光伏消纳的储能柔性容量配置, 建立了基于年净利润最大化和光伏消纳最大化的双目标优化模型。

结果显示: 现阶段, 由于储能系统成本较高, 通过提高光伏消纳率而带来的收益小于对应增加储能的成本, 因此, 工业光伏微电网的年净利润随着光伏消纳率的提升而下降, 微电网投资者可依据所得结果综合考虑配置储能的经济性与节能性, 最终做出合理选择。

本文提出的工业光伏微电网储能优化配置模型充分分析了工业重要负荷的启动冲击特性和整体负荷的运行特性, 能够保证微电网在离网条件下的稳定运行, 同时提高微电网在并网条件下的光伏消纳率。随着储能电池领域的技术革新和电池成本的进一步下降, 本文提出的储能优化配置模型将为工业光伏微电网投资者的投资策略制定提供更加丰富的参考。

参考文献

- [1] 陈丽丽, 牟龙华, 刘仲. 光储柴微电网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 86-91.
CHEN Lili, MU Longhua, LIU Zhong. Analysis of the operating characteristics of a PV-Diesel-BESS microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 86-91.
- [2] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [3] 王春亮, 宋艺航. 中国电力资源供需区域分布与输送状况[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 69-74.
WANG Chunliang, SONG Yihang. Distribution of power resource demand and supply regions and power transmission in china[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 69-74.
- [4] 郭宁, 滕欢, 李基康. 考虑不同群体效益的微电网经济调度模型研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 40-46.
GUO Ning, TENG Huan, LI Jikang. Economic dispatching model research of microgrid concerning about different beneficiaries[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 40-46.
- [5] 郭文明, 刘仲, 牟龙华. 微电源控制策略及微电网分层管理体系[J]. 电器与能效管理技术, 2015(24): 64-70.
GUO Wenming, LIU Zhong, MU Longhua. Micro-sources control strategies and hierarchy management structure of microgrid[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(24): 64-70.
- [6] 刘永礼, 冯明灿, 王承民, 等. 储能接入后考虑电能互动的配电网可靠性分析与研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(24): 53-57.
LIU Yongli, FENG Mingcan, WANG Chengmin, et al. Power supply reliability analysis and research considering energy interaction after accessing energy storage[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(24): 53-57.
- [7] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [8] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [9] 赵媛媛, 艾芊, 余志文, 等. 考虑多种因素评估的微电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 23-30.
ZHAO Yuanyuan, AI Qian, YU Zhiwen, et al. A microgrid optimal scheduling considering the assessment of various factors[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 23-30.
- [10] 周念成, 闫立伟, 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 119-127.
ZHOU Niancheng, YAN Liwei, WANG Qianggang. Research on dynamic characteristic and integration of photovoltaic generation in microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 119-127.
- [11] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage system for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.

- [12] 丁伯剑, 郑秀玉, 周逢权, 等. 微电网多能互补电源容量配置方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 144-148.
DING Bojian, ZHENG Xiuyu, ZHOU Fengquan, et al. Research on method of capacity configuration for hybrid power in microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 144-148.
- [13] 茆美琴, 金鹏, 张榴晨, 等. 工业用光伏微电网运行策略优化与经济性分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 35-45.
MAO Meiqin, JIN Peng, ZHANG Liuchen, et al. Optimization of operation strategies and economic analysis of PV microgrids for industries[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 29(2): 35-45.
- [14] 田培根, 肖曦, 丁若星, 等. 自治型微电网群多元复合储能系统容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 168-173.
TIAN Peigen, XIAO Xi, DING Ruoxing, et al. A capacity configuring method of composite energy storage system in autonomous multi-microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 168-173.
- [15] 梁惠施, 范明天, 张祖平. 微电网中复合储能的互补配置研究[C] // 第十三届中国科协年会第 15 分会场-大规模储能技术的发展与应用研讨会论文集, 2011.
LIANG Huishi, FAN Mingtian, ZHANG Zuping. Research on optimal configuration for combined storage in microgrid[C] // The 13th Annual Meeting of CAST, 2011.
- [16] 谭兴国, 王辉, 张黎, 等. 微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 7-14.
TAN Xingguo, WANG Hui, ZHANG Li, et al. Multi-objective optimization of hybrid energy storage and assessment indices in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 7-14.
- [17] 谢石骁, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79-84.
XIE Shixiao, YANG Li, LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 79-84.
- [18] 李哲. 纯电动汽车磷酸铁锂电池性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2011: 16-17, 27, 35-36.
LI Zhe. Study on the performance of lithium iron phosphate battery for pure electric vehicle[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011: 16-17, 27, 35-36.
- [19] 高飞, 杨凯, 惠东, 等. 储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 41-45.
GAO Fei, YANG Kai, HUI Dong, et al. Cycle-life energy analysis of LiFePO₄ batteries for energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 41-45.
- [20] 北极星太阳能光伏网: 中国光伏上网电价政策正式发布[EB/OL]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20130516/434557.shtml>
- [21] ROSS M, HIDALGO R, ABBEY C, et al. Analysis of energy storage sizing and technologies[C] // Electric Power and Energy Conference (EPEC), 2010 IEEE. IEEE, 2010: 1-6.

收稿日期: 2015-06-26; 修回日期: 2016-01-22

作者简介:

许健(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为光伏微电网储能优化配置; E-mail: xj198800@163.com

刘念(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源与智能配用电系统、电力信息安全等;

于雷(1973-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统评价与应急、智能配用电与微电网等。

(编辑 葛艳娜)