

DOI: 10.7667/PSPC171752

基于日前调度与实时控制的微网储能系统容量配置

方磊¹, 牛玉刚¹, 王思明¹, 贾廷纲²

(1. 华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237;

2. 上海电气自动化集团, 上海 200070)

摘要: 针对微电网孤岛模式下的新能源发电、负荷平衡问题, 从实时控制运行需求出发, 提出了一种基于日前能量调度管理和实时误差控制的储能系统容量配置方案。首先, 通过将储能系统分为主储能系统和辅助储能系统, 建立了兼顾储能系统成本损耗以及燃气轮机发电配置的多目标优化函数。利用改进的粒子群算法和收敛性原则, 得到所需的主储能配置, 同时完成日前的能量管理调度。然后, 利用场景模拟法得出完成实时操作所需要的辅助储能系统容量配置, 并制定相应控制策略完成实时能量管理。最后, 通过数值仿真, 验证了所提配置方案的可行性。在满足经济性和实用性条件下, 完成整个孤网模式下微电网的配置问题。

关键词: 微电网; 孤岛模式; 储能系统; 容量配置; 日前调度; 实时控制

Optimal capacity determination method based on day-ahead scheduling and real-time control

FANG Lei¹, NIU Yugang¹, WANG Siming¹, JIA Tinggang²

(1. Key Lab of Advanced Control and Optimization for Chemical Process, Ministry of Education, Shanghai 200237, China;

2. East China University of Science & Technology, Shanghai 200070, China)

Abstract: Aiming at the problem of power balance between the renewable energy generation and the load in the isolated mode, starting from the real-time control operation requirements, this paper proposes a capacity configuration scheme for energy storage systems based on the daily energy scheduling management and real-time error control. Firstly, by dividing the energy storage system into a main energy storage system and an auxiliary energy storage system, a multi-objective optimization function which takes into account both the cost loss of the energy storage system and the gas turbine generator configuration is established. The required main energy storage configuration is obtained by using the improved particle swarm optimization and the convergence principle, and the previous energy management schedule is completed at the same time. Then, the scene simulation method is used to obtain the capacity configuration of the auxiliary energy storage system which is needed to complete the real-time operation, and the corresponding control strategy is formulated to complete the real-time energy management. Finally, through the numerical simulation, the feasibility of the configuration scheme proposed in this paper is verified. Under the condition of satisfying the economy and practicality, the configuration of the microgrid in the whole isolated network mode is completed.

This work is supported the National Natural Science Foundation of China (No. 61673174) and Shanghai Excellent Academic/Technical Leader Plan (No. 16XD1421300).

Key words: micro-grid; isolated mode; energy storage system; capacity determination; day-ahead scheduling; real-time control

0 引言

高渗透率分布式电源的发展, 因其具有的高效、

环保等特性, 为电力系统的发展带来了众多优势^[1-2], 同时, 电网发展更加趋向于区域化, 因事故导致的大规模停电现象也将大幅减少。但是, 分布式电源也为电力系统带来新的挑战^[3]。在并网系统下, 电网的运行规划需要更加准确的预测^[4], 同时波动性也会给主配电网带来一定的短时冲击, 导致电网的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61673174); 上海市优秀学术/技术带头人计划项目资助(16XD1421300)

不稳定因素增加。而孤网模式的提出,可以有效地避免新能源发电等分布式电源与公共电网相连,从而将问题限定在了小范围内。但是,孤网模式因为缺少公共电网的电力补充,需要添加可控发电单元、储能系统等来协调整个电网的平衡运行。而储能系统不仅可以减缓新能源发电波动,保持系统稳定^[5-6],同时还可以提供能量转移,实现很好的功率主动配合^[8-10]。而如何更好地配置和使用这些单元,也成为了一个新的研究方向。

文献[11]提出了综合考虑风电波动影响以及分时电价,在经济优化基础上,完成储能系统的配置,该方法很大程度能够减小新能源发电波动多带来的影响,但是频繁的储能系统功率变化控制,会对储能系统的寿命造成很大的影响。文献[12]以综合经济效益最大为目标函数,将储能配置容量作为需要配置的电量,虽然考虑了系统的损耗以及维护相关,但是针对配电网的削峰填谷设计,没有考虑新能源发电的调节作用。文献[13]提出了基于平滑新能源发电波动性进行的储能系统配置问题,但只是针对新能源发电进行了设计,没有考虑整个电网的运行问题,从而导致实际运用中存在局限性。

另外微电网的实时控制问题也一直是微电网研究的热点问题。文献[14]针对孤岛型微电网的经济性和供电可靠性,采用多智能体的一致性方法解决微电网实时运行问题,但是该方法中各时间段相互独立、调度零散,不利于储能系统的运行。文献[15]在分时优化调度层面,以发电成本最低为目标,提出优化调度方法,同时在实时协调控制层面,合理分配用电量解决功率波动问题,但是该工作对储能系统缺少有效的容量配置,会造成容量配置的浪费。

针对上述问题,本文将容量配置融入到日前的能量管理规划以及实时的能量调度中。首先针对日前预测数据,通过建立包含储能系统配置成本、可控发电单元出力成本以及相关波动控制的多目标优化函数,通过微电网经济优化,得到适合系统的储能容量。同时本文还提出辅助储能系统概念,针对实时操作下的微电网系统,在日前预测和能量管理调度的基础上,建立专门解决实时控制下误差影响的储能系统,从而完善整个储能系统。最终通过案例仿真,实现储能系统容量配置,可以提高微网运行的可行性。

1 微网孤网控制系统

1.1 孤网控制拓扑结构

本文考虑微网系统中的孤网控制模式,其拓扑结构如图1所示,主要的设备单元有新能源发电单

元、可控发电单元、储能系统控制单元以及负荷管理单元。其中,新能源发电单元包括光伏发电单元(PV)和风力发电单元(WT);储能系统控制单元包括主控储能单元和随机波动储能控制单元,即主储能系统和辅助储能系统;可控发电单元则由微型燃气轮机组成。

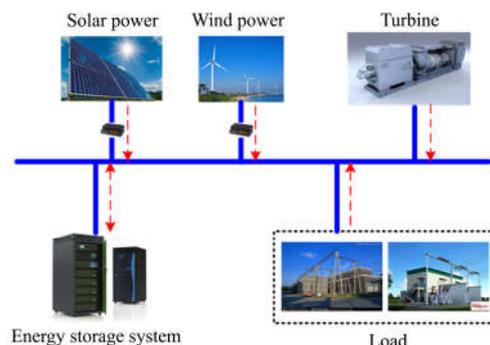


图1 孤网控制系统

Fig. 1 Island micro-grid control system

1.2 新能源发电单元

在孤网模式下,新能源发电具有波动性和不可控制性,本文采用添加可控发电单元和储能系统单元的策略对其进行控制,可以有效地降低新能源单元容量,同时对发电量与负荷不匹配部分进行相应的转移调节。

在满足用户负荷需求的条件下,尽量使用新能源发电,减小可控发电单元的使用,降低资源的浪费,对多余发电量进行储存,若还有新能源电量剩余,则相应的做弃风弃光处理。

新能源发电要求满足下列约束。

$$0 \leq P_{pv}(t) \leq P_{pv,c}(t) + \Delta p_{pv}(t) \quad (1)$$

$$0 \leq P_{wt}(t) \leq P_{wt,c}(t) + \Delta p_{wt}(t) \quad (2)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 和 $P_{wt}(t)$ 为日前预测调度下光伏和风力发电的使用值; $P_{pv,c}(t)$ 和 $P_{wt,c}(t)$ 为光伏和风力发电日前预测值; $\Delta p_{pv}(t)$ 和 $\Delta p_{wt}(t)$ 为实施控制下的新能源发电误差值。

1.3 储能系统单元

电池储能系统(BESS)因其响应速度快、能量密度高、转化效率高、安装条件无限制等优点而受到广泛关注和运用。储能系统分为两类,一类是针对日前预测制定能量管理策略的主储能电池单元,采用能量型的铅酸蓄电池,另一类是平缓实时环境下新能源发电不确定性以及负荷不确定性的辅助储能电池单元,一般采用功率型的超级电容器。主储能单元作为日前预测管理的重要环节,主要负责在新能源发电和微型燃气轮机发电过大的情况下,储存

多余的电量，在发电量较小的情况下，输出电量以平衡功率。

储能电池单元在使用过程中，主要考虑充放电的功率和荷电状态(SOC)，而这两方面的控制约束，由储能系统的额定功率和额定容量确定。为了防止储能电池超过额定容量，建立以下充放电模型约束。

$$-P_{ba} \leq p_{ba}(t) \leq P_{ba} \quad (3)$$

$$0 \leq w_{ba}(t) \leq W_{ba} \quad (4)$$

$$-P'_{ba} \leq p'_{ba}(t) \leq P'_{ba} \quad (5)$$

$$0 \leq w'_{ba}(t) \leq W'_{ba} \quad (6)$$

式中： P_{ba} 和 P'_{ba} 分别是主电池单元和辅助储能系统单元的额定功率，单位为kW； $p_{ba}(t)$ 和 $p'_{ba}(t)$ 是对应的当前时刻的充放电功率，大于零时储能系统充电，小于零时储能系统放电； W_{ba} 和 W'_{ba} 分别表示主电池单元和辅助储能系统单元的额定容量，单位为kWh； $w_{ba}(t)$ 和 $w'_{ba}(t)$ 是对应储能单元的当前时刻电能储存量。同时，依据储能电池充放电准则，本文对不同储能单元的荷电状态SOC建立了相应的模型及其约束，如式(7)。

$$\begin{cases} p_{ba} \geq 0 \text{ 时, } \text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) + \frac{p_{ba}(t) \times \eta_c}{W_b} \\ p_{ba} < 0 \text{ 时, } \text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) + \frac{p_{ba}(t)}{\eta_d \times W_b} \\ \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \\ \text{SOC}(0) = \text{SOC}(T) \end{cases} \quad (7)$$

式中， SOC_{\max} 和 SOC_{\min} 分别为储能电池荷电状态上下限，对储能系统剩余电量比例进行约束，取值在0~1之间。前两个式子分别表示储能系统随着充放电的进行，SOC发生相应的变化，其中， η_c 和 η_d 为对应充放电的效率；最后一个式子表达了储能系统的一个周期环境下，初始状态与末尾状态一致，保证了储能系统运行的周期性，有利于下一周期的运行。

当然，在主储能单元使用过程中，也会产生相应的损耗或者操作费用，本文考虑以下三方面内容。

1) 充放电过程的损耗成本

本文采用的主储能单元由铅酸蓄电池组成，而在铅酸蓄电池的使用过程中，电池的寿命和充放电次数以及充放电深度密切相关。图2是电池在设计寿命周期内的最大充放电次数与充放电深度之间的关系曲线^[16]，可以看出，随着充放电深度的加深，充放电循环次数呈指数下降，也就是说缓慢的充放电可以减小储能电池的损耗，具体关系为

$$N_{\text{BESS}} = \alpha_1 + \alpha_2 e^{\alpha_3 R} + \alpha_4 e^{\alpha_5 R} \quad (8)$$

式中： N_{BESS} 为电池充放电循环次数； $\alpha_1 - \alpha_5$ 为铅酸蓄电池的特征参数。那么，每次进行充放电操作所损耗的电池占总电池比例的 $0.5/N_{\text{BESS}}$ ，所以，可得出每次操作所产生的损耗费用为

$$C_a = \frac{C_w \times W_{ba} + C_p \times P_{ba}}{2 \times N_{\text{BESS}}} \quad (9)$$

式中， C_w 和 C_p 是单位容量和功率的电池安装费用。

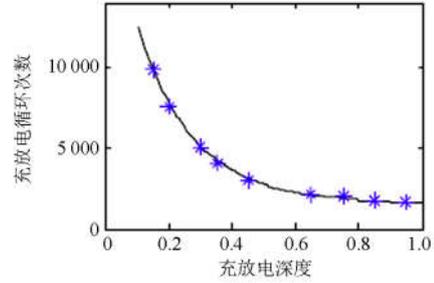


图2 充放电循环次数与充放电深度关系曲线

Fig. 2 Relationship between the number of charge-discharge cycles and the charge-discharge depth

2) 储能系统充放电波动控制

针对现阶段的储能系统高成本高损耗而言，能够在正常使用条件下，减小电池的额定容量，可以有效提高储能系统的使用效率。那么，在使用过程中，如果能够对储能系统的充放电状态波动进行相应的控制，使得电池能量变化在更小的范围内，也可以作为一个能够有效减小电池额定容量配置的措施，从而减小储能系统的安装费用。所以，本文提出荷电状态波动控制目标为

$$C_b(t) = \delta \sum_i (p_{ba}(t) - p_{ba}(t-1))^2 \quad (10)$$

式中， δ 为储能系统充放电波动系数。

3) 储能系统SOC波动控制

对于现阶段储能系统的配置问题，除了需要配置其储能容量，还必须对储能系统的额定功率进行约束。由于功率与荷电状态的变化有关，所以通过有效地控制电池荷电状态SOC的变化^[17]，使得功率变缓，将是该问题的一种有效的解决方案，它可以用品(11)的目标函数表示。

$$C_c(t) = \phi \sum_i (\text{SOC}(t) - 0.5)^2 \quad (11)$$

综上所述，根据本文提出的策略，储能电池在使用过程中的综合损耗为

$$C_{ba}(t) = C_a(t) + C_b(t) + C_c(t) \quad (12)$$

将该目标作为校准储能电池容量配置的基准，可以有效地减小相应配置，还能提高电池使用效率。

1.4 可控发电单元

本文采用的是微型燃气轮机作为可控发电单元, 用以提供新能源发电的不足, 保证孤网的功率平衡和安全运行。而微型燃气轮机的加入, 也对微电网的成本以及储能电池的使用产生一定的影响, 所以必须要对其进行控制约束, 使得结果更加有利于储能电池配置和实际需求。针对以上问题, 本文采用下面的微型燃气轮机燃气成本函数^[18]和装机成本函数。

$$C_{f1} = \beta_1 p_{fc}^2(t) + \beta_2 p_{fc}(t) + \beta_3 \quad (13)$$

$$C'_{f1} = \beta'_2 p_{fc}(t) + \beta'_3 \quad (14)$$

式中: $p_{fc}(t)$ 表示微型燃气轮机的工作功率; β_1 — β_3 为微型燃气轮机的特征参数; β'_2 和 β'_3 为燃气轮机使用过程损耗的装机折合成成本参数。在本文仿真过程中, 将式(14)参数并入式(13), 共同构成燃气轮机的使用成本函数。同时, 在运行过程中, 要求燃气轮机的功率满足下面约束, 防止其过载操作, 造成设备的损毁。

$$0 \leq p_{fc}(t) \leq P_{fc} \quad (15)$$

式中, P_{fc} 为燃气轮机的额定功率。

通过模型分析可以得出, 在预测值下新能源发电功率与用户负荷功率是一定的, 可控发电单元作为唯一可以生产电量的设备, 每个调度周期所需要的燃气轮机的发电总量近似为一个定值, 只要控制燃气轮机的功率波动, 不仅可以进一步降低燃气使用, 同时还能减小燃气轮机的额定功率配置。在此基础上, 本文对燃气轮机波动也进行了相应的控制, 如式(16)。

$$C_{f2}(t) = \gamma \sum_t (p_{fc}(t) - p_{fc}(t-1))^2 \quad (16)$$

式中, γ 为控制燃气轮机处理波动的参数, 可以依据具体的控制要求加以设计。最后, 为了微网系统正常安全运行, 每个时刻都要做到功率平衡, 满足式(17)的等式约束。

$$p_{fc}(t) + p_{pv}(t) + p_{wt}(t) = p_{ba}(t) + p_l(t) \quad (17)$$

式中, $p_l(t)$ 为用户负荷数据。从式(16)可以得出, 在日前能量调度管理过程中, 只要完成对储能电池和燃气轮机的功率规划, 就可以得出整个系统的操作情况。

2 容量配置策略

2.1 主储能电池模块

2.1.1 优化目标

依据上述模型分析, 本文在已知新能源发电单

元、用户负荷单元日前预测数据的基础上, 通过分析相关数据, 得出该数据环境下的净负荷量, 净负荷量表达式如式(17)所示。然后根据如下所示的规则, 采用式(18)所示的多目标优化函数, 得出适合该环境下的储能容量和功率配置。

$$p_{net}(t) = p_l(t) - p_{pv}(t) - p_{wt}(t) \quad (18)$$

$$\min J = C_{ba}(t) + C_{f1}(t) + C_{f2}(t) \quad (19)$$

式中, 优化变量是 $p_{ba}(t)$ 和 $p_{fc}(t)$, 约束条件为式(3)一式(7)、式(15)。在本文分析过程中, 净负荷量包括以下几种情况。

1) 净负荷量大于零

在该情况下, 整个控制周期内, 大部分时间段的净负荷较大, 所以需要通过燃气轮机发电来弥补所需的负荷缺额, 而对于储能电池来说, 主要是对新能源发电进行转移, 该系统按照要求可能需要较大的燃气轮机配置, 较小的储能系统配置。

2) 净负荷量接近于零

在该情况下, 即在控制周期内, 新能源发电总量与总负荷量接近, 故燃气轮机的运行可能会降低, 但是峰谷差会较大, 从而产生功率不均衡现象, 因此本文在考虑采用储能电池去解决新能源发电与负荷不匹配的问题时, 若要有效地发挥其转移能量的功能, 在净负荷量接近于零的情况下, 上述操作可能会需要较大的储能配置。

3) 净负荷量小于零

在该情况下, 新能源发电过多, 将会造成大量的新能源浪费, 由于储能系统只能作为转移电量中介, 那么此时只能采用弃风弃光。在实际运行中出现该情况, 则需要加入新的负荷或减小新能源发电设备数量, 从而将情况转换为 1) 或 2) 两种情况。

2.1.2 容量配置优化过程

针对 2.1.1 节所提出的主储能电池容量配置优化目标, 本文针对改进粒子群优化算法得出的优化解做进一步分析, 通过不断地更新储能电池配置容量, 使得配置额收敛于定值, 具体操作流程如图 3 所示。其中, 整个容量配置优化过程如下所示。

1) 利用功率平衡以及相关约束条件, 本文对目标函数(18)进行化简, 将式子中的 $P_{fc}(t)$ 用 $P_{ba}(t) + P_l(t) - P_{pv}(t) - P_{wt}(t)$ 表示, 则将原多目标函数化简成为只含有 $P_{ba}(t)$ 的单目标函数。

2) 确定粒子个数为 24, 周期为一天, 即需要获得每小时的预测数据。

3) 根据优化变量不等式约束式(3)一式(7)、式(15), 初始化粒子种群和速度得到初始种群解。

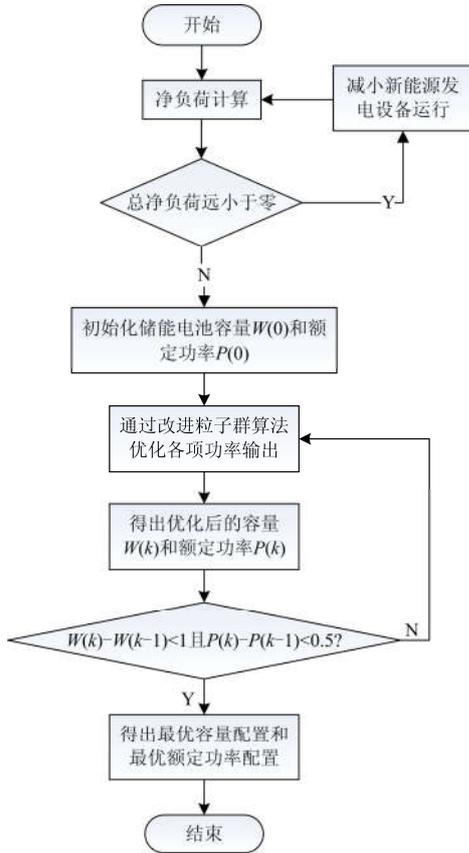


图 3 容量配置操作策略流程图

Fig. 3 Strategy flow chart of capacity configuration operation

4) 通过初始粒子群，根据等式约束式(7)求得每个时刻 SOC 的值。

5) 为了满足电池储能系统 $SOC(0)=SOC(24)$ ，在适应度函数中添加下面的惩罚项：

$$\lambda \times (SOC(T) - SOC(0))$$

使得结果满足功率等式约束条件。

6) 在各粒子等式及不等式约束的要求下，对初始粒子群进行速度更新和位置更新，计算粒子适应度，得出个体极值。

7) 在更新粒子群位置和速度前提下，进行迭代计算得到全局最优值。

8) 提取粒子最优解，进行后续策略操作处理。

从图 3 可以看出，本文首先对当前环境进行预处理，即依据相应的净负荷量给出初始化意见，然后在粒子群优化过程中，通过不断的优化所需要的微电网系统各单元的容量配置，达到收敛的效果，最后得到所需要的实际容量需求。

2.2 辅助储能系统部分

在微电网实际运用中，针对新能源发电的波动

性和不确定性，而本文引入辅助储能系统概念，可以有效地解决实时控制问题。辅助储能是区别于主储能电池的单元，在本文策略中，它不仅可以弥补新能源发电误差带来的影响，同时还可以解决实时控制时所需要的功率平衡问题。为了更好地解决不确定性问题，本文辅助储能系统采用的是功率型的超级电容器。

本文中关于辅助储能系统配置具体操作过程如下。

针对不同误差影响，本文采用模拟场景法，对某一环境下新能源发电误差进行模拟，产生众多场景，然后对这些场景进行分析，得出每个场景下辅助储能系统的充放电过程。为了能够充分消除新能源发电误差带来的影响，在该过程中，储能系统设定为无限大容量和无限大功率配置。最后通过这些电池的 SOC 以及功率变化曲线，给出每个环境下完全消除误差影响的最小配置方案，然后，针对上述各个场景的最小配置方案，画出频率分布直方图，依据分布图找出最优配置方案。

在得到最优配置方案的前提下，针对实时环境下产生的误差进行策略制定，通过策略控制辅助储能系统和燃气轮机之间的调度，由于实时调度无法顾及全局，所以在当前时刻进行最优操作，获得最大利益即可。具体情况和策略制定如表 1 所示，其中， $\Delta p_{re}(t)$ 为新能源发电误差。

表 1 辅助储能系统使用策略

误差状态	SOC 状态	使用操作
$\Delta p_{re}(t) > 0$	$(SOC_{max} - SOC(t)) \times W'_{ba} \geq \Delta p_{re}(t)$	辅助储能系统直接充电
	$(SOC_{max} - SOC(t)) \times W'_{ba} < \Delta p_{re}(t)$	先将辅助储能系统充满，其余新能源丢弃
$\Delta p_{re}(t) < 0$	$(SOC(t) - SOC_{min}) \times W'_{ba} \geq -\Delta p_{re}(t)$	辅助储能系统放电，弥补新能源缺额
	$(SOC(t) - SOC_{min}) \times W'_{ba} < -\Delta p_{re}(t)$	辅助储能电池放电到最低，不足燃气轮机补入

3 算例分析

3.1 算例系统

本文选取风力发电机、光伏发电机、电池储能系统以及微型燃气轮机各一组。同时对不同环境下的储能电池配置问题进行分析。系统参数如表 2 所示。

表2 算例系统参数设置

Table 2 Parameter setting of system

参数	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
数值	1 506	9 687	-5	9 845	-6.6
参数	β_1	β_2	β_3	δ	ϕ
数值	0.05	0.2	0.1	0.5	0.5
参数	γ	η_c	η_d	SOC _{min}	SOC _{max}
数值	0.5	0.96	0.96	0.2	0.8

本文所采用的各个场景的新能源发电功率数据以及场景的概率数据来源于香港台温台气象数据^[19](2012.09.01—2013.08.31); 负荷数据采用的是文献[20]中的居民负荷数据, 按新能源发电比例扩增。优化算法求解过程中, 粒子种群数量为 100, 迭代次数为 1 000 次。

3.2 算例结果

本文在 Matlab R2014a 中建立数据仿真实验, 得到的仿真结果如下所示。

3.2.1 主储能电池配置结果

针对孤网模式下的微电网运行, 在配置主储能电池系统时, 进行了两组实验, 分别是总净负荷远大于零和总净负荷接近于零。两种方案具体的负荷数量如图 4 所示, 可以看出, 案例 1 的总净负荷远大于零, 基本上各时刻的净负荷量都是大于零的; 案例 2 的总净负荷接近于零, 各时刻的净负荷在零附近波动。由于本文采用的是同一组负荷和新能源发电数据, 只是改变配比, 所以曲线波动趋势一致。

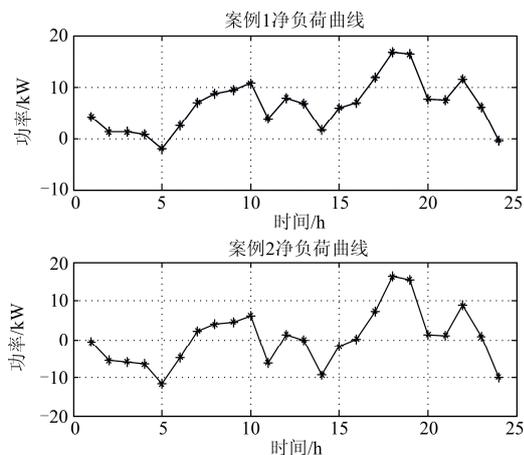


图4 净负荷曲线图

Fig. 4 Curve of net load

通过这两个案例, 依据图 3 所示的容量优化流程, 得出不同案例下的最优配置。图 5 是两种案例条件下优化后的燃气轮机发电功率, 可以看出, 针对这两种案例所采用的燃气轮机的配置也出现了不

同, 案例 1 采用的是 20 kW 的额定功率, 案例 2 则是 15 kW。而且两种方案中, 燃气轮机的发电趋势与净负荷曲线基本一致, 也就是说燃气轮机该模式下是解决负荷需求平衡问题的主力。

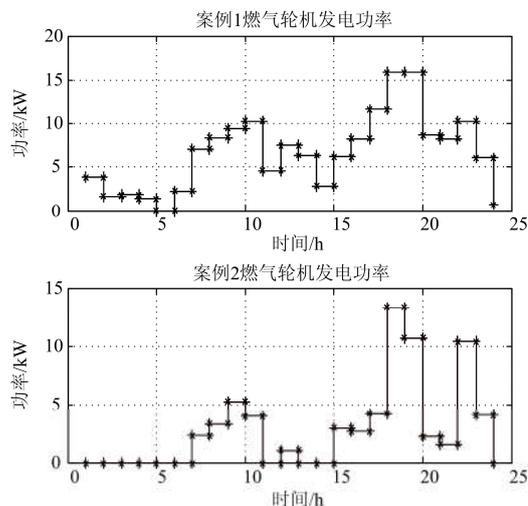


图5 燃气轮机发电曲线

Fig. 5 Power generation curve of turbine

同时, 储能系统的仿真结果如图 6 和图 7 所示。从仿真结果可以得出(数据见后面的表 3), 案例 1 所采用的储能电池额定功率为 2 kW, 功率在零附近变动, 抑制了储能电池的大幅波动; 案例 2 所需要的储能电池的额定功率为 5 kW, 功率的波动同样得到相应的控制。所以, 本文所提出的容量配置的策略, 可以有效地控制储能系统功率波动, 减小所需要的功率配置额度。从图 7 可以得出, 案例 1 的剩余电荷量在 3~7 kW 范围内波动, 同时剩余电荷量的稳定性也得到很好的控制, 并没有出现过度波动或者超出范围的现象; 案例 2 的储能电池额定容量配置就比较大, 从该角度也可以验证 2.1.1 节中的设想。

总之, 两个案例都在自身数据基础上, 完成了储能电池的额定功率和额定容量配置, 同时也将两者的波动控制在一定范围内, 降低了过度的损耗。

最后, 本文对弃电量进行比较, 如图 8 所示, 可以得出, 案例 1 的弃电量要比案例 2 少很多, 因为案例 2 的净负荷波动, 只能依靠储能电池的充放电优势进行弥补, 但是储能电池存在自身的容量限制, 所以在发电量较高的情况下只能采用弃电操作。

综上所述, 本文所提出的主储能电池配置策略, 能够对不同孤网环境下的燃气轮机和储能电池进行配置, 同时对设备使用波动性也有很好的抑制作用。

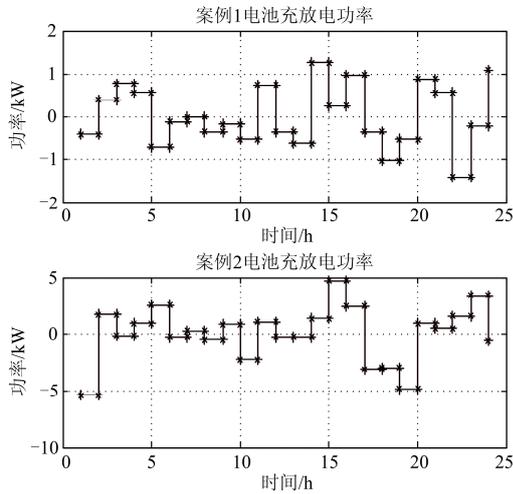


图 6 储能电池充放电曲线
Fig. 6 Charging/discharging of battery

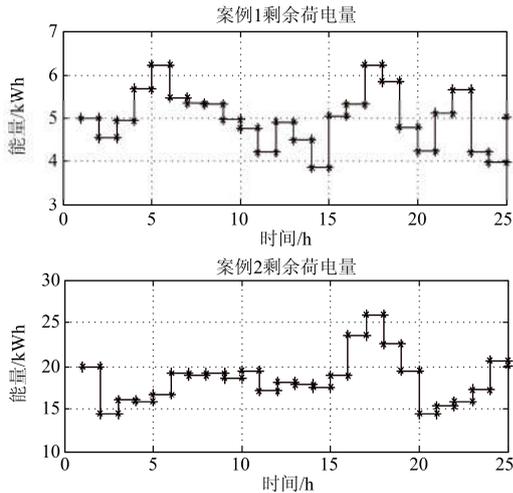


图 7 储能电池剩余荷电量曲线
Fig. 7 Remaining energy of battery

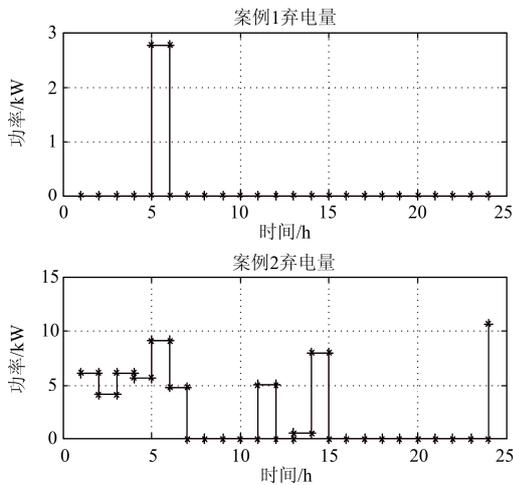


图 8 弃电量曲线
Fig. 8 Curve of abandoned energy

3.2.2 辅助储能电池配置结果

辅助储能系统的配置问题，主要采用的是场景模拟法，本文以方案 1 为例，设定在预测数据基础上，实时环境下将会产生 10% 的误差波动。通过对误差产生之后的储能电池以及燃气轮机协调控制，来实现辅助储能系统的配置。

如图 9 所示，选用其中一种场景进行配置，可以看出，该场景的误差波动比较剧烈，所以需要的配置也较大，本文仿真了 100 种不同场景，综合所有场景，得出超级电容器的最优额定功率配置为 0.5 kW，最优额定容量配置为 3 kWh。配置完成后，依据辅助储能系统控制策略，即可完成实时操作，并依据实时误差，调整能量管理。

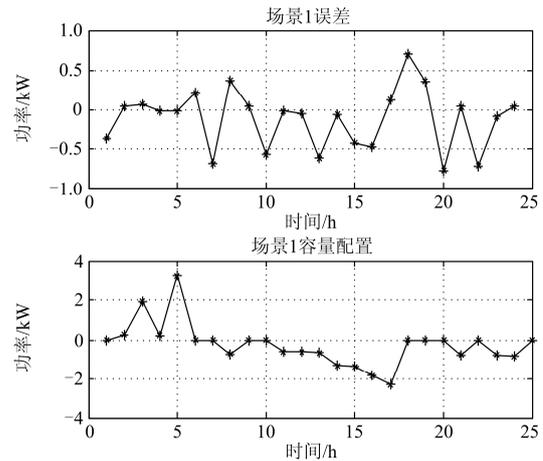


图 9 场景 1 误差处理结果
Fig. 9 Scenario 1 error processing results

3.2.3 数据分析结果

最后，通过上述结果，得出如表 3 所示的数据。从表 3 中可以得出，案例 1 需要的燃气轮机容量较大，但储能系统的需求较小，针对当下储能系统成本较高问题，有较大的优势，而案例 2 不仅储能系统容量配置需要很大，同时燃气轮机功率也没有很大的优势，也说明了在日净负荷近似为零，峰谷差大，负荷需求量的变化也很大，不仅需要较大的燃气轮机完成净负荷缺额，又需要较大的储能功率和容量完成调度。所以，本文通过实验验证了在 2.1.1 节的猜想，同时还能对微电网整体安装提出有效的建议。

表 3 各单元容量配置

	燃气轮机		主储能电池		辅助储能系统	
	功率	容量	功率	容量	功率	容量
案例 1	20	8	2	—	1	6
案例 2	15	—	5	30	—	—

4 结论

本文提出了一种基于日前预测和实时控制的储能系统容量配置策略,通过将储能系统分为两类,分别实现日前能量管理优化以及实时操作下的误差处理。在日前能量管理调度基础上,通过求解基于储能容量以及波动要求下的多目标优化问题,得到优化配置结果,完成能量管理调度任务。在实时环境下,通过场景模拟得出有效的储能配置,可以有效克服实时环境的误差影响,最后将设计运用实时控制,可以有效地缓解波动。同时,本文也通过控制储能系统的损耗,延长储能电池使用寿命。

参考文献

- [1] 白建华,辛颂旭,刘俊,等.中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3699-3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705.
- [2] 王鹤,李国庆.含多种分布式电源的微电网控制策略[J].电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
WANG He, LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 19-23.
- [3] 李潇雨,黄珂.分布式能源发展政策研究文献综述[J].华北电力大学学报(社会科学版),2015,42(1):20-25.
LI Xiaoyu, HUANG Ke. The literature review for the study on development policy of distribution energy[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2015, 42(1): 20-25.
- [4] 王博,肖峻,周济,等.主动配电网中分布式电源和微网的运行域[J].电网技术,2017,41(2):363-370.
WANG Bo, XIAO Jun, ZHOU Ji, et al. Dispatchable region of distributed generators and microgrids in distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 363-370.
- [5] 岳付昌,王博,杜云虎,等.离网型海岛综合能源微电网架构设计与实现[J].电力工程技术,2016,35(5):44-47.
YUE Fuchang, WANG Bo, DU Yunhu, et al. Architecture design and implementation of off-grid multi-energy micro-grid in marine areas[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5): 44-47.
- [6] 黎静华,汪赛.兼顾技术性和经济性的储能辅助调峰组合方案优化[J].电力系统自动化,2017,41(9):44-50.
LI Jinghua, WANG Sai. Optimal combined peak-shaving scheme using energy storage for auxiliary considering both technology and economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 44-50.
- [7] 袁铁江,陈洁,刘沛汉,等.储能系统改善大规模风电场出力波动的策略[J].电力系统保护与控制,2014,42(4):47-53.
YUAN Tiejiang, CHEN Jie, LIU Peihan, et al. Strategy of improving large-scale wind farm output fluctuation based on energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 47-53.
- [8] 吴杰,丁明.采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(3):7-12.
WU Jie, DING Ming. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using self-adaptive wavelet packet decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 7-12.
- [9] 荆朝霞,胡荣兴,袁灼新,等.含风/光/抽水蓄能并计及负荷响应的海岛微网优化配置[J].电力系统自动化,2017,41(1):65-72.
JING Zhaoxia, HU Rongxing, YUAN Zhuoxin, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/solar/pumped storage considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 65-72.
- [10] 祖其武,牛玉刚,陈蓓.基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行策略研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):57-63.
ZU Qiwu, NIU Yugang, CHEN Bei. Study on multi-objective economic operating strategy of microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 57-63.
- [11] YANG T. The optimal capacity determination method of energy storage system with different applications in wind farm[C] // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, October 25-28, 2016, Xi'an, China: 2081-2085.
- [12] 李秀磊,耿光飞,季玉琦,等.考虑实际运行的配电网电池储能系统的优化配置研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(9):88-94.
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Study on optimal allocation of battery energy storage in distribution network considering the actual operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 88-94.
- [13] 桑丙玉,王德顺,杨波,等.平滑新能源输出波动的储能优化配置方法[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3700-3706.

- SANG Bingyu, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Optimal allocation of energy storage system for smoothing the output fluctuations of new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3700-3706.
- [14] 杨家豪. 基于一致性算法的孤岛型微电网群实时协同功率分配[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 8-15.
- YANG Jiahao. Consensus algorithm based real-time collaborative power dispatch for island multi-microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 8-15.
- [15] 刘念, 李岩松, 张建华, 等. 微电网互联运行的分时优化与实时控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 1-11.
- LIU Nian, LI Yansong, ZHANG Jianhua, et al. Hour-ahead optimization and real-time control method for micro-grid interconnection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 1-11.
- [16] VRETTOS E I, PAPATHANASSIOU S A. Operating policy and optimal sizing of a high penetration RES-BESS system for small isolated grids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 744-756.
- [17] WANG D, LU K. Design optimization of hydraulic energy storage and conversion system for wave energy converters[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 70-78. DOI: 10.1186/s41601-018-0080-6.
- [18] 祖其武. 基于需求侧响应的微电网能量调度与经济运行[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- ZU Qiwu. Energy scheduling and economic operation of microgrid based on demand-side response[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017.
- [19] WANG H, HUANG J. Joint investment and operation of microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 833-845.
- [20] KARAMI H, SANJARIM J, HOSSEINIAN S H, et al. An optimal dispatch algorithm for managing residential distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2360-2367.

收稿日期: 2017-12-01; 修回日期: 2018-04-12

作者简介:

方磊(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微电网能量管理及储能系统; E-mail: fanglei0313@163.com

牛玉刚(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为随机系统, 无线传感网络, 智能电网。E-mail: acniuyg@ecust.edu.cn

(编辑 周金梅)