

基于MPC的直流微电网双层功率分配优化的研究

王士万¹, 史冬琳^{1,2}

(1. 吉林化工学院信息与控制工程学院, 吉林 吉林 132000; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132021)

摘要: 微电网中可再生能源 (Renewable Energy Source, RES) 和混合储能系统 (Hybrid Energy Storage System, HESS) 的集成成为终端用户和系统运营商提供了潜在的利益。然而, RES 的间歇性问题和储能系统的高成本需要深入研究, 以确保微电网的经济运行。提出了一种由蓄电池和超级电容器组成的混合储能系统, 对微电网双层双时间尺度的预测能量管理系统 (Energy Management System, EMS) 进行功率分配优化调度, 并对蓄电池和超级电容器的退化成本进行建模。为了以最小的运行成本维持较高的系统鲁棒性, 提出了分层调度模型, 以优化有限时间范围内微电网在公用电网中的经济性和可靠性。其中, 上层目标为最小化总运行成本, 下层目标为消除预测误差引起的波动和储能实时风电并网功率波动。仿真研究表明, 在两个控制层可以利用不同类型的储能元件特性, 功率调度分配优先级最高为超级电容器, 其次为微电网与公用电网交互, 最后为蓄电池。针对多个决策目标, 微电网运行的经济效益进一步提高。在实时定价方案中也验证了所提混合储能结构的有效性。

关键词: 微电网; 双层控制; 模型预测控制; 混合储能系统; 功率分配; 优化调度

Research on optimization of double-layer power distribution of DC microgrid based on MPC

WANG Shiwan¹, SHI Donglin^{1,2}

(1. Jilin Institute of Chemical Technology, School of Information and Control Engineering, Jilin 132000, China;

2. Northeast Electric Power University, School of Electrical Engineering, Jilin 132021, China)

Abstract: The integration of renewable energy sources (RES) and hybrid energy storage systems (HESS) in microgrids offers potential benefits to end users and system operators. However, the intermittent nature of RES and the high cost of ESS need to be carefully studied to ensure the economical operation of microgrids. A hybrid energy storage component composed of a battery and a supercapacitor is proposed to optimize the power allocation and scheduling of the predictive energy management system (EMS) of the microgrid with two layers and two time scales. The degradation costs of storage batteries and supercapacitors are modeled. In order to maintain high system robustness with minimal operating cost, a hierarchical scheduling model is proposed to optimize the economy and reliability of microgrid in public power consumption within a limited time range. Among them, the upper goal is to minimize the total operating cost, and the lower goal is to eliminate the fluctuations caused by prediction errors and the fluctuation of grid-connected power of real-time wind power for energy storage. The simulation results show that the characteristics of different types of energy storage components can be used in the two control layers, and the power dispatching and allocation priority supercapacitor is first, followed by the interaction between the microgrid and the public power grid, and then the storage battery. The economic benefits of the microgrid operation are further improved for multiple decision-making objectives. The real-time pricing scheme also verifies the effectiveness of the proposed hybrid energy storage structure.

Keywords: microgrid; double-layer control; model predictive control; hybrid energy storage system; power distribution; optimal scheduling

0 引言

近年来,对可再生能源的应用日益增加,促使微电网向更加智能化和现代化发展。微电网并网分布式电源包括常规电源和可再生能源(Renewable Energy Source, RES),它们以分散式的方式为终端用户供应预测负荷。然而,RES出力的间歇性和不可调度性给系统鲁棒性带来了问题。微电网中通常集成HESS以补偿功率不匹配的情况。HESS还可以作为与公用电网的双向中介来存储和输出能量,并基于各种控制策略为终端用户提供辅助服务和经济利益。为了满足不同的运行需求,结合不同类型的HESS为每个个体继承优势提供了有效可靠的解决方案^[1]。微电网中HESS的研究已从考虑即时功率共享和频率调节的实时运行,发展到体现充电策略和长期运行优化的调度问题。

文献[2]提出了一种基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的储能实时风电平衡策略,根据风电场储能的平抑原理建立风储系统的出力模型,兼顾了平抑效果和储能荷电状态(State of Charge, SOC)的保持及恢复。然而,该策略并未考虑混合储能元件的寿命问题,高频次、高深度的充放电对于蓄电池的寿命有着极大影响。文献[3]针对含有混合储能的微电网跟踪调度计划的问题,提出一种双层双时间尺度实时控制策略。上层为基于MPC建立跟踪调度计划的滚动控制策略,下层为混合储能实时控制策略,实时控制周期为1 min,相对缩短了计算时间,减小了预测误差,但并未考虑未消除误差的代价。文献[4]实现对风电和储能的精准控制。在对风电进行周期预测的基础上,构建了储能分层动态响应优化模型,上层优化利用大功率慢速响应储能单元,在长时间尺度上对风电进行能量转移;下层优化利用小功率快速响应储能单元,在短时间尺度上平滑风电功率波动,且上层优化结果作为下层优化的状态变量,再通过不同的预测步长来寻找最优的动态响应,然而并未兼顾微电网运行的经济效益。文献[5]针对MPC

策略的微电网能量管理,提出了一种以系统总运行成本为目标进行建模的方法。得出的目标函数和约束条件中含有绝对值函数和分段函数问题。通过混合逻辑动态控制,引入逻辑变量,将原目标函数和约束条件变成了混合整数规划模型,消去了绝对值和分段问题,同时分析了日前调度的弊端。然后在日前调度策略中加入滚动优化环节和反馈环节,但并未考虑到MPC计算时间的代价。文献[6]的研究主要集中在根据日前调度结果实时跟进日内调度计划,以联络线波动和蓄电池SOC预估输出值与日前计划值之间的误差最小为优化目标,利用MPC算法对微电网内分布式电源的日内运行计划进行调整,但该研究没有将预测误差考虑到优化目标中。

综上所述,目前直流微电网的研究主要集中于提高直流微电网运营的经济效益和最小化并网功率波动误差,但没有综合考虑直流微电网运行时的整体性能。储能系统的混合化进一步要求在不同的运行目标和储能系统特性下做出不同的调度决策。在HESS中,电池由于能量密度大,主要用于与其他部件和电网交换多余能量;超级电容器用于功率等级大,主要用于补偿瞬时功率不平衡。因此,面对HESS中的不同设备,EMS的综合设计需要不同的时间分辨率,即长期时域注重运行经济性,短期时域注重系统安全性^[7]。

本文针对含有HESS的微电网,提出一种双层功率分配优化实时控制策略。上层功率调度以最小化运行成本为目标,而下层以最小化RES预测功率波动和并网功率波动为目标。为此,建立了电池和超级电容的退化成本模型,以准确反映退化过程,为实时经济调度平衡长期运行成本和短期运行成本。根据不同储能元件的互补特性,构造了微电网系统的结构,并在此基础上重点介绍了所提的双层双时间尺度的实时控制策略的优化调度目标。

1 微电网系统模型

1.1 微电网结构

与典型微电网不同,直流微电网可灵活接入

直流负荷使用,在直流母线电压存在较小波动时,由超级电容器来稳定电压和能量调度,较大功率时才启用蓄电池,避免频繁充放损耗蓄电池寿命。本文研究的直流微电网由风机和太阳能板发电部分、超级电容器、蓄电池混合储能部分和交直流负荷单元组成。直流微电网的结构模型如图1所示。

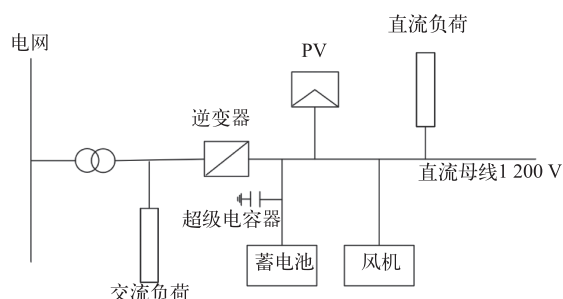


图1 直流微电网的结构模型

Fig. 1 Structural model of a DC microgrid

1.2 电价方案

公用电网电价通常由上层系统运营商以静态或动态的方式确定。固定价格往往事先设定,且不随网络条件变化,通常不会影响微电网中的用户用电模式,因为电力成本不随使用量的变化而变化。分时电价会根据时间段的不同而有所变化,通常分为高峰时段、平谷时段和低谷时段,电价在高峰时段较高,而在低谷时段较低,鼓励用户在电力需求低时使用电力,从而缓解公用电网负荷压力。阶梯电价随着用电量的增加而递增,通常设定几个用电档次,每个档次的电价不同。实时电价则根据实时的市场供需情况波动。用户可以在电价较低时用电,从而降低电费开支。这种模式更能反映市场的实际情况,但也可能因价格波动而使用户感到不稳定。实时电价往往提前数小时公布,允许用户提前调度,因此可以充分利用微电网以最小化运营成本。在允许双向通信的情况下,微电网还可以通过向公用电网出售部分多余电量来盈利。

1.3 混合储能系统

微电网中的HESS由蓄电池和超级电容器组成,它们具有互补特性。电池能够存储大量的电能,具有较高的能量密度;而超级电容器具有

较高的功率密度,能够对充放电事件进行快速响应。HESS的主要功能包括维持瞬时功率平衡和最小化一段时间内的运行成本。因此,蓄电池和超级电容器具有不同的目标,即蓄电池作为分布式发电单元进行经济调度,而超级电容器作为分布式发电单元进行功率调度^[8]。

2 退化成本建模

储能系统的退化对分析评估微电网的经济运行非常重要。为了准确分析微电网能量管理的成本特性,本节对HESS的退化成本进行了讨论和数学建模,特别是对蓄电池和超级电容器进行了建模。

2.1 电池退化成本建模

电池寿命的退化主要受两个因素影响,即反映电池单元可达到总循环次数的循环寿命老化和占可用能量的容量磨损。频繁充放电次数和充放电倍率对电池寿命有很大的影响。不适当的循环可能会导致电池加速退化,甚至失效。除了循环条件外,状态参数对电池寿命也有显著影响。过高或过低的SOC都会急剧恶化电池的充放电性能。在实际应用中,温度控制器往往包含在电池管理系统中,因此,假设环境因素导致的电池退化可以忽略,就充电倍率的影响而言,当电池工作在一定额定电流范围内时,其对电池寿命的直接影响相对于镍镉其他参数可以忽略不计^[9]。图2显示了镍镉电池的寿命周期数与放电深度

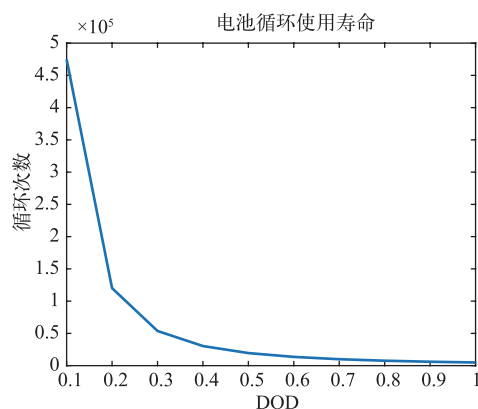


图2 镍镉电池寿命周期数与 DOD 的关系

Fig. 2 Relationship between the number of nickel-cadmium battery life cycles and DOD

(Depth of Discharge, DOD) 的关系。表达式为

$$L_B(d_B) = ad_B^{-b}e^{-cd_B} \quad (1)$$

式中, d_B 为放电深度; a 、 b 、 c 为曲线拟合系数, $a=4\ 980$, $b=1.98$, $c=0.016$ 。

蓄电池的生命周期数随着DOD的增加而减少。式(1)也适用于其他参数不同的电池类型, 如锂离子电池和铅酸电池。为了使电池退化成本模型更符合实际情况, 合理地假设生命周期的经验数据能够准确地估计长期退化效应, 即每个充放电循环事件对寿命的影响与历史充放电曲线无关。

考虑实际容量和DOD两个因素, 电池退化模型可以假设为: 退化过程在整个电池寿命中认为是时间的线性函数, 相同DOD水平的每个充放电循环事件在不同SOC水平下的退化成本相同。

电池退化成本模型代表了对其实容量和寿命的直接折旧。考虑从 t 时刻开始的放电事件, 其平均功率为 $P_B(t)$, Δt 为时间间隔, 在此时间间隔内的DOD, 即 $d_B(t)$ 为

$$d_B(\Delta t) = \frac{P_B(t)\Delta t}{E_{BA}(t)} \quad (2)$$

式中, $E_{BA}(t)$ 为蓄电池 t 时刻的实际容量, 利用充放电效率的系数 η_{Bc} 和 η_{Bd} , 根据图2可以得到单位能量的平均降解成本为

$$C_{BAC}(t, d_B(\Delta t)) = \frac{C_B \Delta t}{2L_B(d_B(\Delta t))E_{BA}(t)d_B(\Delta t)\eta_{Bc}\eta_{Bd}} \quad (3)$$

式中, C_B 为蓄电池更换成本, 需要注意的是, 每个DOD= d_B 的充放电事件是一个平均化的退化成本。因此, 可以通过简单地乘以从电池输出的能量来得到该放电事件对应的电池退化成本, 即

$$C_{BDC}(t, d_B(\Delta t)) = C_{BAC}(t, d_B(\Delta t))P_B(t) \quad (4)$$

循环事件发生后, $t+\Delta t$ 时刻电池的实际容量按比例折旧, 计算式为

$$E_{BA}(t+\Delta t) = E_{BA}(t) - \frac{E_{B,r}}{L_B(d_B(\Delta t))} \quad (5)$$

式中, $E_{B,r}$ 为蓄电池额定电池容量。

为了解决相同的退化效应对电池的影响, 考虑充电事件的成本和放电事件的相等。值得注意的是, 过高或过低的SOC长时间运行实际上会导致电池内部阻抗的上升和电解液的分解, 从而导致容量损失和功率衰退, 但这种衰退在短期内与长期充放电事件引起的退化相比并不明显。

2.2 超级电容器退化成本建模

超级电容器的寿命主要取决于液体电解质的蒸发速率, 该速率是温度和端电压的主要函数。一般情况下, 超级电容器的寿命随着中心温度的升高而降低。超级电容器能够经历比电池更多的深度循环, 且表现出超过10年或更长的寿命, 而不受循环应力的限制。超级电容器的日历老化效应主要由电压和温度效应引起。特别地, 热条件会对超级电容器的性能产生很大的影响, 温度过高会加速电容的衰减, 而充放电倍率的影响则较小^[11]。

在合适电压范围的最大工作温度下, 超级电容器的寿命总是由制造规范给出, 因此, 可以合理假设在正常工作条件下, 超级电容器将持续到预计的寿命。在不同的DOD下, 超级电容器的降解成本被认为是时间的线性函数。给定估计的超级电容器寿命 L_{SC} 和更换成本 C_{SC} , 任意时间间隔 Δt 的超级电容器退化成本可以表示为

$$C_{SCDC}(t) = \frac{C_{SC}\Delta t}{L_{SC}} \quad (6)$$

式(6)表明, 超级电容器的降解成本只与时间有关。因此, 只要将超级电容器应用于微电网, 其退化成本就与时间成线性关系。这使得超级电容器更适用于频繁充放电以补偿瞬时功率不平衡。

3 双层控制原理

不同于文献[12]中提出的以预测误差和退化成本最小化为目标的两层结构, 本文在此基础上提出了EMS。通过引入HESS的退化模型和承担能量调度优先级, 实现了最小运行成本, 同时也兼顾了并网功率的平抑效果。

双层EMS的目标是在有限时间内优化电源和

能源资源的功率调度,使微电网在满足RES不确定性的同时,实现最小化经济运行。考虑一个结合MPC框架的离散时间优化问题,实时反馈储能单元的状态,并补偿预测误差。图3展示了所提出的双层EMS的结构。

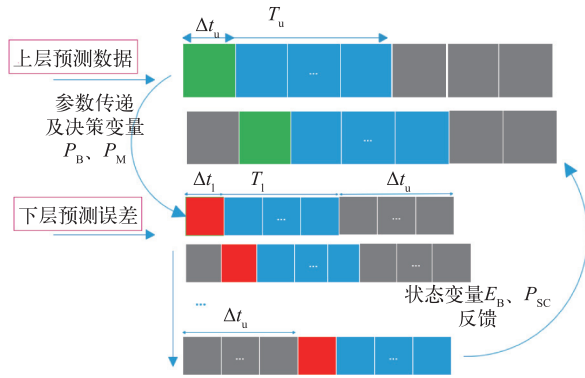


图3 双层EMS结构

Fig. 3 Double-layer EMS structure

图3中, T_u 和 T_l 分别为上下层预测时域的长度。上层EMS由非线性滚动模型预测控制器构成,其控制时域为 $t_u \in \{1, \dots, T_u\}$ 。下层EMS为二次型模型预测控制器,其控制时域为 $t_l \in \{1, \dots, T_l\}$, Δt_u 和 Δt_l 分别为上层和下层的时间间隔。每一时间区间内的控制动作是通过求解各层中各自的目标函数得到的,其中一层的决策影响另一层的决策。上层决策变量为蓄电池功率 $P_B(t)$ 和电网功率 $P_M(t)$,完成上层控制目标后,将上层的所有状态量传递到下一层;下层的决策变量为 $P_M(t)$ 、 $P_B(t)$ 和 $P_{SC}(t)$,完成控制目标后的状态变量作为下一时刻上层的初始状态量。

3.1 ESS的数学模型和约束条件

对于上层和下层,必须时刻满足功率平衡约束,表示为

$$P_L(t) = P_M(t) + P_B(t) + P_{SC}(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t), \quad t \in \{t_u, t_l\} \quad (7)$$

式中, $P_L(t)$ 为所有负荷功率; $P_B(t)$ 、 $P_{SC}(t)$ 分别为蓄电池和超级电容器的功率; $P_{PV}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 分别为光伏和风机的发电功率。

考虑充放电效率,电池和超级电容器的离散时间容量差分方程分别为

$$E_B(t) = \begin{cases} E_B(t-1) - P_B(t)\Delta t\eta_{Bc}, & P_B(t) \leq 0 \\ E_B(t-1) - \frac{P_B(t)\Delta t}{\eta_{Bd}}, & P_B(t) > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta t \in \{\Delta t_u, \Delta t_l\}, t \in \{t_u, t_l\}$$

$$E_{SC}(t) = \begin{cases} E_{SC}(t-1) - P_{SC}(t)\Delta t\eta_{SC}, & P_{SC}(t) \leq 0 \\ E_{SC}(t-1) - \frac{P_{SC}(t)\Delta t}{\eta_{SCd}}, & P_{SC}(t) > 0 \end{cases} \quad (9)$$

不等式约束包括公用电网、蓄电池和超级电容器的功率容量限制,分别为

$$P_M^{\min}(t) \leq P_M(t) \leq P_M^{\max}(t) \quad (10)$$

$$P_B^{\min}(t) \leq P_B(t) \leq P_B^{\max}(t) \quad (11)$$

$$P_{SC}^{\min}(t_l) \leq P_{SC}(t_l) \leq P_{SC}^{\max}(t_l) \quad (12)$$

为防止蓄电池过充过放,其SOC限值为

$$S_{SC}^{\min}(t) < \frac{E_B(t)}{E_{BA}(t)} < S_{SC}^{\max}(t), t \in \{t_u, t_l\} \quad (13)$$

据此,超级电容器SOC极限表示为

$$S_{SC}^{\min}(t) < \frac{E_{SC}(t)}{E_{SC,r}} < S_{SC}^{\max}(t), t \in \{t_u, t_l\} \quad (14)$$

式中,允许微电网向公用电网售电时, $P_M(t)$ 为负,购电时为正。

3.2 上层EMS的目标函数

上层EMS的目标是优化决策变量 $\{P_M(t_u), P_B(t_u)\}$ 并以最小化总成本运行,包括公用电网负荷成本、微电网与公用电网交互总成本和电池退化成本。

微电网与公用电网交互总成本为

$$C_M^u(t_u) = c_m(t_u)P_M(t_u)\Delta t \quad (15)$$

由于每个时间间隔 Δt 内的电池退化成本只有在充电或放电事件结束后才能确定,因此必须指定电池的功率流向 $P_B(t_u)$ 。为此,首先将 $g(t_u)$ 定义为一个辅助二进制变量,用来表示连续两个时间间隔内充放电事件上的状态转移,即

$$g(t_u) = \begin{cases} 1, & P_B(t_u)P_B(t_u-1) \leq 0 \\ 0, & P_B(t_u)P_B(t_u-1) > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$E_a(t_u)$ 为在循环事件发生改变之前,以 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 为单位的累积能量,表达式为

$$E_a(t_u) = (1 - g(t_u))E_a(t_u - 1) + P_B(t_u)\Delta t \quad (17)$$

因此,连续时间间隔内的电池退化成本可用状态转移信号 $g(t_u)$ 和累积能量 $E_a(t_u)$ 表示为

$$C_B(t_u) = C_{\text{BDC}} \left(t, \frac{E(t_u)}{E_B(t_u)} \right) - (1 - g(t_u)) C_{\text{BDC}} \left(t_u, \frac{E_a(t_u - 1)}{E_B(t_u - 1)} \right) \quad (18)$$

结合目标函数中的用电成本和电池退化成本，上层EMS中的优化问题是一个非线性规划问题，因为电池退化成本是高度非线性的。优化问题 J_u 可表示为

$$J_u : \min \sum_{t_u \in \{1, 2, \dots, T_u\}} C_M^u(t_u) + \sum_{t_u \in \{1, 2, \dots, T_u\}} C_B^u(t_u) \quad (19)$$

3.3 下层EMS的目标函数

超级电容器退化成本是时间的函数，故其成本可以写为

$$\sum_{t_l \in T_l} C_{\text{SC}}^l(t_l) = \frac{C_{\text{SC}}}{L_{\text{SC}}} T_L \quad (20)$$

可以观察到超级电容器的退化成本与充放电功率无关。因此，在目标函数中，除了超级电容器的退化成本外，还加入了代表与上层EMS提供的参考偏差的惩罚成本 $C_B^l(t_l)$ 和 $C_M^l(t_l)$ ，以及新能源并网时造成的功率波动误差 $C_{\text{gc}}^l(t_l)$ 。为简述问题，令混合储能和风光功率分别为： $P_{\text{ess}}(t_l) = P_B(t_l) + P_{\text{SC}}(t_l)$ ； $P_R(t_l) = P_{\text{WT}}(t_l) + P_{\text{PV}}(t_l)$ 。给定上层功率指令，惩罚成本可以表示为

$$P_{\text{gc}}(t_l) = P_{\text{gc}}(t_l - 1) + \Delta P_{\text{ess}}(t_l) + \Delta P_R(t_l) \quad (21)$$

$$P_R(t_l) = P_R(t_l - 1) + \Delta P_R(t_l) \quad (22)$$

$$\text{SOC}(t_l) = \text{SOC}(t_l - 1) + \frac{P_{\text{ess}}(t_l) \Delta t}{S_{\text{ess}}} \quad (23)$$

式中， S_{ess} 为HESS的配置容量； Δt 为风光控制时间间隔。

由式(21)~式(23)构建风光系统出力控制的状态空间方程。设受控系统某时刻的状态量为 $x(t) = (P_{\text{gc}}(t_l) \ P_{\text{ess}}(t_l) \ \text{SOC}(t_l))^T$ ，控制量为 $u(t) = \Delta P_{\text{ess}}(t_l)$ ，扰动量为 $r(t) = \Delta P_R(t_l)$ ，输出量为 $y(t) = x(t)$ ，则状态空间方程的一般形式为

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Cr(r) \quad (24)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-\Delta t}{S_{\text{ess}}} & 1 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

式中， A 、 B 、 C 分别为各向量的系数矩阵； $x(t+1)$ 为下一时刻预测的状态变量。

由上述状态空间表达式可对 $y(t)$ 在 t 时的后续时刻输出进行预测，即

$$\begin{aligned} y(t+1|t) &= Ax(t) + Bu(t+1) + Cr(t) \\ y(t+2|t) &= Ax(t+1) + Bu(t+2) + Cr(t+2) \\ &= A^2x(t) + Au(t+1) + ACr(t+1) + Bu(t+2) + Cr(t+2) \\ &\vdots \\ y(t+N_m|t) &= A^{N_m}x(t) + \sum_{i=1}^{N_m} A^{N_m-i} Bu(t+i) + \sum_{i=1}^{N_m} A^{N_m-i} Cr(t+i) \end{aligned} \quad (25)$$

式中， $y(t+N_m|t)$ 为预测模型在 t 时刻对 $t+N_m$ 时刻的风光并网功率作出的预测。

MPC对基于状态空间形式的风光出力系统的控制模型预测作用为

$$\begin{pmatrix} y(t+1|t) \\ y(t+2|t) \\ y(t+3|t) \\ \vdots \\ y(t+N_m|t) \end{pmatrix} = A^1 x(t) + B^1 \begin{pmatrix} u(t+1) \\ u(t+2) \\ u(t+3) \\ \vdots \\ u(t+N_m) \end{pmatrix} + C^1 \begin{pmatrix} r(t+1) \\ r(t+2) \\ r(t+3) \\ \vdots \\ r(t+N_m) \end{pmatrix} \quad (26)$$

式(26)中系数矩阵为

$$\begin{aligned} A^1 &= (A \ A^2 \ A^3 \ \dots \ A^{N_m})^T \\ B^1 &= \begin{pmatrix} B & 0 & 0 & \dots & 0 \\ AB & B & 0 & \dots & 0 \\ A^2B & AB & B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N_m-1}B & A^{N_m-2}B & A^{N_m-3}B & \dots & B \end{pmatrix} \\ C^1 &= \begin{pmatrix} C & 0 & 0 & \dots & 0 \\ AC & C & 0 & \dots & 0 \\ A^2C & AC & C & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N_m-1}C & A^{N_m-2}C & A^{N_m-3}C & \dots & C \end{pmatrix} \\ C_{\text{gc}}^l(t_l) &= (P_{\text{gc}}(t_l) - P_R(t_l))^2 \quad (27) \\ C_B^l(t_l) &= (P_B^u(t_l) - P_B^l(t_l))^2 \quad (28) \end{aligned}$$

$$C_M^l(t_1) = (P_M^u(t_u) - P_M^l(t_1))^2 \quad (29)$$

式中, $P_{gc}(t)$ 为下层 5 min 内实时预测直流微电网与公用电网的并网功率; $P_R(t_u)$ 为上层 1 h 风光的期望并网功率。

在每个预测时域结束时, 超级电容器的 SOC 应保持在一个标称值^[13], 以便在下一时刻能够提供良好的充放状态。因此, 预测时域终端超级电容器容量的惩罚项 $C_{sc}^l(t_1)$ 也可以表示为二次函数, 即

$$C_{sc}^l(t_1) = (E_{sc}^u(t_u) - E_{scr}) \quad (30)$$

优化问题 J_1 在下层可以表示为二次规划问题, 即

$$J_1 : \min \left\{ \sum_{t_1 \in \{1, 2, \dots, T_1\}} + \sum_{t_1 \in \{1, 2, \dots, T_1\}} \left[\sigma_{gc}^l C_{gc}^l(t_1) + \sigma_B^l C_B^l(t_1) + \sigma_M^l C_M^l(t_1) + \sigma_{sc}^l C_{sc}^l(t_1) \right] \right\} \quad (31)$$

3.4 双层控制逻辑

初始化上层控制时间, 令 $t_1=1$ 增加到 $t_1=T_u$, 引入负荷和新能源发电功率数据, 计算上层优化目标函数。设置决策变量为蓄电池功率和大电网功率, 并传递给下层, 下层引入负荷和新能源预测误差数据, 利用预测模型计算在下层预测时域内并网功率最小误差, 并计算下层优化目标时的大电网功率、蓄电池功率和超级电容器的功率, 分配功率调度, 完成后将蓄电池和超级电容器的 SOC 返回给上一层, 控制步骤如图 4 所示。上层 EMS 最小化包括用电和退化成本在内的总运行成本, 并将决策变量 $P_B(t_u)$ 、 $P_M(t_u)$ 传递给下层作为参考。考虑负荷波动和 RES 预测误差, 对每个时段 T_1 执行优化过程, 并在其后进行下层调度。在 t_u 内所有调度决策完成后, 上层更新状态变量 $E_B(T_1)$ 、 $E_{sc}(T_1)$, 对 $t_u=t_u+1$ 开始调度。

需要注意的是, 在下层, 超级电容器有时会在 RES 出力越来越大的情况下达到容量极限。由于上层 EMS 要求维持蓄电池出力恒定, 为了不违反超级电容器约束, 需要对上层混合储能中所有元件进行新的调度^[14]。

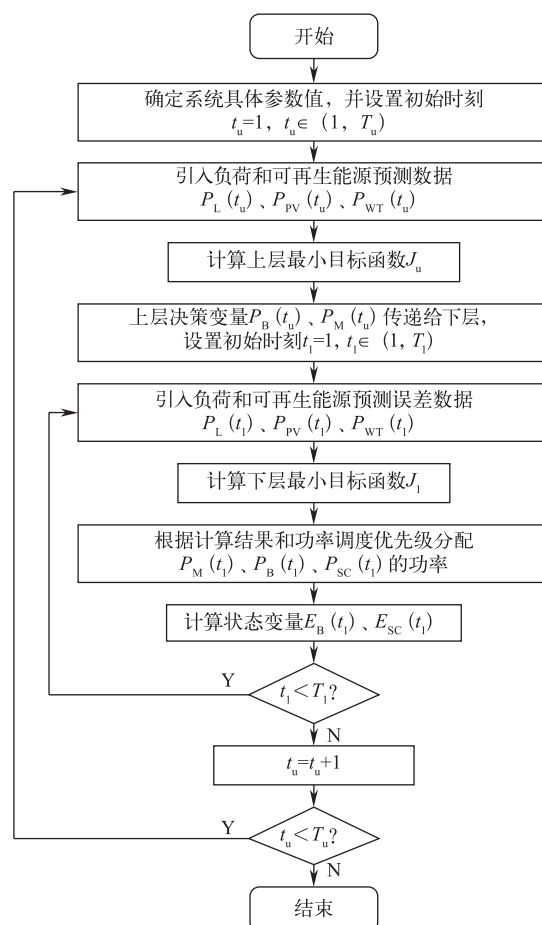


图 4 基于 MPC 双层 EMS 的优化步骤

Fig. 4 Optimization steps based on MPC two-layer EMS

4 仿真

4.1 基础数据

利用 MATLAB, 上下层优化问题分别采用求解器 Yalmip 和 Gurobi 进行求解, 针对 48 h 的调度周期进行仿真, 上层和下层的时间间隔分别设置为 1 h 和 5 min, HESS 参数见表 1, 负荷、光伏和风力发电机的功率曲线如图 5 所示, 实时电价如图 6 所示。

表 1 HESS 参数

Tab. 1 Parameters of HESS

类型	价格 / [元 / (kW·h)]	额定 容量 / kW	输出 功率 / kW	$S^{\min}$ (%)	$S^{\max}$ (%)	η_c (%)	η_d (%)
蓄电池	4 200	12	4	10	90	95	95
超级电容器	25 200	1	10	0	100	92	92

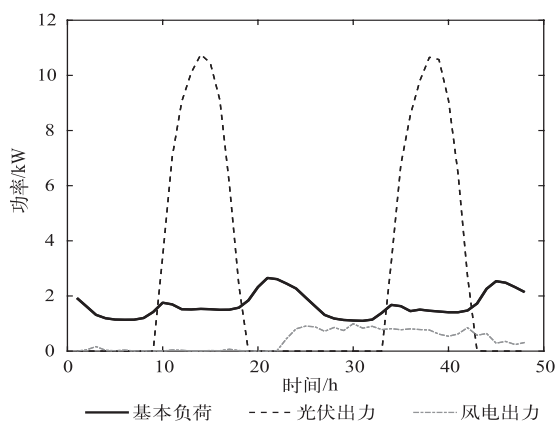


图5 风光荷功率曲线

Fig. 5 Wind and solar load power curves

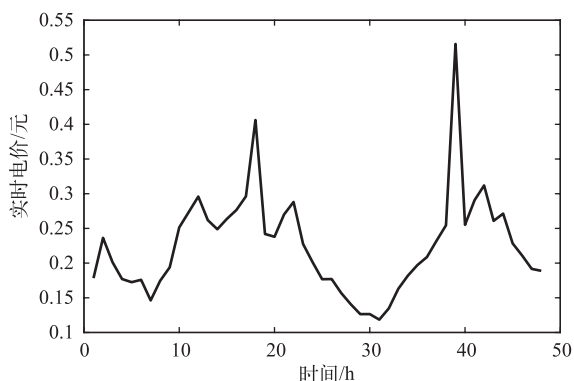


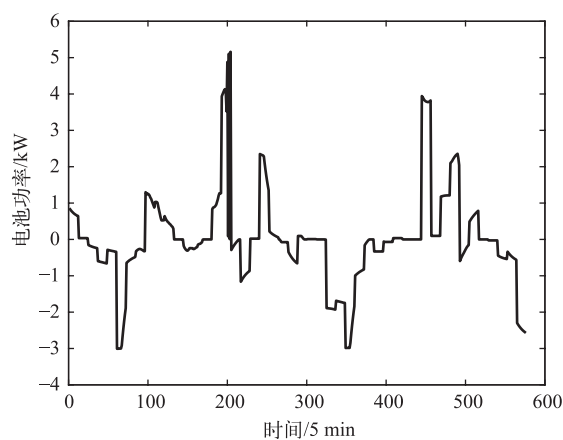
图6 实时电价

Fig. 6 Real-time electricity prices

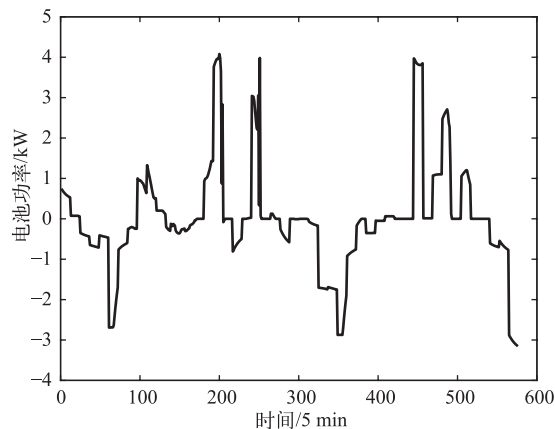
4.2 结果分析

考虑混合储能的退化成本、实时电价运营的经济效益，以及短时间尺度内RES预测误差对电池和电网功率参考值造成的偏差，得到了蓄电池的实时功率最优调度结果，如图7a所示。由于微电网的结构改变，为了减小蓄电池的放电深度，延长使用寿命，功率调度优先使用超级电容器。此外，下层还考虑RES的间歇性对微电网电压稳定性的影响。得到了蓄电池的实时功率最优调度结果，如图7b所示。

双层能量管理经济优化调度下的蓄电池功率放电最大值超过5 kW，充电最小值超过3 kW。采用双层功率分配等级优化调度时，蓄电池功率放电最大值在4 kW以内，充电最大值在3 kW以内。相比之下，双层功率分配等级优化调度使蓄电池的利用更加平衡，过充过放更加优化。



(a) 双层能量管理经济优化调度



(b) 双层功率分配等级优化调度

图7 蓄电池储能调度结果

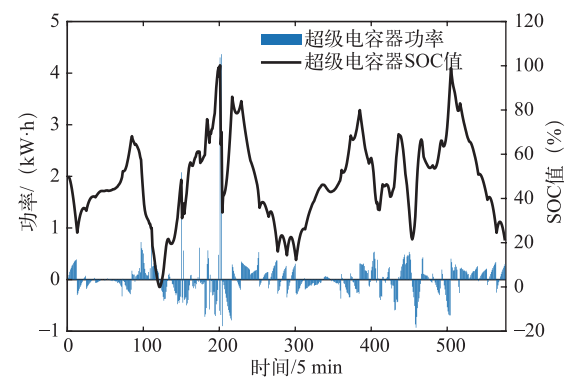
Fig. 7 Battery energy storage scheduling results

超级电容器的优化调度结果如图8所示。相对于图8a，图8b中超级电容器参与了更多的功率平抑补偿，可以看到超级电容的功率变化频率和充放电功率值一直处于较高的水平状态，更加充分地利用了超级电容器小功率范围快速充放的性能。

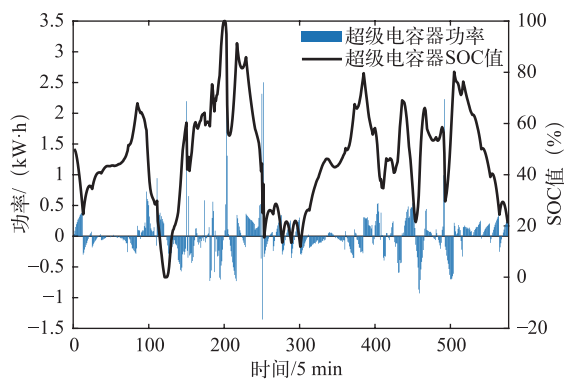
在考虑退化成本经济最优的双层EMS中混合储能退化成本如图9a所示，在功率分配等级优化后混合储能退化成本如图9b所示。

相对于图9a，图9b中的退化成本相对较小，原因是超级电容器的优先工作，减少了蓄电池的退化成本。

只考虑退化成本的最小经济运行双层EMS运行成本如图10a所示。下层兼顾RES发电并网功率最小，根据不同储能元件的特性设置功率分配优先级，得到微电网运行成本如图10b所示。



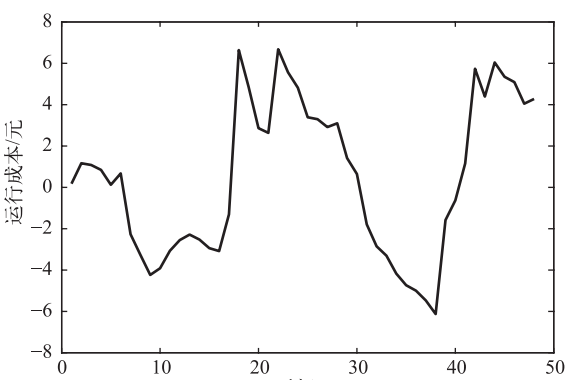
(a) 双层能量管理经济优化调度



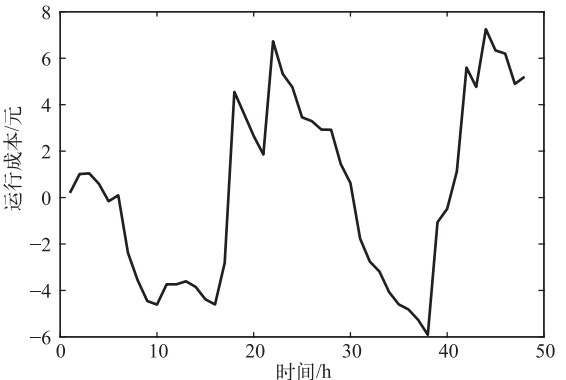
(b) 双层功率分配等级优化调度

图 8 超级电容器储能调度结果

Fig. 8 Supercapacitor energy storage scheduling results



(a) 双层能量管理经济优化调度



(b) 双层功率分配等级优化调度

图 10 平均每小时的运行成本

Fig. 10 Average hourly running costs

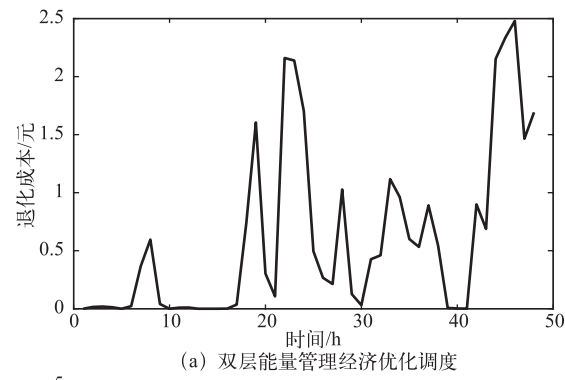
图10中，在实时定价的情景下，微电网除去所有的运维成本、基础设施成本和负荷用电成本，图10a还在7~17 h和31~39 h期间出现了盈利状态，总成本为21.91元，图10b运行总成本为12.11元。

在本文的设计中，同时还进行了不同预测时域的各项指标数据比较。不同预测时域上下层的单次计算时间、微电网运行总成本和平均每时运行成本见表2。

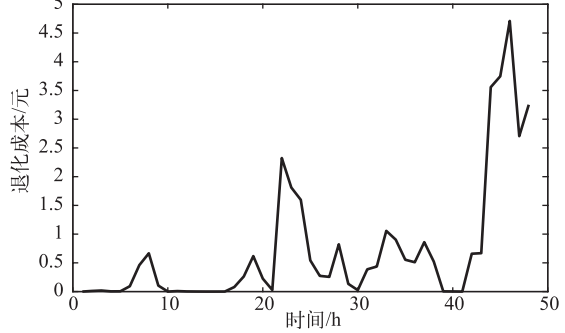
表 2 不同预测时域的结果比较

Tab. 2 Comparison of results in different prediction time domains

预测时域 /h	上层计算时间 /s	下层计算时间 /s	运行总成本 /元	平均每时运行成本 /元
12	0.223	0.111	5.48	0.457
24	0.795	0.889	6.51	0.271
48	1.903	1.905	12.11	0.252
72	3.221	3.303	7.89	0.110
96	4.253	4.582	34.82	0.363



(a) 双层能量管理经济优化调度



(b) 双层功率分配等级优化调度

图 9 混合储能退化成本

Fig. 9 Degradation costs of hybrid energy storage

由表2可知,随着预测时域的增加,计算上下两层控制时域内功率调度的时间呈递增趋势。由于考虑了混合储能元件的退化成本,因此预测时间越长,总运行成本越高。又由于微电网和公用电网交互可以售电,且电价是实时电价,因此在预测时域为72 h时,运行总成本并未遵循递增规律。综合考虑计算时间成本和运行总成本,选择预测时域为48 h最佳。

5 结束语

本文提出了一种双层功率分配优化实时控制。在预测风机与光伏功率波动误差最小的情况下,实现运营成本最小化,并进一步根据功率优先分配等级优化功率调度,实现了经济效益的再次提升。双层控制中,上层以最小化运行成本为目标进行功率调度,下层以最小化预测误差和风光功率并网功率误差最小化为目标进行功率调度。上层预测时域1 h和下层预测时域5 min的设计可以使单层MPC或者双层MPC实时控制的计算时间相对缩短。该微电网包括微电网与公用电网的交互、HESS、RES系统和负荷单元。仿真研究成功地证明了HESS可以在不同的层用于多个决策目标,实现了经济效益的进一步提升。

参考文献

- [1] 刘扬波,张熙,康龙云,等.基于二次分解平抑风电波动的混合储能系统容量配置[J/OL].电力系统及其自动化学报,1-9[2024-06-12].
- [2] 谭珺元.基于储能的风电功率波动平抑控制及容量配置研究[D].济南:山东大学,2022.
- [3] 吴岩,王玮,吴学智,等.微电网跟踪调度计划双层双时间尺度实时控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(1):120-134.
- [4] 吴传申,刘宇,高山,等.基于预测控制的储能系统多时间尺度动态响应优化研究[J].全球能源互联网,2020,3(3):222-230.
- [5] 章子涵.基于经济性最优MPC的微电网能量管理策略研究[D].武汉:湖北工业大学,2019.
- [6] 石栋安.基于MPC的微电网调度优化的研究[D].西安:西安工业大学,2019.
- [7] 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):10-14,23.
- [8] 候顺达.基于模型预测控制的直流微网控制策略研究[D].北京:华北电力大学,2020.
- [9] 韩晓娟,程成,籍天明,等.计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J].中国电机工程学报,2013,33(34):91-97.
- [10] 徐群,吕晓禄,武乃虎,等.考虑电池寿命和过放现象的风电场储能容量优化[J].电网技术,2014,38(6):1505-1511.
- [11] 张帆.风储微网中混合储能系统容量优化配置及控制研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.
- [12] CHENGQUAN J, PENG W, LALIT G, et al. A two-Layer energy management system for microgrids with hybrid energy storage considering degradation costs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6047-6057.
- [13] 孙玉树,唐西胜,孙晓哲,等.风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J].中国电机工程学报,2017,37(S1):88-97.
- [14] 冯江霞,梁军,冯益坤.基于风电功率 min 级分量波动特性的风电场储能容量优化计算[J].电力系统保护与控制,2015,43(3):1-6.

作者简介

王士万(2002—),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电并网控制。

(收稿日期:2024-09-12)