

基于 PMP 的风储联合最优调峰控制策略研究^{*}

廖英祺¹, 荆江平², 嵇文路¹, 宋冰倩¹

(1. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210019;

2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 风电大规模接入会使电网的调峰压力增大, 配置储能可以有效缓解系统调峰压力。为了提高系统运行的经济性, 需要制定合理的风储联合调峰策略, 优化风机减载功率和储能充放电功率。将风储联合调峰问题转化为最优控制问题, 提出了一种基于庞特里亚金最大值原理(PMP)的最优调峰控制策略, 对该问题进行求解。鉴于储能的损耗模型是复杂的非线性模型, 采用间接打靶法求解最优控制的数值解。从求解哈密顿函数最小值的角度入手, 提出改进调峰策略, 减少了策略算法求解时间。最后, 通过算例对所提的最优调峰策略进行分析, 算例结果验证了所提调峰策略的有效性。

关键词: 风储联合系统; 调峰策略; 庞特里亚金最大值原理; 间接打靶法; 经济性

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)05-0072-10

doi: 10.12177/emca.2023.049

Research on Optimal Peak Shaving Control Strategy of Wind-Storage Combined System Based on PMP^{*}

LIAO Yingqi¹, JING Jiangping², JI Wenlu¹, SONG Bingqian¹

(1. Nanjing Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Large-scale access of wind power will increase the peak shaving pressure of the power grid, while the allocation of energy storage can effectively alleviate the pressure. In order to improve the economy of system operation, it is necessary to formulate a reasonable peak shaving strategy of the combined system, optimizing the load shedding power of wind turbine and the charge and discharge power of energy storage. The peak shaving problem of wind-storage combined system is transformed into an optimal control problem, and an optimal peak shaving control strategy based on Pontryagin maximum principle (PMP) is proposed to solve this problem. Since the loss model of energy storage is complex and nonlinear, the indirect shooting method is used to figure out the numerical solution of the optimal control. Afterwards, an improved peak shaving strategy is proposed to reduce the solution time through solving the minimum value of Hamilton function. Finally, an example is given to analyze the proposed optimal peak shaving strategy, and the example results verify the effectiveness of the proposed peak shaving strategy.

Key words: wind-storage combined system; peak shaving strategy; Pontryagin maximum principle (PMP); indirect shooting method; economy

0 引言

近年来,随着经济的快速发展,对能源的需求

日益增加,为了应对能源枯竭和环境污染等问题,风电等新能源的装机规模不断扩大,截止 2022 年底,全国风电累计并网装机容量为 3.654 4 ×

收稿日期: 2023-01-04; 收到修改稿日期: 2023-02-24

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB0905904); 江苏省电力有限公司科技项目(J2022160)

作者简介: 廖英祺(1980—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网优化调度、智能配网。

$10^8 \text{ kW}^{[1-2]}$ 。风电具有随机性、波动性及反调节性等特点^[3],这导致了大规模风电接入电网后,电网等效峰谷差增大,使得电网调峰压力增大^[4]。电池储能系统(BESS)具有响应速度快、能量利用率高特点,使用 BESS 参与调峰,可以有效缓解电力系统的调峰压力,减少风电场弃风^[5]。

对于 BESS 参与电力系统调峰的问题,重点在于每一时刻调峰功率的求解,目前已有众多学者对此展开了研究。按照求解算法的原理,可以将求解算法分为智能算法和动态规划(DP)方法等。此外,还可以将该问题转化为数值规划问题,使用求解器进行求解。文献[6]提出了一种使用需求侧储能辅助火电机组调峰的优化方法,综合考虑多种成本后,以总调峰成本最小为目标,并通过粒子群算法求解出各机组的出力值。文献[7]提出了一种基于 DP 的实施修正调峰控制策略,该策略已成功应用于南方电网的电池储能示范工程。文献[8]提出了一种基于决策树改进的优化算法,通过对电动汽车、光伏、电化学储能系统进行协调控制,从而降低住宅配电网的峰值负荷。采用该方法可以显著降低配电网的峰值需求,从而大大提高负荷系数。文献[9]综合考虑净负荷方差及运行成本的多属性决策目标,提出含电热混合储能系统的园区削峰填谷策略,再将该问题转化为混合整数规划问题,并使用 Gurobi 求解器进行求解。文献[10]采用非线性规划方法和一种实时控制策略进行负荷平滑和调峰,优化孤岛电力系统的运行,并讨论了该方法的优缺点。但上述方法在使用时也存在一定局限性,由于储能损耗模型是复杂的非线性模型,将该问题转化为非线性规划问题后,可能难以求解出全局最优解。而以粒子群算法为代表的智能算法可以较好地应用于非线性系统,但可能存在收敛性问题。在对非线性系统离散化后,使用 DP 可以求解出全局的最优决策,但该方法计算量较大,并且随着变量维数的增大,还会出现“维数灾难”。

若通过预测手段已知风速和负荷,且调峰的目标是使系统的运行成本最小,则可以将风储联合系统的调峰问题转化为最优控制问题,最优问题可通过庞特里亚金最大值原理(PMP)进行求解,基于 PMP 的调峰策略具有直观、求解速度快的优点,一些学者已经将 PMP 应用于电力行业。

文献[11]基于 PMP 开发了一种应用于电动汽车的电池能量管理策略,用于减少电池的老化,该策略的计算速度比 DP 快了 500 倍以上。文献[12]提出了一种基于 PMP 的改进算法,在忽略了电池荷电状态(SOC)对电阻电压的影响后,可以将伴随变量视为常数,并且证明了在该情况下基于 PMP 的最优控制是全局最优控制。文献[13]提出了一种基于 PMP 的微电网控制策略,以降低微电网之间的功率流,并保持存储系统在给定参考值附近运行。文献[14]考虑电池储能的损耗,利用 PMP 优化电池超级电容器混合储能系统中电池和超级电容器之间的功率分配,从而提高电池寿命。上述研究表明,基于 PMP 开发风储联合调峰的最优控制策略具有较大的可行性。

基于上述研究,本文针对大规模风电接入后的调峰问题,提出了一种基于 PMP 的风储联合调峰策略。该策略以储能放电功率与风电场减载功率为控制变量,以储能的 SOC 与风电场减载能量为状态变量。策略目标函数为系统的运行成本,包括火电燃煤成本、储能损耗成本与风机减载成本,使用间接打靶法求解出最优控制的数值解。然后,根据目标函数推导出哈密顿函数,从求解哈密顿函数最小值的角度入手,提出一种改进调峰策略,减少求解时间。最后,通过算例对所提策略进行分析验证。

1 风储联合系统模型

在风储联合系统调峰问题中,调峰的最终目标是使系统在满足各种约束条件的前提下,保证系统的运行成本最小。为了实现这一目标,需要对系统的各个部分进行合理的功率分配。本节对系统的各个运行主体进行了分析,建立了风储联合系统的模型,该模型由火电机组、风电机组和电池储能共同组成。

1.1 火电机组模型

假设已知一个典型日内的系统负荷曲线是 $P_L(t)$,火电机组的功率可以确定为

$$P_f(t) = P_L(t) - P_{\text{wind}}(t) - P_b(t) \quad (1)$$

式中: $P_f(t)$ 为火电机组功率; $P_{\text{wind}}(t)$ 为风电机组功率; $P_b(t)$ 为储能的放电功率。

本文火电机组的成本仅考虑火电机组的燃煤成本,在不同的发电功率下,火电机组的煤耗率不

同,发出功率越高,煤耗率越低。设本文中的火电机耗量曲线表达式如下^[15-16]:

$$b = f(P_f) = a_0 + a_1 P_f + a_2 P_f^2 \quad (2)$$

式中: b 为供电标准煤耗率; $a_0 = 390.5$; $a_1 = 0.1883$; $a_2 = 0.000161$ 。

因此,火电机组的煤耗成本可以表示为

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_f} C_1 [a_0 + a_1 P_f(t) + a_2 P_f(t)^2] P_f(t) dt \quad (3)$$

式中: C_1 为燃煤的价格。

1.2 风电机组模型

风机的有功出力水平主要由风速、桨距角和转子转速等因素决定,风机的出力特性表达式如下^[17]:

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度; R 为风轮半径; v 为风速; C_p 为风能利用系数。

C_p 与叶尖速比 λ 和桨距角 β 有关,根据经验, C_p 可表示为

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\gamma} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\gamma}} + c_6 \lambda \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (7)$$

式中: γ 为引入的中间变量; ω 为风轮的角速度; $c_1 = 0.5176$; $c_2 = 116$; $c_3 = 0.4$; $c_4 = 5$; $c_5 = 21$; $c_6 = 0.0068$ 。

风机的约束条件包含最大功率约束及转子转速约束,分别如下所述。

(1) 风机的输出功率不能超过风机额定功率,则有:

$$P_{\text{wind}} \leq P_N^{\text{wind}} \quad (8)$$

式中: P_N^{wind} 为风机额定功率。

(2) 转子角速度不能超过额定角速度:

$$\omega \leq \omega_N \quad (9)$$

式中: ω_N 为风机额定角速度。

若考虑风机减载,在进行风电机组的成本计算时,为了便于计算,仅考虑风机的减载成本,风机的减载成本可以表示为

$$J_2 = \int_{t_0}^{t_f} C_2 P_{w-\text{loss}} dt \quad (10)$$

式中: C_2 为单位能量的风机减载成本。

1.3 电池储能模型

本文使用内阻模型模拟电池充放电的动态过程,储能的电路可以等效为一个电压源与一个电阻串联的电路^[18]。本文采用的内阻模型忽略了温度对电池性能的影响,电池的开路电压和内阻可以表示为 SOC 的函数:

$$U_{oc} = -0.3161e^{-18.81SOC} + 0.2656SOC^3 + 0.0931SOC^2 + 0.1686SOC + 3.17 \quad (11)$$

$$R_b = 132e^{-30SOC} + 166.5 \quad (12)$$

式中: U_{oc} 为储能开路电压; R_b 为储能内阻。

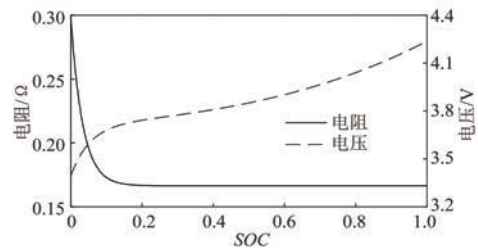


图1 单个电池内阻、开路电压与 SOC 的关系

在上述电路参数的基础上,储能放电电流 I_b 可表示为

$$I_b = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_b P_b}}{2R_b} \quad (13)$$

储能的 SOC 变化率可以表示为

$$\dot{SOC} = -\frac{I_b}{Q_b} = -\frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_b P_b}}{2R_b Q_b} \quad (14)$$

式中: I_b 为储能放电电流; P_b 为储能放电功率; $\dot{SOC}$ 为储能 SOC 随时间的变化率; Q_b 为储能的容量。

本文采用了一种应用广泛的面向控制的电池容量损耗模型,该模型基于阿伦尼乌斯公式^[19]推导得到:

$$Q_{\text{loss}} = B \cdot \exp\left(\frac{-31700 + 370 \cdot c_{\text{rate}}}{RT}\right) \cdot (Ah)^z \quad (15)$$

式中: Q_{loss} 为储能损耗寿命; B 为指数前系数; c_{rate} 为放电速率; R 为气体常数; T 为绝对温度; Ah 为放电安时; z 为指数因子。

在该模型中,电池的容量损耗仅与放电安时

有关,储能寿命损耗至 20% 视为寿命终止,在某一电流下,以安时表示的储能寿命可以表示为

$$c_{\text{rate}} = \frac{I_b}{I_N} \quad (16)$$

$$\Gamma_{\text{nom}} = \left[\frac{20}{B \cdot \exp\left(\frac{-31\,700 + 370 \cdot c_{\text{rate}}}{RT}\right)} \right]^{\frac{1}{z}} \quad (17)$$

式中: Γ_{nom} 为储能在某一电流下的寿命; I_N 为储能的额定电流。

储能寿命损耗百分比可以表示为

$$q_{\text{loss}} = \int \frac{|I_b|}{\Gamma_{\text{nom}}(I_b)} dt \quad (18)$$

储能的成本主要包括储能的老化成本与储能的内阻损耗,可以表示为

$$J_3 = \int_{t_0}^{t_f} \left\{ N_B C_3 I(t)^2 R_b + C_4 V_B \frac{|I(t)|}{\Gamma_{\text{nom}}[I(t)]} \right\} dt \quad (19)$$

式中: C_3 为内阻损耗成本系数; C_4 为储能老化成本系数, N_B 为电池个数; V_B 为储能电站的容量。

1.4 系统约束条件

(1) 火电机组的功率约束:

$$P_{\text{fire}}^{\min} < P_f < P_{\text{fire}}^{\max} \quad (20)$$

式中: $P_{\text{fire}}^{\min}$ 为火电机组发出功率下限; $P_{\text{fire}}^{\max}$ 为火电机组发出功率上限。

(2) 风机减载功率约束。风机减载的最大功率不应超过最高减载比例:

$$0 < P_{w-\text{loss}} < c_{\text{max}} P_{\text{wind}}^{\max}(v) \quad (21)$$

式中: $P_{w-\text{loss}}$ 为风机的减载功率; c_{max} 为风机的最大减载比例; $P_{\text{wind}}^{\max}(v)$ 为风速 v 所对应的风电场最大功率。

(3) 储能的功率约束。储能的充放电功率应当小于额定功率,可以表示为

$$-P_{\text{ESS}}^{\max} < P_b < P_{\text{ESS}}^{\max} \quad (22)$$

式中: $P_{\text{ESS}}^{\max}$ 为电池储能的额定功率。

(4) 储能 SOC 约束:

$$SOC_{\min} < SOC < SOC_{\max} \quad (23)$$

式中: $SOC_{\min}$ 为储能 SOC 下限; $SOC_{\max}$ 为储能 SOC 上限。

(5) 实时功率平衡。电源功率与负荷功率相等,因此具有如下的关系:

$$P_L(t) = P_f(t) + P_b(t) + P_{\text{wind}}(t) - P_{w-\text{loss}}(t) \quad (24)$$

2 基于 PMP 的风储联合调峰策略

2.1 目标函数

对于本文中的调峰问题,选取储能的放电功率和风电机组的减载功率为控制量,储能的 SOC 和风电机组的总减载能量为状态量,系统的状态方程可以表示为

$$\dot{SOC} = -\frac{I(t)}{Q_b} = g(P_b, SOC) \quad (25)$$

$$\dot{W} = P_{w-\text{loss}} \quad (26)$$

为了便于后续的分析,令:

$$\begin{cases} f_1(P_f) = C_1[a_0 + a_1 P_f(t) + a_2 P_f(t)^2] P_f(t) \\ f_2(P_{w-\text{loss}}) = C_2 P_{w-\text{loss}}(t) \\ f_3(P_b, SOC) = N_B C_3 I(t)^2 R(SOC) + \\ C_4 V_B \frac{|I(t)|}{\Gamma_{\text{nom}}[I(t)]} \end{cases} \quad (27)$$

目标函数表示为

$$\begin{aligned} \min J &= J_1 + J_2 + J_3 = \\ &\int_{t_0}^{t_f} [f_1(P_f) + f_2(P_{w-\text{loss}}) + f_3(P_b, SOC)] dt \end{aligned} \quad (28)$$

2.2 最优控制的必要条件

根据目标函数,哈密顿函数定义为^[20]

$$H = f_1(P_f) + f_2(P_{w-\text{loss}}) + f_3(P_b, SOC) + \lambda_1 g(P_b, SOC) + \lambda_2 P_{w-\text{loss}} \quad (29)$$

式中: λ_1 为储能 SOC 对应的伴随变量; λ_2 为风机减载能量对应的伴随变量。

伴随方程和状态方程可以表示为

$$\dot{\lambda}_1(t) = -\frac{\partial H}{\partial SOC} \quad (30)$$

$$\dot{\lambda}_2(t) = -\frac{\partial H}{\partial W} = 0 \quad (31)$$

$$\dot{SOC} = \frac{\partial H}{\partial \lambda_1} = g(P_b, SOC) \quad (32)$$

$$\dot{W} = \frac{\partial H}{\partial \lambda_2} = P_{w-\text{loss}} \quad (33)$$

根据式(31)可知,伴随变量 λ_2 是一个常数。在储能参与调峰时,为了保证储能的能量平衡,需

要储能在完成调峰前后的 SOC 相等,由此可得 SOC 的边界条件:

$$\begin{cases} SOC(t_0) = SOC_0 \\ SOC(t_f) = SOC_f \end{cases} \quad (34)$$

式中: t_0 为初始时刻; t_f 为终点时刻; $SOC(t)$ 为 t 时刻储能的 SOC; SOC_0 为 SOC 的初始值; SOC_f 为 SOC 的终点值。

而 W 仅对末端时间有约束,边界条件可以根据下式确定:

$$\lambda_2(t_f) = \frac{\partial \{ \varphi[W(t_f)] \}}{\partial [W(t_f)]} = 0 \quad (35)$$

式中: $W(t_f)$ 为终点时刻的风机减载能量; $\varphi[W(t_f)]$ 为目标函数中 $W(t_f)$ 的相关项。

在本文中, $\varphi[W(t_f)]$ 为 0, 因此 λ_2 恒等于 0, 哈密顿函数可以修正为

$$H = f_1(P_f, t) + f_2(P_{w-loss}, t) + f_3(P_b, SOC) + \lambda_1 g(P_b, SOC) \quad (36)$$

根据 PMP 可得最优控制的必要条件, 可以确定最优的风机减载功率和储能放电功率:

$$[P_{w-loss}^*, P_b^*] = \arg \min H(SOC^*, P_{w-loss}, P_b, \lambda_1^*, t) \quad (37)$$

2.3 约束条件的处理

风机减载功率约束和储能功率约束是控制变量的约束, 这两个约束可以直接通过对控制变量进行控制实现。而火电机组的功率约束和储能的 SOC 约束无法通过对控制变量的控制直接实现, 因此这两个约束相较于控制变量的约束需要更加细致的考虑, 本文采用罚函数间接实现对火电机组的功率和储能的 SOC 约束^[21]。

储能 SOC 约束的罚函数可以表示为

$$S_1 = \begin{cases} m_1 [SOC(t) - SOC_{\min}]^2, & SOC < SOC_{\min} \\ 0, & SOC_{\min} < x < SOC_{\max} \\ m_1 [SOC(t) - SOC_{\max}]^2, & SOC > SOC_{\max} \end{cases} \quad (38)$$

式中: m_1 为储能 SOC 约束的罚函数因子。

火电机组的功率约束罚函数可以表示为

$$S_2 = \begin{cases} m_2 [P_f(t) - P_{\text{fire}}^{\min}]^2 / P_{\text{fire}}^{\max 2}, & P_f(t) < P_{\text{fire}}^{\min} \\ 0, & P_{\text{fire}}^{\min} < P_f(t) < P_{\text{fire}}^{\max} \\ m_2 [P_f(t) - P_{\text{fire}}^{\max}]^2 / P_{\text{fire}}^{\max 2}, & P_f(t) > P_{\text{fire}}^{\max} \end{cases} \quad (39)$$

式中: m_2 为火电机组的功率约束罚函数因子。

相应地, 系统的成本修正为

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [f_1(P_f) + f_2(P_{w-loss}) + f_3(P_b, SOC) + S_1(SOC) + S_2(P_f)] dt \quad (40)$$

哈密顿函数修正为

$$H = f_1(P_f) + f_2(P_{w-loss}) + f_3(P_b, SOC) + S_1(SOC) + S_2(P_f) + \lambda_1 g(P_b, SOC) \quad (41)$$

需要说明的是, 罚函数因子 m_1 和 m_2 在选取的时候应选择较大的值, 以确保在运行的过程中可以始终满足相关的约束条件, 否则罚函数不为 0, 可能会导致伴随变量不连续, 影响求解的结果。

此外, 文献[11-12]提供了另一种处理约束的思路, 该方法根据状态变量的不等式约束, 构建一个虚拟的状态变量, 然后对哈密顿函数进行扩展, 若系统始终满足约束, 哈密顿函数对虚拟状态变量的偏导为 0, 由此可知虚拟伴随变量为常数, 虚拟伴随变量与罚函数因子起到了相同的作用。

2.4 基于间接打靶法的数值求解方法

若研究系统是无约束的系统在得到哈密顿函数后, 可以根据系统的边界条件, 求解出最优控制问题的解析解。但是, 本文研究的风储联合调峰问题包含了控制量和状态量的约束, 无法得到解析解, 因此在对问题进行求解时, 需要先根据 PMP 得到最优控制的必要条件, 再通过数值求解的方法进行求解。在求解最优控制问题时, 常用的数值求解方法分为直接法和间接法。直接法包括伪谱法、内点法、序列二次规划法等方法; 间接法一般使用间接打靶法。其中, 间接打靶法因为简单、易于编程的优点应用较多, 所以本文采用间接打靶法对问题进行求解。该方法的原理是推导出最优控制的必要条件后, 得到关于状态变量和伴随变量的一组微分方程组, 结合边界条件和横截条件, 得到一个两点边值问题, 再使用直接打靶法对微分方程组进行数值求解^[22]。

在计算过程中, 需要进行将微分方程转化为如下的差分方程:

$$\begin{cases} SOC(n+1) = SOC(n) + \dot{SOC}(n) \Delta t \\ W(n+1) = W(n) + \dot{W}(n) \Delta t \\ \lambda(n+1) = \lambda(n) + \dot{\lambda}(n) \Delta t \end{cases} \quad (42)$$

哈密顿函数转化为

$$H(n) = f_1[P_f(n)] + f_2[P_{w-loss}(n)] + f_3[P_b(n), SOC(n)] + S_1[SOC(n+1)] + S_2[P_f(n)] + \lambda_1 g[P_b(n), SOC(n)] \quad (43)$$

间接打靶法的难点在于伴随变量初值的选取,本文通过二分法确定伴随变量的初值,详细的过程如下:

步骤 1, 初始化伴随变量初值的搜索区间 $[d_1, d_2]$ 。

步骤 2, 初始化计数器, 选择 ΔP_w 、 ΔP_b 分别为风机减载功率和储能放电功率的搜索间隔。

步骤 3, 对于第 1 次迭代, 选择 $\lambda_0 = (d_1 + d_2)/2$, SOC 初值为 SOC_0 , 从初始时刻开始, 代入不同的风机减载功率与储能充电功率进行搜索, 根据式(43)确定运行功率, 重复式(30)~式(33)、式(42)的计算过程至终点时刻, 得到终点时刻的 $SOC(T)$ 。

步骤 4, 将终点时刻的 $SOC(T)$ 与 SOC_f 比较, 若 $SOC(T) < SOC_f$, $d_1 = (d_1 + d_2)/2$, 否则 $d_2 = (d_1 + d_2)/2$ 。

步骤 5, 重复步骤 2~步骤 4, 直至程序收敛, 程序的收敛判据为 $|SOC(T) - SOC_f| < \varepsilon$ 。

2.5 基于哈密顿函数最小化的改进 PMP 算法

在算法改进前, 需分析哈密顿函数的物理意义。引入伴随变量构造哈密顿函数后, 根据最优控制的必要条件, 可以通过求解哈密顿函数最小值, 间接求解出每个时刻的最优功率。伴随变量用于合并状态方程与目标函数, 有时在最优控制问题中具有物理意义。在本文的问题中, 伴随变量可以解释为 $dSOC/dt$ 的权重系数, 式(40)中的最后一项可以解释为等效的运行成本, 这一项的作用是为考虑未来的情况, 对储能充放电的过程进行实时补偿。

本节对算法改进的重点在于, 减少搜索最优储能放电功率的计算量, 因此在分析时可以忽略风机减载成本以及罚函数, 最优控制功率的选择只与火电燃煤成本、储能损耗成本和等效运行成本有关。绘制上述的三个成本与储能放电功率的关系曲线如图 2 所示。图 2(a) 表示储能不同放电功率下的火电燃煤成本, 随着放电功率的增加, 燃煤成本减少。图 2(b) 表示储能的损耗成本与放电功率的关系, 随着充放电功率的增加, 储能的损耗成本增大。图 2(c) 表示等效运行成本与储

能放电功率的关系, 随着放电功率增加, 等效运行成本增加, 这与火电燃煤成本的变化趋势相反, 因此等效运行成本起到了补偿作用, 并且由于伴随变量在不同的运行场景下差异巨大, 等效运行成本对最优功率的选择影响较大, 而不同的负荷功率、SOC 对最优功率的选择影响较小。图 2(d) 为三个成本之和, 根据这一曲线可以确定储能功率。

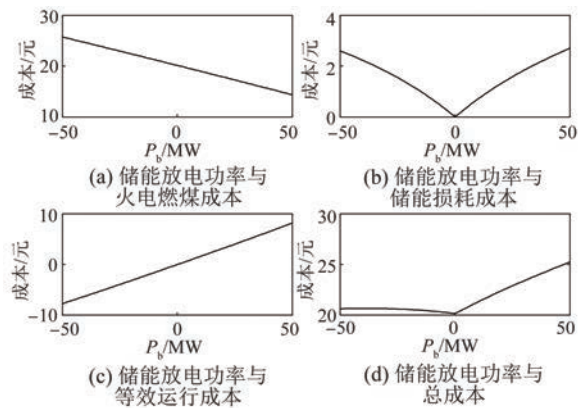


图 2 成本与储能放电功率的关系

对本文所提模型进一步地研究后发现, 在 λ_1 、 P_b 、 SOC 分别取 $[d_1, d_2]$ 、 $[-50, 50]$ 、 $[0.1, 0.9]$ 之间的值时, 哈密顿函数仅在 $P_b = 0$ 处可能存在极小值, 这意味着哈密顿函数取最小值的功率总是在最大功率、最小功率和 0 之间。根据这一原理, 在搜索最佳储能功率时, 无需以 ΔP_b 的间隔搜索, 只要求最大功率、最小功率和 0 对应的哈密顿函数即可确定最优功率, 这样的改进大大减小了计算量。

3 算例分析

3.1 算例介绍

本文根据某地的历史实际负荷与风速数据, 在 MATLAB 中对所提风储联合调峰策略进行验证。该系统包含一台 600 MW 的火电机组和一个 200 MW 的风电场, 风电装机容量占总装机容量的 25%, 该系统配置了 50 MW/200 MW·h 的电池储能电站, 储能电站由 4 V/2.5 Ah 的单体电池串并联得到, 储能 SOC 的上下限分别设为 0.9、0.1。系统的负荷和风功率曲线如图 3 所示, 风功率根据历史风速与 1.2 节中的风机模型得到, 数据采样时间间隔为 5 min, 以 24 h 的时间尺度, 共有负荷样本 288 个。算例中的火电机组功率上限在最

大功率的基础上减去 40 WM,功率的下限在最小功率的基础上增加 70 MW,风机减载功率最多为当前风速下最大功率的 15%,系统的参数如表 1 所示。

表 1 算例参数

参数名称	参数值
$C_1/(\text{元}\cdot\text{kg}^{-1})$	1.2
$C_2/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	290
$C_3/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	2.3×10^6
$C_4/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	520
$m_1/\text{元}$	10^{11}
$m_2/\text{元}$	10^7
终止条件 ε	0.01
温度/K	293.15
最大值原理的功率间隔 $\Delta P/\text{MW}$	1
d_1	-30 000
d_2	-150 000

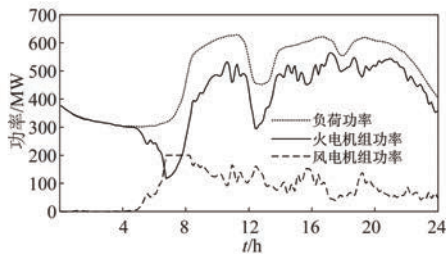


图 3 一天内的负荷和风电场功率

3.2 基于 PMP 的风储联合调峰策略运行结果

为了验证基于最大值原理的风储联合调峰策略的有效性,本文基于上述的测试数据对基于 PMP 的风储联合调峰策略进行了求解,求解结果如图 4 所示。图 4(a)为在系统运行过程中储能的放电功率以及储能的 SOC 曲线,从图 4(a)中可以看出,储能在运行过程中始终在功率约束和 SOC 约束的范围内运行,储能初始时刻 SOC 为 0.3,在进行削峰填谷后,终点时刻的 SOC 为 0.3,完成了本文的控制目标;图 4(b)为火电机组的出力曲线,从图 4(b)中可以看出,火电机组的出力始终满足系统的功率约束,储能参与调峰后,火电机组功率的峰谷差大幅度减少,火电机组在运行过程中满足约束;图 4(c)为伴随变量随时间的变化量,反映了火电机组与储能之间功率分配的本

质;图 4(d)为风电减载功率曲线,从图 4(d)中可以看出,风电的减载功率一直在约束范围内,在储能无法完成填谷任务时,风机减载运行,弥补了储能填谷能力的不足。

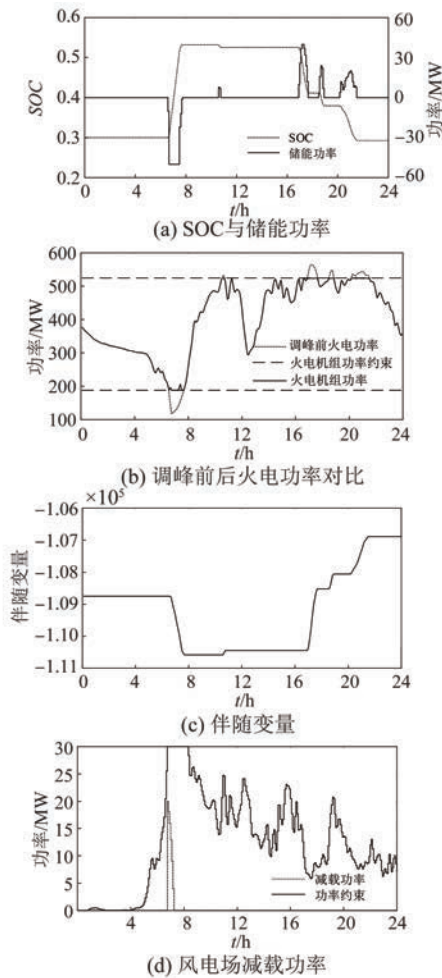


图 4 调峰策略求解结果

对上述的算例选取不同的 SOC 初值和终值,然后再对问题重新进行求解。图 5(a)列举了 SOC 初值分别为 0.6、0.5、0.4、0.3,终值为 0.3 情况下的打靶曲线;图 5(b)列举了 SOC 初值为 0.3,终值分别为 0.6、0.5、0.4、0.3 的打靶曲线。从求解的结果可以看出,在取不同 SOC 初值和终值的情况下,本文所提调峰策略均能完成控制目标,证明了本文所提基于 PMP 调峰策略的稳健性。

3.3 与基于 DP 的调峰策略对比

需对两种算法的求解精度说明,DP 的 ΔSOC 取 0.000 4,考虑内阻损耗后,换算至功率的精度大约是 1 MW,最大值原理的精度为 1 MW,因此

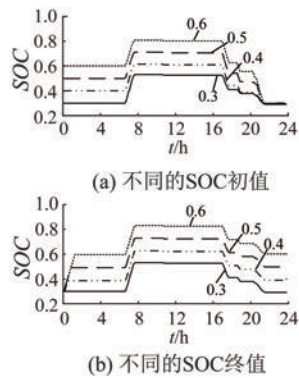


图5 不同SOC初值和终值的打靶曲线

可以近似认为两种算法的求解精度相同。

一年中不同系统的日负荷曲线形状接近,对调峰的影响较小,而不同的日风速曲线差别很大,因此本文的算例选择如图6所示的日风速曲线进行算例分析,四个算例中火电机组的功率上限为在最大功率的基础上分别减去40.0、25.0、35.0、40.0 WM,功率的下限在最小功率的基础上分别增加52.5、70.0、37.5、70.0 MW。算例的结果如表2所示。从表2中的结果可以看出,通过基于PMP的调峰策略求得的运行成本低于基于DP的调峰策略求解的运行成本。图7中每幅图有两条

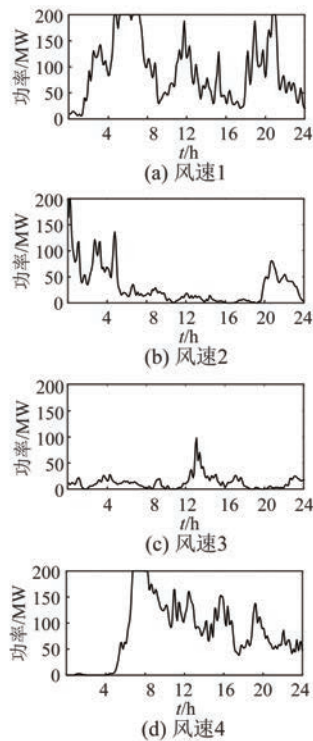


图6 风电场输出功率

SOC曲线,分别是风速1~风速4的算例下基于PMP和DP的调峰策略求解的SOC曲线,可见两条曲线形状十分接近。图8中基于PMP和DP的减载功率也比较接近,鉴于DP可以求出全局最优解,说明基于PMP的调峰算法趋近于实际的最优情况。

表2 PMP和DP的计算结果对比

风速	成本与时间	PMP	DP
风速1	最终成本/元	3 924 090.67	3 924 575.03
	程序运行时间/s	10.596 0	4 888.19
风速2	最终成本/元	4 492 233.13	4 493 312.19
	程序运行时间/s	2.649 4	1 420.78
风速3	最终成本/元	4 679 153.22	4 685 914.53
	程序运行时间/s	1.601 3	655.26
风速4	最终成本/元	4 008 300.35	4 009 159.60
	程序运行时间/s	4.122 4	4 738

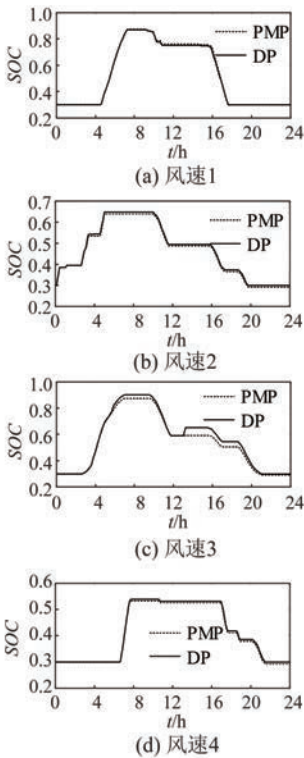


图7 基于PMP和DP的SOC对比

此外,从求解速度的角度看,本文所提基于PMP算法比基于DP算法具有显著的优势。本文算例在一台2.20 GHz双核i5-5200U CPU和8GB RAM的笔记本电脑上运行,根据表2的结果可

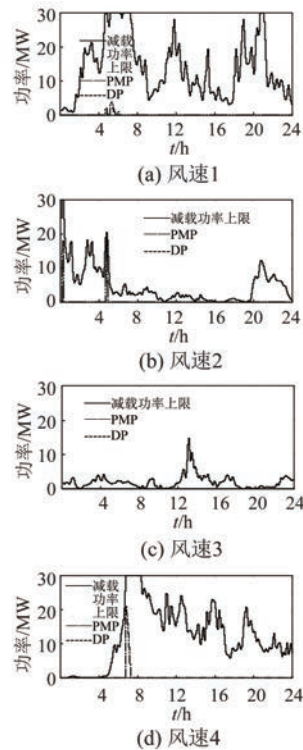


图8 基于PMP和DP的减载功率对比

知,基于PMP的算法比基于DP的算法计算时间缩短了百倍,说明了基于PMP的算法可以用更短的时间求解出比DP效果更接近的结果。因此,本文所提基于PMP的调峰控制策略为风储联合调峰问题提供了一种有效且复杂度低的解决方案。

3.4 与基于PMP改进的调峰策略对比

本文对比了基于改进PMP和基于PMP的调峰算法结果,算例的结果如表3与图9和图10所示。从表3中的结果可以看出,基于PMP的改进调峰策略求得的运行成本与改进前的调峰策略求

表3 PMP和改进PMP的计算结果对比			
风速	成本与时间	PMP	改进PMP
风速1	最终成本/元	3 924 090.67	3 923 571.90
	程序运行时间/s	10.596 0	0.446 6
风速2	最终成本/元	4 492 233.13	4 492 334.29
	程序运行时间/s	2.649 4	0.169 0
风速3	最终成本/元	4 679 153.22	4 678 787.01
	程序运行时间/s	1.601 3	0.199 1
风速4	最终成本/元	4 008 300.35	4 008 404.97
	程序运行时间/s	4.122 4	0.206 6

得的成本接近,并且求解的速度有了明显的提高。实际的最优放电功率总是在改进策略中所取的最大功率、最小功率、0之间,因此改进前后求得的运行成本十分接近。在使用改进策略后,求解最优放电功率从全局搜索转变为在三个点之间搜索,求解速度也有显著的提高。综上所述,基于PMP的改进调峰策略在求解成本接近的前提下,进一步提高了求解速度。

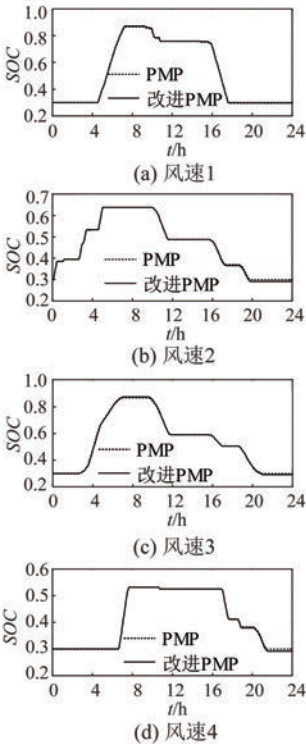


图9 基于PMP和改进PMP的SOC对比

4 结 语

本文提出了一种基于PMP的风储联合系统调峰策略,并且从求解哈密顿函数最小值入手,对策略进一步改进,为风储联合调峰的最优控制问题提供了一种简单的解决方案。算例结果表明:

(1) 基于PMP的风储联合系统调峰策略能够有效地求解风储联合调峰问题,且具有较好的稳健性。

(2) 与基于DP的风储联合系统调峰策略相比,本文所提基于PMP的风储联合系统调峰策略求解速度更快,运行成本更低。

(3) 基于PMP改进的调峰策略可以进一步提高求解速度。

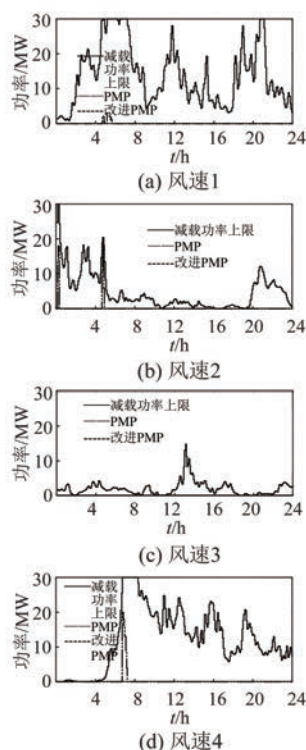


图 10 基于 PMP 和改进 PMP 的减载功率对比

【参考文献】

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2022 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2023-01-18]. <http://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c1310691509.htm>.
- [2] 朱瑛, 秦立宽, 颜全椿, 等. 考虑频率响应过程的风储联合调频策略及储能系统优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 28.
- [3] 朱瑛, 高云波, 臧海洋, 等. 风电机组输出功率平滑技术综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 182.
- [4] 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.
- [5] UDDIN M, ROMLIE M F, ABDULLAH M F, et al. A novel peak shaving algorithm for islanded microgrid using battery energy storage system [J]. Energy, 2020, 196: 117084.
- [6] 魏文, 姜飞, 戴双凤, 等. 计及需求侧储能事故备用风险与火电机组深度调峰的经济优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 153.
- [7] 鲍冠南, 陆超, 袁志昌, 等. 基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 11.
- [8] MAHMUD K, HOSSAIN M J, TOWN G E. Peak-load reduction by coordinated response of photovoltaics, battery storage, and electric vehicles [J]. IEEE Access, 2018, 6: 29353.
- [9] 张超, 冯忠楠, 邓少平, 等. 考虑电热混合储能的多能互补协同削峰填谷策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增1): 191.
- [10] REIHANI E, MOTALLEB M, GHORBANI R, et al. Load peak shaving and power smoothing of a distribution grid with high renewable energy penetration [J]. Renewable Energy, 2016, 86: 1372.
- [11] NGUYEN B, VO-DUY T, TA M C, et al. Optimal energy management of hybrid storage systems using an alternative approach of Pontryagin's minimum principle [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2224.
- [12] KIM N, CHA S, PENG H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011 19(5): 1279.
- [13] DAGDOUGUI H, OUAMMI A, SACILE R. Optimal control of a network of power microgrids using the Pontryagin's minimum principle [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(5): 1942.
- [14] NAMBIAN P, KHANRA M. Optimal energy management of battery supercapacitor aided solar PV powered agricultural feed mill using Pontryagin's minimum principle [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 2216.
- [15] 周诗齐. 火电厂机组能耗特性分析及负荷优化分配[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [16] 张松岩, 苗世洪, 尹斌鑫, 等. 考虑火电深度调峰的多类型储能经济性分析[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 132.
- [17] 王文亮. 储能型永磁直驱风力发电系统并网运行控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [18] 卢杰祥. 锂离子电池特性建模与 SOC 估算研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [19] WANG J, LIU P, HICKS-GARNER J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942.
- [20] 张嗣瀛, 高立群. 现代控制理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

(下转第 104 页)