

基于非线性互补牛顿算法的电池储能系统平滑策略

谷青发, 王 杰

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 电池储能系统(BESS)平滑功率波动问题是一个高维度、多约束的非线性规划问题。为了更好地求解该问题,提出了一种基于非线性互补牛顿算法的 BESS 平滑策略。将储能系统平滑问题中的最优性条件转化为非线性方程组,进而将求解原问题转化为求解非线性方程组,并采用牛顿法进行求解。算例结果表明,该方法能够有效地追踪目标函数,从而平滑风功率波动,且具备连续平滑能力。

关键词: 电池储能系统; 平滑功率波动; 非线性互补; 牛顿算法; 模糊控制; 风电

中图分类号: TM 911; TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.012

0 引言

能源互联网是目前电网研究中的热点,以风能为代表的新能源将在推进能源改革中发挥着重要的作用。由于风电出力的波动性和不稳定性,大规模风电并网会给电力系统的经济运行和安全稳定性带来严峻的挑战^[1-2]。电池储能系统 BESS(Battery Energy Storage System)既可作为“电源”向负荷供电,又可作为“负荷”吸收电能,通过控制其所储能量的双向流动^[3],可有效地抑制风电功率的波动性。

BESS 抑制风电功率波动的基本思路是根据 BESS 运行约束条件,通过控制各时段内 BESS 的充放电功率,达到平滑风功率波动的目的。从数学角度出发,BESS 充放电控制问题实质上是一个高维度、多约束的非线性规划问题。求解该类问题的方法主要有智能算法和数学优化方法^[4]。目前,已有诸多文献在此领域取得了一定的研究成果。文献[5-7]建立了 BESS 模型及评价平滑功率波动效果的指标,并采用智能算法进行求解,其中包括遗传算法^[5]、人工神经网络算法^[6]和粒子群优化算法^[7]。智能算法的收敛速度与其选取的参数有关,当参数选取不当时,容易陷入局部最优解,从而无法保证收敛到全局最优解^[8]。文献[9]基于 BESS 不同的动态性能,提出了 2 种储能电站的优化调度策略和相应的评价指标,并采用动态规划法进行求解。文献[10]针对风电骤变情况,提出了基于加权移动平均滤波算法的储能系统平滑策略,并设计了能够自动调节 BESS 荷电状态 SOC(State Of Charge)的模糊控制算法。文献[11-13]基于低通滤波原理进行了 BESS 优化调度和配置的研究。具体地,文献[11]结合频谱分析

法确定 BESS 充放电补偿功率和最优储能配置容量;文献[12]提出了基于低通滤波法的 BESS 充放电控制策略;文献[13]结合模型预测控制提出了多时间尺度的风功率波动平滑控制策略。

非线性互补方法被许多学者用于求解非线性规划问题,如无功优化问题^[14]和最优潮流 OPF (Optimal Power Flow)问题^[15-16]。该方法将非线性规划问题中的最优性条件通过非线性互补问题 NCP (Nonlinear Complementary Problem)函数转化为非线性方程组,从而将求解非线性规划问题转化为求解非线性方程组。相比于其他非线性规划方法,非线性互补方法更能反映出非线性规划问题中出现的最优状态。

本文将非线性互补方法用于求解 BESS 平滑功率波动问题。首先,建立 BESS 平滑功率波动的模型,并将其转化为非线性规划的标准形式。为简化 BESS 充放电功率约束条件,可以忽略 BESS 充放电效率的影响。然后,用 NCP 函数将优化模型的 KKT 条件转化为非线性方程组,并采用牛顿法求解。为保证求解过程中 Hessian 矩阵的非奇异性,NCP 函数采用光滑函数。最后,考虑 BESS 充放电效率,并利用模糊控制设计功率修正策略对 BESS 出力值进行逐点修正。以某风电场一天的风电出力为例进行仿真计算,算例结果表明,该方法能够有效地平滑风电功率波动,且平滑后 BESS 的 SOC 值受 SOC 初始值的影响较小,具备连续平滑能力。

1 BESS 平滑功率波动数学模型

1.1 BESS 模型

BESS 作为能量双向流动的载体,其 SOC 值与 SOC 初始值和各时段充放电功率有关,可表示为:

$$\begin{cases} C_s(t) = C_{in} + \sum_{j=1}^{t-1} \left(\frac{\omega_c P(j) \eta_c}{E_s} + \frac{\omega_d P(j)}{\eta_d E_s} \right) \Delta t \\ C_s(t) = \frac{E(t)}{E_s} \\ \omega_c + \omega_d \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2016-10-10;修回日期:2017-09-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61374155);高校博士点专项科研基金资助项目(20130073110030)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61374155) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20130073110030)

其中, $C_s(t)$ 和 C_{in} 分别为 t 时刻和初始时刻 BESS 的 SOC 值; $P(t)$ 为 t 时刻 BESS 的充放电功率值, 单位为 MW, 其值大于 0 表示 BESS 充电, 小于 0 表示 BESS 放电, 等于 0 则表示 BESS 不动作; Δt 为计算时间间隔, 单位为 h; $E(t)$ 为 t 时刻 BESS 的能量值, 单位为 MW·h; E_s 为 BESS 的容量, 单位为 MW·h; η_c 和 η_d 分别为 BESS 充电和放电效率; ω_c 和 ω_d 为状态标识符, 其均有 2 个状态值 0 和 1, 且不能同时取 1。

1.2 目标函数

为度量 BESS 平滑风功率波动的效果, 本文对平滑区间划分为 N 个时段, 建立目标函数为:

$$f = \min \sum_{t=1}^N (P_w(t) - P(t) - P_{ave})^2 \quad (2)$$

其中, $P_{ave} = \sum_{t=1}^N P_w(t) / N$ 为平滑区间内风功率的平均值, 单位为 MW; $P_w(t)$ 为 t 时刻风电的功率值, 单位为 MW。

目标函数 f 反映了平滑后风功率值偏离平滑后风功率平均值的程度, 其值越小, 平滑效果越好。

1.3 约束条件

为了保证 BESS 的安全稳定运行, 防止 BESS 过充过放, 其充放电功率和 SOC 值需严格限制在一定范围内, 即:

$$\begin{cases} P_{\min} \leq P(t) \leq P_{\max} \\ C_{s,\min} \leq C_s(t) \leq C_{s,\max} \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_{\min} 、 P_{\max} 分别为 BESS 的最小、最大充放电功率, 单位为 MW; $C_{s,\max}$ 、 $C_{s,\min}$ 分别为 BESS 的 SOC 值上、下限。

式(1)中的 ω_c 和 ω_d 为状态标识符, 其值是不连续的, 因此, 式(3)中含有不连续约束条件, 这会增加模型求解的难度。为简化模型, 若设 BESS 充、放电效率 $\eta_c = \eta_d = 1$, 则式(1)可表示为:

$$C_s(t) = C_{in} + \sum_{j=1}^{t-1} \frac{P(j)\Delta t}{E_s} \quad (4)$$

2 非线性互补理论及牛顿算法

2.1 非线性互补理论

为描述 NCP, 引入以下 2 个定义^[17]。

a. $F_1: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$, 是由 \mathbf{R}^n 到 \mathbf{R}^n 的一映射。相应的 NCP 是求向量 $\mathbf{x}_1 \in \mathbf{R}^n$, 满足:

$$\mathbf{x}_1 \geq 0, F_1(\mathbf{x}_1) \geq 0, \mathbf{x}_1^T F_1(\mathbf{x}_1) = 0 \quad (5)$$

b. 函数 $\psi: \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}^1$, 被称为“NCP 函数”。若对任意 $(a, b)^T \in \mathbf{R}^2$, 有 $\psi(a, b) = 0$, 当且仅当 $a \geq 0$ 、 $b \geq 0$ 、 $ab = 0$ 时成立。

由定义 **a** 和 **b** 可知, NCP 可通过 NCP 函数转化为求解方程组的问题。考虑如下函数:

$$\xi(a, b) = \frac{1}{2} [a + b - \sqrt{(a-b)^2}] \quad \forall (a, b) \in \mathbf{R}^2 \quad (6)$$

由式(6)可知: $a \leq b$ 时, $\xi(a, b) = a$; $a > b$ 时, $\xi(a, b) = b$ 。若 $\xi(a, b) = 0$, 则有 $a = 0$ 、 $b \geq 0$ 或 $b = 0$ 、 $a \geq 0$ 。因此, 式(6)为 NCP 函数。本文中采用牛顿法求解非线性方程组, 需保证 Hessian 矩阵的非奇异性, 可在式(6)中引入扰动因子, 表示为:

$$\xi(a, b, \mu) = \frac{1}{2} [a + b - \sqrt{(a-b)^2 + \mu^2}] \quad (7)$$

其中, $\mu > 0$; $\xi(a, b, \mu)$ 为光滑函数, 即存在任意阶导数。当 $\mu \rightarrow 0$ 时, 式(7)和式(6)完全等价。

令 $x_i = a$, $F(x_i) = b$, $\mathbf{s} = (\mathbf{x}, \mathbf{F}(\mathbf{x}), \mu)$, 则式(7)可化为:

$$\xi(\mathbf{s}) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1 + F(x_1) - \sqrt{(x_1 - F(x_1))^2 + \mu^2} \\ x_2 + F(x_2) - \sqrt{(x_2 - F(x_2))^2 + \mu^2} \\ \vdots \\ x_n + F(x_n) - \sqrt{(x_n - F(x_n))^2 + \mu^2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2 牛顿算法

对于形如式(8)所示的非线性方程组可通过牛顿法进行求解, 其步骤如下。

a. 初始化。设置初始点 $\mathbf{s}^0 = (\mathbf{x}^0, \mathbf{F}^0(\mathbf{x}), \mu^0)$, 给定常数 $\varepsilon, \beta, \tau \in (0, 1)$, 置 $k = 0$ 。

b. 判定终止条件。若 $\|\xi(\mathbf{s}^k)\| \leq \varepsilon$, 停止计算, 输出 \mathbf{s}^k , 否则转至步骤 **c**。

c. 计算牛顿方向。解方程 $\xi'(\mathbf{s}^k) \mathbf{d}^k = -\xi(\mathbf{s}^k)$, 求解 \mathbf{d}^k , 其中 $\xi'(\mathbf{s})$ 为 $\xi(\mathbf{s})$ 的 Jacobi 矩阵。

d. 确定迭代步长。求满足式(9)所示的最小非负整数 m , 其迭代步长可表示为 β^m 。

$$\xi(\mathbf{s}^k + \beta^m \mathbf{d}^k) \leq \left(1 - \frac{\tau \beta^m}{2}\right) \xi(\mathbf{s}^k) \quad (9)$$

e. 更新方程组的解。置 $\mathbf{s}^{k+1} = \mathbf{s}^k + \beta^m \mathbf{d}^k$, $k = k + 1$, 并返回步骤 **b**。

3 基于非线性互补理论的 BESS 平滑策略

3.1 BESS 平滑策略

为简化 BESS 优化控制模型, 置充、放电效率 $\eta_c = \eta_d = 1$, 将式(2)—(4)组成的数学模型化为标准的非线性规划问题, 可表示为:

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^N (P_w(t) - P(t) - P_{ave})^2 \\ \text{s.t. } P(t) - P_{\min} \geq 0 \\ P_{\max} - P(t) \geq 0 \\ C_{in} + \sum_{j=1}^{t-1} \frac{P(j)\Delta t}{E_s} - C_{s,\min} \geq 0 \\ C_{s,\max} - C_{in} - \sum_{j=1}^{t-1} \frac{P(j)\Delta t}{E_s} \geq 0 \end{cases} \quad t \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (10)$$

记 $\mathbf{x} = [P(1), P(2), \dots, P(N)]$, 则式(10)可化为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } h(\mathbf{x}) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可得 Lagrange 函数为:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T h(\mathbf{x}) \quad (12)$$

其中, $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbf{R}^{4N}$ 为不等式约束的 Lagrange 乘子向量。

根据式(11)和(12),可得一阶 KKT 条件为:

$$\begin{cases} \nabla_x L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \nabla_x f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \nabla_x h(\mathbf{x}) = 0 \\ h(\mathbf{x}) \geq 0 \\ \boldsymbol{\lambda} \geq 0 \\ \boldsymbol{\lambda}^T h(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

用式(7)所示的 NCP 函数可将式(13)等价:

$$H(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \begin{bmatrix} \nabla_x L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) \\ \xi(h(\mathbf{x}), \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

考虑到式(6)和(7)等价的条件为 $\boldsymbol{\mu}$ 趋于 0, 可将扰动因子 $\boldsymbol{\mu}$ 加入式(14), 得:

$$H(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu} \\ \nabla_x L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) \\ \xi(h(\mathbf{x}), \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$

至此, 式(10)描述的 BESS 平滑功率波动问题等价为了求解式(15)描述的非线性方程组解的问题, 并可通过牛顿法进行求解。

在实际平滑过程中, 由于只能实时得到当前时刻的风功率值, 因此需先对风功率进行预测。式(10)中的 P_w 即为风功率预测值, 而方程组的解则为平滑区间内 BESS 的充放电功率指令 P_{ref} 。

3.2 实时功率修正策略

考虑到实际风功率 P_{real} 与预测风功率 P_{imag} 之间存在一定的差值 $\Delta P = P_{\text{real}} - P_{\text{imag}}$, 理论上 BESS 的实时充放电功率指令为:

$$P'_f = P_{\text{ref}} + \Delta P \quad (16)$$

采用非线性互补牛顿算法虽然能够在理论上求得非线性规划的近似最优解, 但是其只能保证 BESS 的 SOC 处于可运行范围内, 却难以保证电池的 SOC 处在较佳的运行状态。在实际控制系统中, 既要保证 BESS 当前时刻的功率修正力度, 还需为下一时刻的功率修正保留一定的裕度。若不加控制地修正会导致 BESS 不能兼顾各个时段的功率修正, 从而使 BESS 的 SOC 过早不足或饱和, 进而导致平滑效果变差。针对这种情况, 本文根据 BESS 充放电功率指令值及当前 BESS 的 SOC 状态, 通过模糊控制实时调整功率指令值的大小。

模糊控制器的输入量为当前时刻功率指令值 P'_f 及 BESS 的 SOC 值 $C_s(t)$ 。为了便于量化, 需对输入量进行标准化:

$$\begin{cases} \delta = \frac{P'_f}{\Delta P_{\text{max}}} \\ \omega = \frac{2C_s - C_{s,\text{max}} - C_{s,\text{min}}}{C_{s,\text{max}} - C_{s,\text{min}}} \end{cases} \quad (17)$$

其中, δ 和 ω 为标准化后的模糊控制器输入量, 其取值范围均为 $[-1, 1]$; ΔP_{max} 为当前 BESS 的最大充放电功率值, 其表达式如下。

$$\Delta P_{\text{max}} = \begin{cases} \min \left[\frac{(C_{s,\text{max}} - C_s) E_s}{\eta_c \Delta t}, P_{\text{max}} \right] & \Delta P \geq 0 \\ \min \left[\frac{(C_s - C_{s,\text{min}}) E_s \eta_d}{\Delta t}, -P_{\text{min}} \right] & \Delta P < 0 \end{cases} \quad (18)$$

模糊控制器输入量 δ 和 ω 的模糊集均为 $\{\text{NB}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PB}\}$, 论域取变量的取值范围为 $[-1, 1]$; 模糊控制器的输出为功率修正系数 K , 其模糊集为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NMS}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$, 论域为离散集 $\{-1, -0.8, -0.6, -0.05, 0, 0.2, 0.5, 0.9\}$ 。模糊控制器输入、输出量隶属度函数分别如图 1 和图 2 所示。

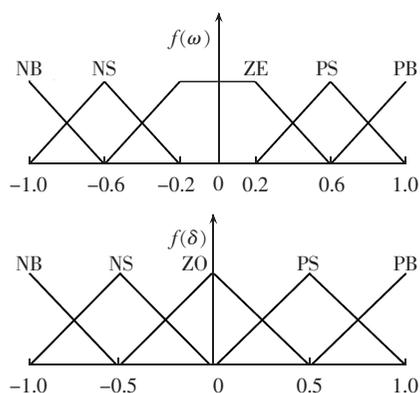


图 1 输入量隶属度函数

Fig.1 Input membership function

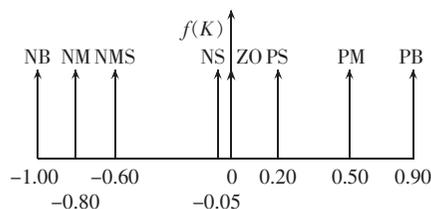


图 2 输出量隶属度函数

Fig.2 Output membership function

功率修正的规则为: 当 BESS 的 SOC 值较小时, 表示 BESS 放电能力不足, 若此时功率修正值为放电指令, 则应适当减小功率修正系数 K , 若为充电指令, 则维持原功率修正值不变; 当 BESS 的 SOC 值较大时, 表示 BESS 充电能力不足, 若此时功率修正值为充电指令, 则应减小该充电指令或不充电, 若为放电指令, 则维持原功率修正值; 当 BESS 的 SOC 值适中时, 维持原功率修正值。据此可得模糊控制器的控制规则如表 1 所示。

模糊控制采用重心法进行求解功率修正系数:

$$K = \frac{\sum_p \sum_q f_p(\omega) f_q(\delta) K_{pq}}{\sum_p \sum_q f_p(\omega) f_q(\delta)} \quad (19)$$

经模糊控制器修正后的 BESS 充放电功率指令为:

表 1 模糊控制规则
Table 1 Fuzzy control rules

ω 模糊集	δ 模糊集	K 模糊集	ω 模糊集	δ 模糊集	K 模糊集	ω 模糊集	δ 模糊集	K 模糊集
NB	NB	PB	PB	NS	ZO	PS	PS	NMS
NS	NB	PM	NB	ZE	ZO	PB	PS	NM
ZE	NB	ZO	NS	ZE	ZO	NB	PB	ZO
PS	NB	ZO	ZE	ZE	ZO	NS	PB	ZO
PB	NB	ZO	PS	ZE	ZO	ZE	PB	NS
NB	NS	PM	PB	ZE	ZO	PS	PB	NM
NS	NS	PS	NB	PS	ZO	PB	PB	NB
ZE	NS	ZO	NS	PS	ZO			
PS	NS	ZO	ZE	PS	NS			

$$P_t = P'_t + K |P'_t| \quad (20)$$

用非线性互补的牛顿优化算法求解 BESS 平滑功率波动问题的流程图如图 3 所示。

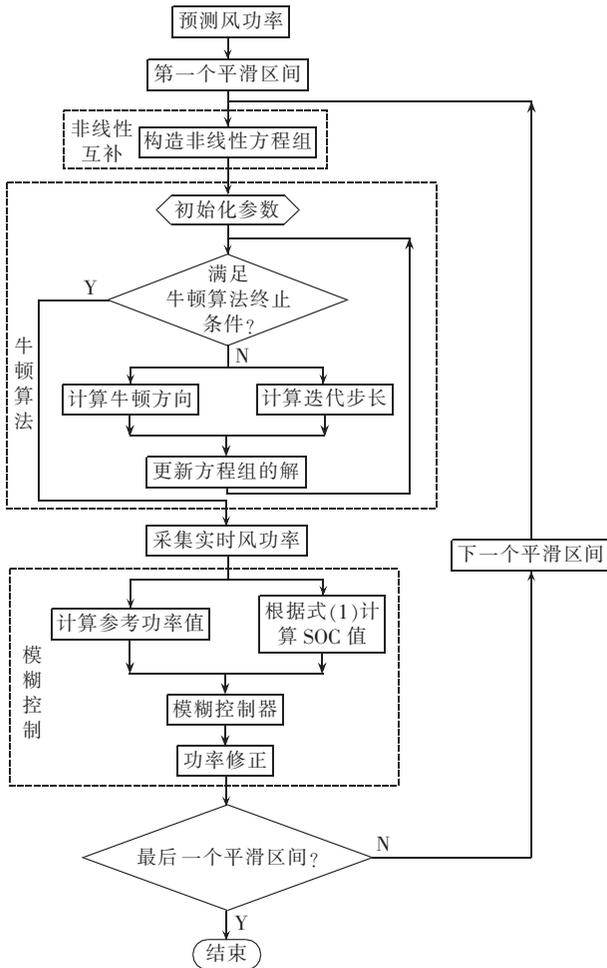


图 3 算法流程图

Fig.3 Flowchart of the proposed algorithm

4 算例分析

4.1 算例数据

本文算例中 BESS 采用文献 [10] 中的 14 个锂离子电池模块,风功率曲线通过风速与风功率关系式模拟获得。单个电池模块的额定容量为 8 MW·h,

充放电功率为 2 MW, SOC 值范围为 0.1~0.9,充放电效率为 90%;风电场额定功率为 50 MW,额定风速为 12 m/s,切入风速为 3 m/s,切出风速为 22 m/s。

牛顿算法中, μ 为扰动因子,其值在迭代过程中逐步趋近于 0,初值一般较小,本文取 0.01; ε 为误差因子,其值越小,计算误差越小,计算时间越长,本文取 0.001,既保证了计算速度,又保证了计算精度; β 和 τ 与牛顿算法中的迭代步长有关, β 越小其精度越高,为了兼顾计算速度,本文取 0.8; τ 较小,本文取 0.01;选择初始点 $s^0 = (\mu^0, x^0, \lambda^0) = (0.01, x^0, 0.01, \dots, 0.01)$ 。

4.2 风功率平滑效果

为了验证本文所提平滑策略的有效性,当 SOC 值为 0.5 时对风功率曲线加以平滑。图 4 给出了利用本文策略平滑后的风功率曲线及 SOC 变化情况。同时为了验证本文功率修正策略的有效性,图中也给出了未使用功率修正策略平滑后的风功率曲线和 SOC 变化情况。

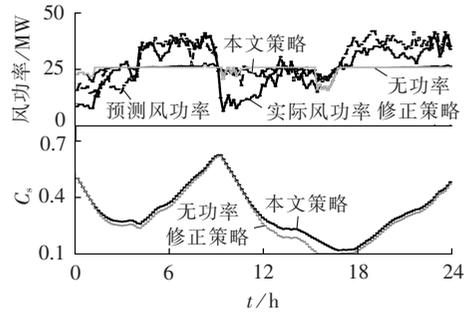


图 4 平滑前后的功率波动对比

Fig.4 Comparison of power fluctuations between before and after smoothing

从图 4 可以看出,采用本文策略平滑后的风功率曲线更加光滑且能够将风电功率曲线基本平滑至同一值,这说明采用本文平滑策略,通过引入 BESS 可以在大范围内达到消除风电功率波动的目标,极大地缓解了风电接入给电网带来的冲击。进一步计算分析图中的数据可得,平滑前的目标函数值为 12 474 MW²,采用本文平滑策略平滑后的目标函数值下降为 429.6 MW²,下降比达 96.56%,证明了本文平滑策略的有效性;未采用功率修正原则平滑后的目标函数值为 640.4 MW²,比采用功率修正策略的高 49.07%,证明了采用功率修正策略可减小功率波动。采用功率修正策略的 SOC 值波动更小。且在 15~18 h 期间,未采用功率修正策略的风功率曲线比用平滑策略的波动更大,这是由于该时段内其 SOC 值达到了最小值,无法发挥 BESS 的平滑性能;而采用功率修正策略则可合理兼顾各个时段的平滑效果,避免 BESS 的 SOC 过早趋于不足或饱和,从而导致平滑效果变差。

为了进一步分析模糊控制器的调节效果,图 5 给出了各时段经非线性互补牛顿算法平滑后的充放电功率指令 P_t 及模糊控制器修正系数 K 的变化情况。

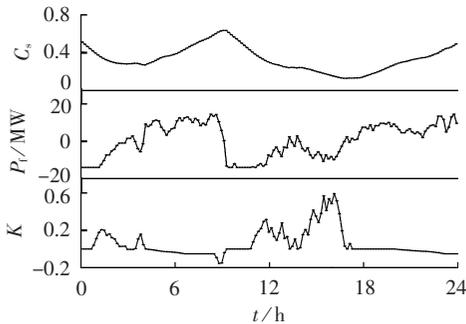


图 5 SOC、平滑功率及功率修正系数变化情况

Fig.5 Trends of SOC,smoothing power and correction factor

从图 5 可以看出,功率修正系数在正常情况下基本为 0,即保持原有的平滑功率不变,只有当 BESS 的 SOC 和当前的充放电能力不匹配时才会发挥调节作用。如在 14~17 h 期间,SOC 值偏低,而充放电指令为放电,会使得 BESS 的 SOC 值持续偏低,此时模糊控制发挥调节作用,适当地增加调节系数,从而降低放电功率。相反地,如在 8~9 h 期间,SOC 值偏高,而充放电指令为充电,模糊控制器则适当地降低调节系数,从而降低充电功率。

4.3 SOC 灵敏度分析

SOC 初值的不同表明电池充放电能力的不同,其应对功率波动而动作的灵敏性不同,会对 BESS 的平滑效果产生一定的影响。为了测试 SOC 初值的灵敏性,图 6 给出了不同 SOC 初值下采用本文平滑策略的平滑效果。

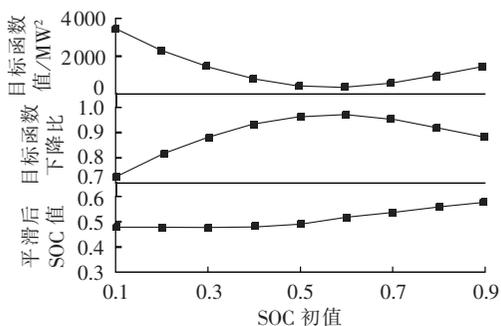


图 6 不同 SOC 初值下平滑效果对比

Fig.6 Comparisons of smoothing effect under different initial values of SOC

从图 6 可以看出,当 SOC 初值为 0.5~0.6 时,平滑效果最佳;当 SOC 初值由 0.5~0.6 逐渐减小或增大时,平滑效果逐渐变差。这是由于当 SOC 初值为 0.5~0.6 时,BESS 既具备较好的充电能力,又具备较好的放电能力,其应对功率波动的灵敏性较强,能够

更好地追踪目标函数,获得更佳的平滑效果;当 SOC 初值由 0.5~0.6 逐渐减小或增大时,其放电能力或充电能力逐渐减弱,尤其是当 SOC 处于最小或最大状态时,BESS 只具备充电能力或放电能力,使得 BESS 在某些时段不动作或小幅动作而导致平滑效果变差。不同 SOC 初值下,用本文策略平滑后的目标函数下降比均在 70% 以上,这说明即使在极端 SOC 值初值下,利用本文策略依然能够保证较好的平滑效果。且从图中可以看出,即使 SOC 值初值不同,但经本文策略平滑后的 SOC 值维持在 0.4~0.6 之间,受 SOC 初值的影响很小,可以推断本文策略具备连续平滑能力。

5 结论

本文将非线性互补理论的牛顿算法用于求解 BESS 平滑风功率波动问题,从而将该问题转化为纯粹的数学问题,并提出了 BESS 充放电功率修正策略,在 BESS 的安全运行范围内,最大限度地发挥了 BESS 的平滑效果。该策略能准确地追踪目标函数,反映非线性规划问题中出现的最优状态。算例结果表明,本文策略能够有效地平滑风功率波动,且能在大范围内消除风电功率的波动,可以推断,如果将该策略应用于负荷侧的削峰填谷,可以使得发电计划在大范围内保持不变,降低发电机组的运行成本;经该策略平滑后的 SOC 值受 SOC 初值影响较小,具备连续平滑能力。

参考文献:

- [1] 牛林华,龚庆武,黄炳翔,等. 大规模风电电网下的风光火电力系统联合优化调度[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):52-58.
NIU Linhua,GONG Qingwu,HUANG Bingxiang,et al. Optimal dispatch of wind-gas-coal power generation system with large-scale wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(11):52-58.
- [2] 涂炼,刘涤尘,廖清芬,等. 计及储能容量优化的含风光储配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):40-46.
TU Lian,LIU Dichen,LIAO Qingfen,et al. Reliability evaluation considering storage capacity optimization for distribution system with wind-PV-storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):40-46.
- [3] 袁小明,程时杰,文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):14-18.
YUAN Xiaoming,CHENG Shijie,WEN Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):14-18.
- [4] 陈满,陆志刚,刘怡,等. 电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究[J]. 电网技术,2012,36(9):232-237.
CHEN Man,LU Zhigang,LIU Yi,et al. Research on optimal peak load shifting strategy of battery energy storage system operated in constant power mode[J]. Power System Technology,2012,36(9):232-237.

- [5] 王颖,张凯锋,付嘉渝,等. 抑制风电爬坡率的风储联合优化控制方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):17-23.
WANG Ying,ZHANG Kaifeng,FU Jiayu,et al. Optimization control method of wind/storage system for suppressing wind power ramp rate[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(13):17-23.
- [6] BREKKEN T K A,YOKOCHI A,JOUANNE A V,et al. Optimal energy storage sizing and control for wind power applications [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2011,2(1):69-77.
- [7] 张熙,张峰,梁军,等. 基于风电功率预测的复合储能超前优化控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):58-65.
ZHANG Xi,ZHANG Feng,LIANG Jun,et al. An optimal look-ahead control strategy for hybrid energy storage system based on wind power prediction[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(23):58-65.
- [8] 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):11-16.
BAO Guannan,LU Chao,YUAN Zhichang,et al. Load shift real-time optimization strategy of battery energy storage system based on dynamic programming[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(12):11-16.
- [9] 丁明,徐宁舟,毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J]. 电力系统自动化,2011,35(2):66-72.
DING Ming,XU Ningzhou,BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(2):66-72.
- [10] 丁明,吴建锋,朱承治,等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):22-29.
DING Ming,WU Jianfeng,ZHU Chengzhi,et al. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(1):22-29.
- [11] 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.
- [12] 雷珉,欧阳曾恺,李征,等. 平抑风能波动的储能电池 SOC 与滤波协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):126-131.
LEI Ting,OUYANG Zengkai,LI Zheng,et al. Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power fluctuation smoothing[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):126-131.
- [13] 沈枢,张沛超,李中豪,等. 平抑长短期风电功率波动的风储协调运行方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):12-18.
SHEN Shu,ZHANG Peichao,LI Zhonghao,et al. A coordination operation method of wind power and energy storage hybrid system for smoothing short-term and long-term wind power fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(8):12-18.
- [14] 林济铿,石伟钊,武乃虎,等. 计及离散变量基于互补约束全光滑牛顿法的无功优化[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):93-100.
LIN Jikeng,SHI Weizhao,WU Naihu,et al. Reactive power optimization with discrete variables based on complementarity constraints smooth Newton method[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(1):93-100,13.
- [15] 蔡广林,韦化. 基于非线性互补方法的内点最优潮流算法[J]. 电网技术,2005,29(21):25-30.
CAI Guanglin,WEI Hua. An interior point optimal power flow algorithm based on nonlinear complementarity method[J]. Power System Technology,2005,29(21):25-30.
- [16] 张永平,童小娇,吴复立,等. 基于非线性互补问题函数的半光滑牛顿最优潮流算法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):134-139.
ZHANG Yongping,TONG Xiaojiao,WU Fuli,et al. Study on semismooth Newton optimal power flow algorithm based on nonlinear complementarity problem function[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):134-139.
- [17] 韩继业,修乃华,戚厚铎. 非线性互补理论与算法[M]. 上海:上海科学技术出版社,2006:25.

作者简介:



谷青发

谷青发(1992—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析、新能源及其利用(E-mail:guqingfa@hotmail.com);

王杰(1960—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为复杂系统非线性控制、自适应控制、鲁棒控制、电力系统非线性控制与稳定分析。

Smoothing strategy of battery energy storage system based on nonlinear complementary Newton method

GU Qingfa,WANG Jie

(School of Electronic Information and Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China)

Abstract: Smoothing power fluctuations using a battery energy storage system is a nonlinear programming problem with huge dimensions and multiple constraints. To obtain a more tractable optimal solution,a smoothing strategy of battery energy storage system based on nonlinear complementary Newton method is proposed,in which the optimality conditions of smoothing problem are transformed into nonlinear equations. As a result,the original problem is reformulated as a set of nonlinear equations,which can be solved by Newton method. The case results demonstrate that the proposed method is effective in smoothing wind power fluctuations and is capable of continuous smoothing.

Key words: battery energy storage system; smoothing power fluctuation; nonlinear complementarity; Newton method; fuzzy control; wind power