



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102624017 A

(43) 申请公布日 2012. 08. 01

(21) 申请号 201210077692. 0

(22) 申请日 2012. 03. 22

(71) 申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园 1 号

申请人 张家港智电可再生能源与储能技术  
研究有限公司

(72) 发明人 陆超 鲍冠南 袁志昌 韩英铎

(74) 专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事  
务所(普通合伙) 11201

代理人 罗文群

(51) Int. Cl.

H02J 3/32(2006. 01)

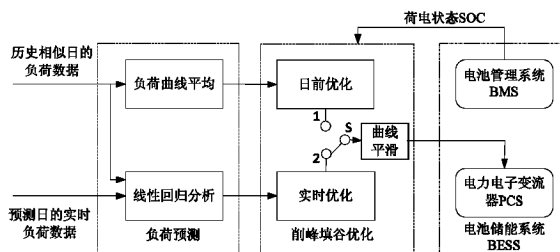
权利要求书 3 页 说明书 7 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种基于负荷预测的电池储能系统削峰填谷  
实时控制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于负荷预测的电池储能系  
统削峰填谷实时控制方法,属于电力系统自动控  
制领域。首先寻找历史相似日负荷数据,采用线  
性回归分析法进行扩展短期负荷预测,建立电池  
储能系统削峰填谷实时优化模型,采用动态规  
划算法求解电池储能系统削峰填谷实时优化模  
型,得到电池储能系统在各个时刻的输出功率。  
本发明的控制方法,在实时优化模型中包含了电  
池充放电次数约束和放电深度约束,用来研究电  
池寿命与充放电次数和放电深度的关系,利于  
延长电池寿命。以负荷方差最小为目标函数能  
够减小负荷曲线的峰谷差,在满足约束条件的  
前提下使负荷曲线更为平坦,满足削峰填谷的  
应用需求。采用负荷平滑限制能够使得负荷曲  
线局部更加平滑。



1. 一种基于负荷预测的电池储能系统削峰填谷实时控制方法,其特征在于该方法包括以下各步骤:

(1) 在历史负荷数据库中寻找  $n$  条与预测日的日类型相同、天气相同的日期的负荷数据,称为历史相似日负荷数据,由历史相似日负荷数据分别得到  $n$  条历史相似日负荷曲线;将预测日的一天划分为  $N$  个阶段,相邻两个阶段的预测负荷数据的时间间隔为  $\Delta t$ ;

(2) 采用线性回归分析法进行扩展短期负荷预测,预测方法如下:

(2-1) 设测量时刻是在预测日的第  $m$  个阶段,预测日的实时负荷曲线  $r(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 中有  $m$  个已知的负荷数据和  $N-m$  个未知的负荷数据,并设预测负荷曲线  $\hat{r}(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 为  $n$  条历史相似日负荷曲线  $h_1(j), h_2(j), \dots, h_n(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 的线性组合,则预测负荷曲线  $\hat{r}(j)$  为:

$$\hat{r}(j) = \sum_{i=1}^n \alpha_i h_i(j) \quad j=1,2,\dots,N$$

其中  $\alpha_i$  为历史相似日负荷曲线  $h_i(j)$  的拟合参数;

(2-2) 根据“近大远小”原则,即距离预测点近的时刻的已知负荷值对预测值的影响大于距离预测点远的时刻的负荷值,第一个阶段到第  $N$  个阶段的负荷点的权重  $w_j$  取值如下:

$$w_j = \begin{cases} W, & j = m \\ \beta w_{j+1}, & 0 < j < m \\ 0, & j > m \end{cases}$$

其中,  $0 < \beta \leq 1$ ,  $W$  为大于零的正数,若  $\beta = 1$ ,则各个已知负荷点的权重都相同;最小二乘拟合的目标是使得下面式子中偏差的值最小:

$$\text{偏差} = \sum_{j=1}^m w_j \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i h_i(j) - r(j) \right)^2$$

约束条件为:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases}; \text{采用加权最小二乘法求解得到拟合参数 } \alpha_i;$$

(2-3) 根据拟合参数  $\alpha_i$ ,利用步骤 (2-1) 的等式,求出预测负荷曲线  $\hat{r}$ ;

(3) 建立电池储能系统削峰填谷实时优化模型,建立过程如下:

(3-1) 设电池的充电功率为正,放电功率为负,将电池储能系统在  $m$  阶段到  $N$  阶段的输出功率  $b(x)$  ( $x = m, m+1, \dots, N$ ) 作为控制变量,将电池储能系统在  $m$  阶段结束时到  $N$  阶段结束时电池的电量  $s(x)$  ( $x = m, m+1, \dots, N$ ) 作为状态变量,得到电池储能系统实时优化模型的目标函数为:

$$\min f = \sum_{x=m}^N (\hat{r}(x) + b(x))^2$$

(3-2) 设定电池储能系统削峰填谷实时优化模型的约束条件,包括:

容量约束:

$$S_{\text{low}} \leq s(x) \leq S_{\text{high}} \quad x = m, m+1, \dots, N$$

$$s(x) = s(x-1) + b(x) \times \Delta t, \quad x = m, m+1, \dots, N$$

第  $N$  阶段结束时的电池电量  $s(N) = S_{\text{final}}$ ,其中  $S_{\text{final}}$  为预先设定的一天结束时的电池电量值。

功率约束：

$$-P_{\max} \leq b(x) \leq P_{\max}, x = m, m+1, \dots, N,$$

充放电次数约束表示为：

充放电次数 = k, 或者充放电次数  $\leq k$ , 其中 k 为正整数,

放电深度约束：

电池第 y 次放电过程中的电量大于或等于放电深度限制值, 放电深度限制值记为 DOD(y), 其中  $y = 1, 2, \dots, k$ , 放电深度限制值 DOD(y) 根据电池使用寿命设定；

(4) 采用动态规划算法求解电池储能系统削峰填谷实时优化模型：

(4-1) 设一个电池电量为一个状态, 将预测日一天 N 个阶段中每个阶段的所有电池电量状态划分为  $2k$  个部分, 其中 k 为电池的充放电次数约束值, 若一天中电池首先进行充电, 则  $2k$  个部分分别为: 第一次充电部分、第一次放电部分、第二次充电部分、第二次放电部分、 $\dots$ 、第 k 次充电部分、第 k 次放电部分, 每个部分中包含多个电池电量状态, 将电池的电量离散化, 相邻两个状态之间的电量差为  $\Delta s$ , 实时优化时电量初始状态在当前阶段, 电量终值状态在第 N 阶段, 充电时电池的电量满足上述容量约束条件  $S_{\text{low}} \leq s(x) \leq S_{\text{high}}$   $x = m, m+1, \dots, N$ , 第 y 次放电时电池的电量满足上述容量约束  $S_{\text{low}} \leq s(x) \leq S_{\text{high}}$   $x = m, m+1, \dots, N$ , 并满足上述放电深度约束  $s(x) \geq \text{DOD}(y)$ ；

(4-2) 将从预测日的一个阶段的一个电池电量状态出发到达相邻下一阶段的任意一个电池电量状态记为一个决策, 选择满足以下条件的决策作为可行决策：

若从第 y ( $y = 1, 2, \dots, k$ ) 次充电时电量为  $s(x)$  的状态出发, 到达第 y 次充电时电池电量大于或等于  $s(x)$  的状态, 或到达第 y 次放电时电池电量小于  $s(x)$  的状态, 且出发时状态的电池电量和到达时状态的电池电量之差的绝对值小于或等于电池的最大充放电功率限制值  $P_{\max} \times \Delta t$ , 则该决策为可行决策；

或: 若从第 y 次放电时电池电量为  $s(x)$  的状态出发, 到达第 y 次放电时电池电量小于或等于  $s(x)$  的状态, 或到达第 y+1 次充电时电池电量大于  $s(x)$  的状态, 且出发时状态的电池电量和到达时状态的电池电量之差的绝对值小于或等于电池的最大充放电功率限制值  $P_{\max} \times \Delta t$ , 则该决策为可行决策；

(4-3) 根据动态规划算法中的递推方程, 依次求解每个阶段每个状态的阶段性最优指标函数  $f(s(u))$ ,  $f(s(u)) = \min_{b(u) \in d(s(u))} \{f(s(u-1)) + v_u(b(u))\}$ , 由当前阶段向第 N 阶段推算, 其中,  $s(u)$  为第预测日中的第 u 阶段的电池电量状态,  $d(s(u))$  是由  $s(u)$  确定的上述可行决策的集合, 输出功率  $b(u)$  为第 u 阶段的决策变量,  $v_u(b(u)) = (r(u) + b(u))^2$  是第 u 阶段的阶段指标；记录每个阶段每个状态的最优决策, 得到终值状态的阶段性最优指标函数  $f(s(N))$ , 即为电池储能系统削峰填谷实时优化模型的目标函数 f；从终值状态的最优决策开始根据每一阶段的最优决策依次向前类推, 分别求解电池储能系统在各个时刻电池的电量  $s(x)$ ,  $x = m, m+1, \dots, N$ , 分别得到电池储能系统在各个时刻的输出功率  $b(x)$ ；

(5) 当电池处于持续充电或者持续放电时, 对求解出的电池储能系统当前阶段的输出功率进行负荷平滑处理, 处理方法为: 对电池当前时刻的输出功率  $b(m)$  进行调整, 使得  $b(m) + r(m) \leq \max \left\{ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (b(m-i) + r(m-i)) + \Delta pload, r(m) - P_{\max} \right\}$ , 并且

$b(m) + r(m) \geq \min \left\{ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (b(m-i) + r(m-i)) - \Delta pload, r(m) + P_{\max} \right\}$ , 其中,  $p$  为设定的预测日中测量时刻之前的阶段个数,  $\Delta pload$  为设定的负荷波动限制值。

## 一种基于负荷预测的电池储能系统削峰填谷实时控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于负荷预测的电池储能系统削峰填谷实时控制方法,属于电力系统自动控制领域。

### 背景技术

[0002] 大规模电池储能系统 (Battery Energy Storage System, 以下简称 BESS) 通过在负荷高峰时放电,在负荷低谷时充电,可以实现对负荷的削峰填谷功能。对电网来说,利用电池储能系统削峰填谷能够推迟设备容量升级,提高设备利用率,节省设备更新的费用;对用户来说,利用电池储能系统削峰填谷可以利用峰谷电价差获得经济效益。在国外已有许多大规模 BESS 在运行;在国内,南方电网开展了兆瓦级电池储能系统示范项目。

[0003] BESS 削峰填谷效果依赖于预测负荷曲线的准确性。短期负荷预测方法可以分为两大类——传统预测方法和人工智能预测方法。传统预测方法包括时间序列法、回归分析法、趋势外插法、弹性系数法等等;人工智能方法包括专家系统法、模糊推理法、人工神经网络法等等。将需要进行负荷预测的一天称为预测日。传统的短期负荷预测往往只依赖于预测日以前的历史负荷数据,提前对预测日负荷进行预测。扩展短期负荷预测的概念是利用历史信息和当前可获得的最新信息预测当日当前时刻以后未知的负荷以用于对当日负荷计划的调整。从预测周期上看扩展短期负荷预测介于超短期、短期负荷预测之间。

[0004] 从时间长短来看,削峰填谷是 BESS 在“小时级”的应用。传统的 BESS 实时控制有两种模式,一种是固定模式,按照事先定好的曲线来运行,这种模式的缺点是不够灵活,无法适应实时负荷曲线的变化;另一种是负荷跟踪控制模式,使负荷跟踪计算出的目标功率,这种模式的缺点是电池有可能因为电量不足或电量已满而无法继续跟踪目标值。如何利用有限的电池容量达到最优的削峰填谷效果,并满足一组约束条件的限制,需要实时地借助于优化算法来实现。

[0005] 目前的优化算法包括梯度类算法、智能算法和动态规划算法。随着时间步长的减小,梯度类算法的迭代时间大大增加,并且梯度类算法无法处理非连续的约束条件。智能算法包括遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等。在智能算法中,选取合适的参数非常困难且智能算法无法保证每次都能求得全局最优解。动态规划算法可以处理非连续、非线性的约束。

[0006] 对电池的充放电次数和放电深度加以限制,可以起到延长电池寿命的作用,也可以用来研究电池寿命和充放电次数、放电深度的关系。以往求解电池充放电策略的算法中,没有考虑电池充放电次数约束和放电深度约束。这两个约束是非连续约束,无法用基于连续约束的优化方法来求解。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的是提出一种电池储能系统削峰填谷实时控制方法,在每次控制时求解出电池储能系统充电或放电指令,经过平滑处理后下发给电力电子变流器进行充放电,

使负荷曲线变得平坦,充放电策略满足电池的充放电次数限制和放电深度限制,以延长电池的使用寿命。

[0008] 本发明提出的基于负荷预测的电池储能系统削峰填谷实时控制方法,包括以下各步骤:

[0009] (1) 在历史负荷数据库中寻找  $n$  条与预测日的日类型相同、天气相同的日期的负荷数据,称为历史相似日负荷数据,由历史相似日负荷数据分别得到  $n$  条历史相似日负荷曲线;将预测日的一天划分为  $N$  个阶段,相邻两个阶段的预测负荷数据的时间间隔为  $\Delta t$ ;

[0010] (2) 采用线性回归分析法进行扩展短期负荷预测,预测方法如下:

[0011] (2-1) 设测量时刻是在预测日的第  $m$  个阶段,预测日的实时负荷曲线  $r(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 中有  $m$  个已知的负荷数据和  $N-m$  个未知的负荷数据,并设预测负荷曲线  $\hat{r}(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 为  $n$  条历史相似日负荷曲线  $h_1(j), h_2(j), \dots, h_n(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 的线性组合,则预测负荷曲线  $\hat{r}(j)$  为:

[0012]

$$\hat{r}(j) = \sum_{i=1}^n \alpha_i h_i(j) \quad j=1,2,\dots,N$$

[0013] 其中  $\alpha_i$  为历史相似日负荷曲线  $h_i(j)$  的拟合参数;

[0014] (2-2) 根据“近大远小”原则,即距离预测点近的时时刻的已知负荷值对预测值的影响大于距离预测点远的时时刻的负荷值,第一个阶段到第  $N$  个阶段的负荷点的权重  $w_j$  取值如下:

$$[0015] \quad w_j = \begin{cases} W, & j = m \\ \beta w_{j+1}, & 0 < j < m \\ 0, & j > m \end{cases}$$

[0016] 其中,  $0 < \beta \leq 1$ ,  $W$  为大于零的正数,若  $\beta = 1$ ,则各个已知负荷点的权重都相同;最小二乘拟合的目标是使得下面式子中偏差的值最小:

[0017]

$$\text{偏差} = \sum_{j=1}^m w_j \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i h_i(j) - r(j) \right)^2$$

[0018] 约束条件为:

$$[0019] \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases}; \text{采用加权最小二乘法求解得到拟合参数 } \alpha_i;$$

[0020] (2-3) 根据拟合参数  $\alpha_i$ ,利用步骤 (2-1) 的等式,求出预测负荷曲线  $\hat{r}$ ;

[0021] (3) 建立电池储能系统削峰填谷实时优化模型,建立过程如下:

[0022] (3-1) 设电池的充电功率为正,放电功率为负,将电池储能系统在  $m$  阶段到  $N$  阶段的输出功率  $b(x)$  ( $x = m, m+1, \dots, N$ ) 作为控制变量,将电池储能系统在  $m$  阶段结束时到  $N$  阶段结束时电池的电量  $s(x)$  ( $x = m, m+1, \dots, N$ ) 作为状态变量,得到电池储能系统实时优化模型的目标函数为:

[0023]

$$\min f = \sum_{x=m}^N (\hat{r}(x) + b(x))^2$$

[0024] (3-2) 设定电池储能系统削峰填谷实时优化模型的约束条件,包括:

[0025] 容量约束：

$$[0026] \quad S_{\text{low}} \leq s(x) \leq S_{\text{high}} \quad x = m, m+1, \dots, N$$

$$[0027] \quad s(x) = s(x-1) + b(x) \times \Delta t, \quad x = m, m+1, \dots, N$$

[0028] 第 N 阶段结束时的电池电量  $s(N) = S_{\text{final}}$ , 其中  $S_{\text{final}}$  为预先设定的一天结束时的电池电量值。

[0029] 功率约束：

$$[0030] \quad -P_{\text{max}} \leq b(x) \leq P_{\text{max}}, \quad x = m, m+1, \dots, N,$$

[0031] 充放电次数约束表示为：

[0032] 充放电次数 = k, 或者充放电次数  $\leq k$ , 其中 k 为正整数,

[0033] 放电深度约束：

[0034] 电池第 y 次放电过程中的电量大于或等于放电深度限制值, 放电深度限制值记为 DOD(y), 其中  $y = 1, 2, \dots, k$ , 放电深度限制值 DOD(y) 根据电池使用寿命设定；

[0035] (4) 采用动态规划算法求解电池储能系统削峰填谷实时优化模型：

[0036] (4-1) 设一个电池电量为一个状态, 将预测日一天 N 个阶段中每个阶段的所有电池电量状态划分为  $2k$  个部分, 其中 k 为电池的充放电次数约束值, 若一天中电池首先进行充电, 则  $2k$  个部分分别为：第一次充电部分、第一次放电部分、第二次充电部分、第二次放电部分、……、第 k 次充电部分、第 k 次放电部分, 每个部分中包含多个电池电量状态, 将电池的电量离散化, 相邻两个状态之间的电量差为  $\Delta s$ , 实时优化时电量初始状态在当前阶段, 电量终值状态在第 N 阶段, 充电时电池的电量满足上述容量约束条件  $S_{\text{low}} \leq s(x) \leq S_{\text{high}}$   $x = m, m+1, \dots, N$ , 第 y 次放电时电池的电量满足上述容量约束  $S_{\text{low}} \leq s(x) \leq S_{\text{high}}$   $x = m, m+1, \dots, N$ , 并满足上述放电深度约束  $s(x) \geq \text{DOD}(y)$ ；

[0037] (4-2) 将从预测日的一个阶段的一个电池电量状态出发到达相邻下一阶段的任意一个电池电量状态记为一个决策, 选择满足以下条件的决策作为可行决策：

[0038] 若从第 y ( $y = 1, 2, \dots, k$ ) 次充电时电量为  $s(x)$  的状态出发, 到达第 y 次充电时电池电量大于或等于  $s(x)$  的状态, 或到达第 y 次放电时电池电量小于  $s(x)$  的状态, 且出发时状态的电池电量和到达时状态的电池电量之差的绝对值小于或等于电池的最大充放电功率限制值  $P_{\text{max}} \times \Delta t$ , 则该决策为可行决策；

[0039] 或：若从第 y 次放电时电池电量为  $s(x)$  的状态出发, 到达第 y 次放电时电池电量小于或等于  $s(x)$  的状态, 或到达第 y+1 次充电时电池电量大于  $s(x)$  的状态, 且出发时状态的电池电量和到达时状态的电池电量之差的绝对值小于或等于电池的最大充放电功率限制值  $P_{\text{max}} \times \Delta t$ , 则该决策为可行决策；

[0040] (4-3) 根据动态规划算法中的递推方程, 依次求解每个阶段每个状态的阶段性最优指标函数  $f(s(u))$ ,  $f(s(u)) = \min_{b(u) \in d(s(u))} \{f(s(u-1)) + v_u(b(u))\}$ , 由当前阶段向第 N 阶段推算, 其中,  $s(u)$  为第预测日中的第 u 阶段的电池电量状态,  $d(s(u))$  是由  $s(u)$  确定的上述可行决策的集合, 输出功率  $b(u)$  为第 u 阶段的决策变量,  $v_u(b(u)) = (r(u) + b(u))^2$  是第 u 阶段的阶段指标；记录每个阶段每个状态的最优决策, 得到终值状态的阶段性最优指标函数  $f(s(N))$ , 即为电池储能系统削峰填谷实时优化模型的目标函数 f；从终值状态的最优决策开始根据每一阶段的最优决策依次向前类推, 分别求解电池储能系统在各个时刻电池的电量  $s(x)$ ,  $x = m, m+1, \dots, N$ , 分别得到电池储能系统在各个时刻的输出功率  $b(x)$ ；

[0041] (5) 当电池处于持续充电或者持续放电时,对求解出的电池储能系统当前阶段的输出功率进行负荷平滑处理,处理方法为:对电池当前时刻的输出功率  $b(m)$  进行调整,使得  $b(m) + r(m) \leq \max \left\{ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (b(m-i) + r(m-i)) + \Delta pload, r(m) - P_{\max} \right\}$ , 并且

$b(m) + r(m) \geq \min \left\{ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (b(m-i) + r(m-i)) - \Delta pload, r(m) + P_{\max} \right\}$ , 其中,  $p$  为设定的预测日中测量时刻之前的阶段个数,  $\Delta pload$  为设定的负荷波动限制值。

[0042] 本发明提出的基于负荷预测的电池储能系统削峰填谷实时控制方法,通过扩展短期负荷预测方法实时修正预测负荷曲线,采用动态规划算法求解实时优化模型得到电池的充放电指令,经过负荷平滑处理后输送给电力电子变流器。在实时优化模型中包含了电池充放电次数约束和放电深度约束,可以用来研究电池寿命与充放电次数和放电深度的关系,利于延长电池寿命。以负荷方差最小为目标函数能够减小负荷曲线的峰谷差,在满足约束条件的前提下使负荷曲线更为平坦,满足削峰填谷的应用需求。采用负荷平滑限制能够使得负荷曲线局部更加平滑。

#### 附图说明

[0043] 图 1 是本发明提出的基于负荷预测的电池储能系统削峰填谷实时控制流程图示意图。

[0044] 图 2 是预测日负荷曲线和历史平均负荷曲线图。

[0045] 图 3 是利用本发明方法进行削峰填谷实时控制的仿真结果曲线图。

#### 具体实施方式

[0046] 本发明提出的基于负荷预测的电池储能系统削峰填谷实时控制方法,其流程框图如图 1 所示,包括以下步骤:

[0047] (1) 在历史负荷数据库中寻找  $n$  条与预测日的日类型相同(例如工作日、周末、节假日等等为日类型不相同的预测日)、天气相同(例如晴天和阴天为天气不相同的预测日)的日期的负荷数据,称为历史相似日负荷数据,由历史相似日负荷数据分别得到  $n$  条历史相似日负荷曲线;将预测日的一天划分为  $N$  个阶段,相邻两个阶段的预测负荷数据的时间间隔为  $\Delta t$ ;

[0048] (2) 采用线性回归分析法进行扩展短期负荷预测,预测方法如下:

[0049] (2-1) 设测量时刻是在预测日的第  $m$  个阶段,预测日的实时负荷曲线  $r(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 中有  $m$  个已知的负荷数据和  $N-m$  个未知的负荷数据,并设预测负荷曲线  $\hat{r}(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 为  $n$  条历史相似日负荷曲线  $h_1(j), h_2(j), \dots, h_n(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 的线性组合,则预测负荷曲线  $\hat{r}(j)$  为:

[0050]

$$\hat{r}(j) = \sum_{i=1}^n \alpha_i h_i(j) \quad j=1,2,\dots,N$$

[0051] 其中  $\alpha_i$  为历史相似日负荷曲线  $h_i(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) 的拟合参数;

[0052] (2-2) 根据“近大远小”原则,即距离预测点近的時刻的已知负荷值对预测值的影响大于距离预测点远的時刻的负荷值,第 1 个阶段到第  $N$  个阶段的负荷点的权重  $w_j$  ( $j = 1,$



2, …… , N) 取值如下 :

$$[0053] \quad w_j = \begin{cases} W, & j = m \\ \beta w_{j+1}, & 0 < j < m \\ 0, & j > m \end{cases}$$

[0054] 其中,  $0 < \beta \leq 1$ ,  $W$  为大于零的正数, 若  $\beta = 1$ , 则各个已知负荷点的权重都相同; 最小二乘拟合的目标是使得下面式子中偏差的值最小:

[0055]

$$\text{偏差} = \sum_{j=1}^m w_j \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i h_i(j) - r(j) \right)^2$$

[0056] 约束条件为:

$$[0057] \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases}; \text{采用加权最小二乘法求解得到拟合参数 } \alpha_i;$$

[0058] (2-3) 根据拟合参数  $\alpha_i$ , 利用步骤 (2-1) 的等式, 求出预测负荷曲线  $\hat{r}$ ;

[0059] (3) 建立电池储能系统削峰填谷实时优化模型, 建立过程如下:

[0060] (3-1) 设电池的充电功率为正, 放电功率为负, 将电池储能系统在  $m$  阶段到  $N$  阶段的输出功率  $b(x)$  ( $x = m, m+1, \dots, N$ ) 作为控制变量, 将电池储能系统在  $m$  阶段结束时到  $N$  阶段结束时电池的电量  $s(x)$  ( $x = m, m+1, \dots, N$ ) 作为状态变量, 得到电池储能系统实时优化模型的目标函数为:

[0061]

$$\min f = \sum_{x=m}^N (\hat{r}(x) + b(x))^2$$

[0062] 一天的负荷的方差为  $\min f = \frac{1}{N} \sum_{x=m}^N \left( (\hat{r}(x) + b(x)) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{r}(j) + b(j)) \right)^2$ , 若电池电量的初

始状态和终值状态为确定的值, 且不计电池内部损耗, 则  $\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{r}(j) + b(j))$  为常数, 负荷方差与

上述目标函数是等价的, 最小化目标函数可以最小化负荷方差, 使得负荷数据的波动最小。另外, 上述目标函数满足分离性和递推性, 即满足动态规划算法对目标函数的要求;

[0063] (3-2) 设定电池储能系统削峰填谷实时优化模型的约束条件, 包括:

[0064] 容量约束:

$$[0065] \quad S_{\text{low}} \leq s(x) \leq S_{\text{high}} \quad x = m, m+1, \dots, N$$

[0066] 忽略电池内部损耗, 则容量约束中的  $s(x) = s(x-1) + b(x) \times \Delta t$ ,  $x = m, m+1, \dots, N$ , 若考虑电池内部损耗, 可以根据具体的电池内部模型建立相应的容量变化方程,

[0067] 第  $N$  阶段结束时的电池电量  $s(N) = S_{\text{final}}$ , 其中  $S_{\text{final}}$  为预先设定的一天结束时的电池电量值。

[0068] 功率约束:

$$[0069] \quad -P_{\text{max}} \leq b(x) \leq P_{\text{max}}, \quad x = m, m+1, \dots, N,$$

[0070] 充放电次数约束:

[0071] 电池的状态可以分为充电、放电、空闲三种。其中, 空闲状态可以看作以零功率进行充电或放电。将“充电 - 空闲 - 充电”过程作为充电一次, “放电 - 空闲 - 放电”过程作为

放电一次。将“充电-空闲-放电”中间的空闲看作充电,将“放电-空闲-充电”中间的空闲看作放电。这样,一天被划分为多个阶段,其中充电阶段、放电阶段交替出现。一个充电阶段加上一个放电阶段算作一次充放电。充放电次数约束表示为:

[0072] 充放电次数 = k, 或者充放电次数  $\leq k$ , 其中 k 为正整数,

[0073] 放电深度约束:

[0074] 电池第 y 次放电过程中的电量大于或等于放电深度限制值 DOD(y) ( $y = 1, 2, \dots, k$ ), 其中放电深度限制值 DOD(y) ( $y = 1, 2, \dots, k$ ) 根据电池使用寿命设定;

[0075] (4) 采用动态规划算法求解电池储能系统削峰填谷实时优化模型:

[0076] (4-1) 设一个电池电量为一个状态,将预测日一天 N 个阶段中每个阶段的所有电池电量状态划分为 2k 个部分,其中 k 为电池的充放电次数约束值,若一天中电池首先进行充电,则 2k 个部分分别为:第一次充电部分、第一次放电部分、第二次充电部分、第二次放电部分、……、第 k 次充电部分、第 k 次放电部分,每个部分中包含多个电池电量状态,将电池的电量离散化,相邻两个状态之间的电量差为  $\Delta s$ ,实时优化时电量初始状态在当前阶段,电量终值状态在第 N 阶段,充电时电池的电量满足上述容量约束条件  $S_{low} \leq s(x) \leq S_{high}$   $x = m, m+1, \dots, N$ , 第 y ( $y = 1, 2, \dots, k$ ) 次放电时电池的电量满足上述容量约束  $S_{low} \leq s(x) \leq S_{high}$   $x = m, m+1, \dots, N$ , 并满足上述放电深度约束  $s(x) \geq DOD(y)$ ;

[0077] (4-2) 将从预测日一天的一个阶段的一个电池电量状态出发到达相邻下一阶段的任意一个电池电量状态记为一个决策,选择满足以下条件的决策作为可行决策:

[0078] 若从第 y ( $y = 1, 2, \dots, k$ ) 次充电时电量为  $s(x)$  的状态出发,到达第 y 次充电时电池电量大于或等于  $s(x)$  的状态,或到达第 y 次放电时电池电量小于  $s(x)$  的状态,且出发时状态的电池电量和到达时状态的电池电量之差的绝对值小于或等于电池的最大充放电功率限制值  $P_{max} \times \Delta t$ ,则该决策为可行决策;

[0079] 或:若从第 y 次放电时电池电量为  $s(x)$  的状态出发,到达第 y 次放电时电池电量小于或等于  $s(x)$  的状态,或到达第 y+1 次充电时电池电量大于  $s(x)$  的状态,且出发时状态的电池电量和到达时状态的电池电量之差的绝对值小于或等于电池的最大充放电功率限制值  $P_{max} \times \Delta t$ ,则该决策为可行决策;

[0080] (4-3) 根据动态规划算法中的递推方程,依次求解每个阶段每个状态的阶段性最优指标函数  $f(s(u))$ ,  $f(s(u)) = \min_{b(u) \in d(s(u))} \{f(s(u-1)) + v_u(b(u))\}$ ,由当前阶段向第 N 阶段推算,其中,  $s(u)$  为第预测日中的第 u 阶段的电池电量状态,  $d(s(u))$  是由  $s(u)$  确定的上述可行决策的集合,输出功率  $b(u)$  为第 u 阶段的决策变量,  $v_u(b(u)) = (r(u) + b(u))^2$  是第 u 阶段的阶段指标;记录每个阶段每个状态的最优决策,得到终值状态的阶段性最优指标函数  $f(s(N))$ ,即为电池储能系统削峰填谷实时优化模型的目标函数 f;从终值状态的最优决策开始根据每一阶段的最优决策依次向前类推,分别求解电池储能系统在各个时刻电池的电量  $s(x)$ ,  $x = m, m+1, \dots, N$ ,分别得到电池储能系统在各个时刻的输出功率  $b(x)$ ;

[0081] (5) 当电池处于持续充电或者持续放电时,对求解出的电池储能系统当前阶段的输出功率进行负荷平滑处理,处理方法为:对电池当前时刻的输出功率  $b(m)$  进行

调整,使得  $b(m) + r(m) \leq \max \left\{ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (b(m-i) + r(m-i)) + \Delta pload, r(m) - P_{max} \right\}$ , 并且

$$b(m) + r(m) \geq \min \left\{ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (b(m-i) + r(m-i)) - \Delta pload, r(m) + P_{\max} \right\}$$
, 其中,  $p$  为设定的预测日中测量时刻之前的阶段个数,  $\Delta pload$  为设定的负荷波动限制值。

[0082] 上面两式的作用是, 在电池输出功率限制  $P_{\max}$  允许的前提下, 使得充放电以后, 当前时刻的负荷值与之前  $p$  个时刻的负荷的平均值相差正负不超过  $\Delta pload$ , 目的是使得负荷曲线局部更加平滑。

[0083] 本发明提出的实时控制方法, 其原理是, 在预测日的每个时间段, 通过扩展短期负荷预测法更新预测负荷曲线, 采用动态规划算法, 求解含充放电次数限制和放电深度限制的电池储能系统实时优化问题, 通过成倍增加状态量来满足约束条件。本发明方法给出了电池储能系统削峰填谷实时控制方法, 可以减小日前负荷预测得到的预测曲线误差太大给削峰填谷带来的影响, 根据实时的电池电量值在线修正 BESS 充放电策略, 利于削峰填谷功能与 BESS 其他功能的兼容, 因为 BESS 在执行削峰填谷功能的同时, 还可能会进行系统调频、热备用等应用功能, 导致电池电量发生变化。

[0084] 以下介绍本发明方法的一个实施例: 一个电池储能系统削峰填谷实时控制仿真结果

[0085] 选择某天作为预测日, 采用电池储能系统所在的主变电站当天的负荷作为实时负荷, 如图 2 中曲线 2 所示。

[0086] 步骤 1: 预测日的历史相似日的平均负荷曲线如图 2 中的曲线 1 所示。  $\Delta t$  为 5 分钟,  $N = 288$ 。电池容量为  $20\text{MW} \cdot \text{h}$ , 最大充放电功率为  $5\text{MW}$ 。实时负荷数据的方差为 15.29。初始状态、终止状态和放电深度限制都为 0。

[0087] 步骤 2: 在每个时间段, 采用线性拟合分析法进行扩展短期负荷预测, 历史相似日负荷曲线数  $n$  取 25, 实时更新预测负荷曲线。

[0088] 步骤 3: 根据实时得到的电池电量、预测负荷曲线, 建立削峰填谷实时优化模型。

[0089] 步骤 4: 采用动态规划算法求解削峰填谷实时优化模型, 设定充放电次数限制值  $k$  取 3, 电池电量差  $\Delta s = 0.5\text{MW} \cdot 5\text{min}$ , 在预测日的每个阶段求出削峰填谷实时优化模型的最优解, 得到电池储能系统在各个时刻的输出功率  $b(x)$ 。

[0090] 步骤 5: 对求解出的电池储能系统当前阶段的输出功率进行负荷平滑处理,  $p$  取 5, 即将预测日中测量时刻之前的 5 个阶段的负荷平均值作为标准,  $\Delta pload$  取  $0.1\text{MW}$ , 即使得测量时刻的负荷值偏离标准不超过  $0.1\text{MW}$ , 将处理后的电池输出功率指令下发给电池储能系统中电力电子变流器, 实现对电池储能系统的实时控制。

[0091] 削峰填谷实时控制一天后的负荷曲线如图 3 中的曲线 1 所示, 方差为 4.01。可以看出, 尽管实时负荷曲线与历史平均负荷曲线相差较大, 采用提出的削峰填谷实时控制方法以后, 可以有效控制储能系统进行削峰填谷, 使负荷曲线变的平坦, 减小负荷曲线的方差, 且优化结果满足充放电次数要求和放电深度要求。

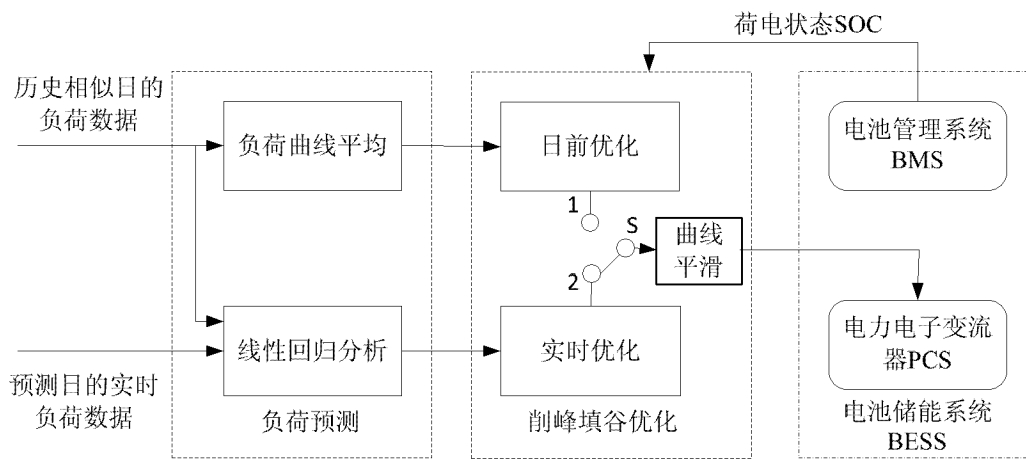


图 1

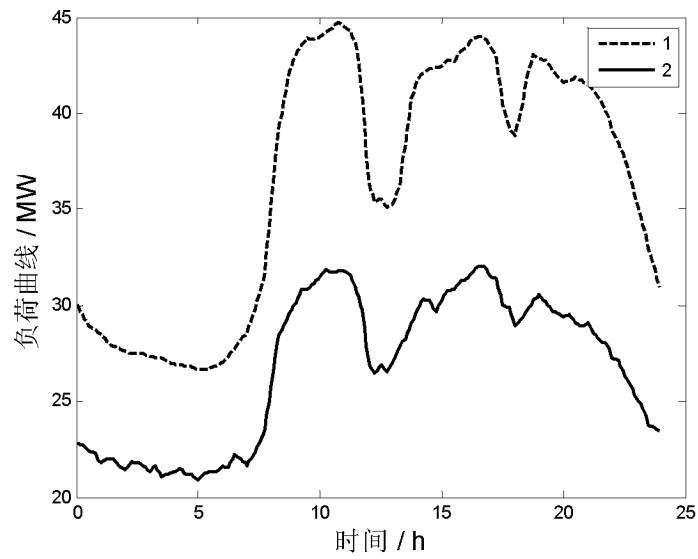


图 2

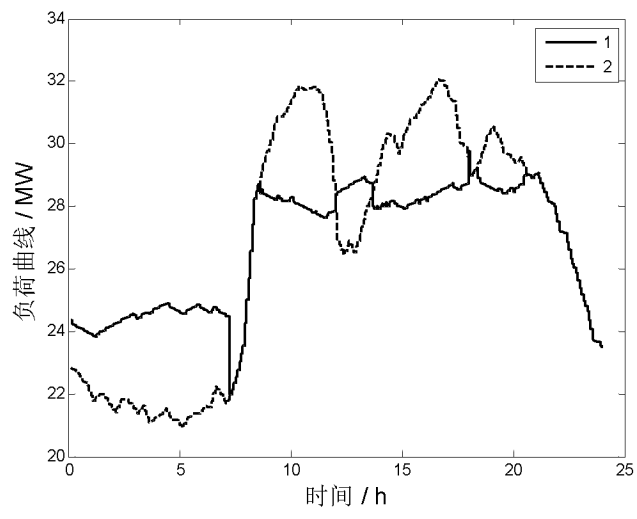


图 3