



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118589552 B

(45) 授权公告日 2024.12.03

(21) 申请号 202410495914.3

H02J 7/00 (2006.01)

(22) 申请日 2024.04.24

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 114335632 A, 2022.04.12

申请公布号 CN 118589552 A

CN 117261695 A, 2023.12.22

(43) 申请公布日 2024.09.03

审查员 林业伟

(73) 专利权人 青岛大学

地址 266071 山东省青岛市崂山区香港东路7号

(72) 发明人 田振龙 彭飞 姜帅 黄钦旺

(74) 专利代理机构 青岛智地领创专利代理有限公司 37252

专利代理师 冯昌进

(51) Int. Cl.

H02J 3/32 (2006.01)

H02J 3/00 (2006.01)

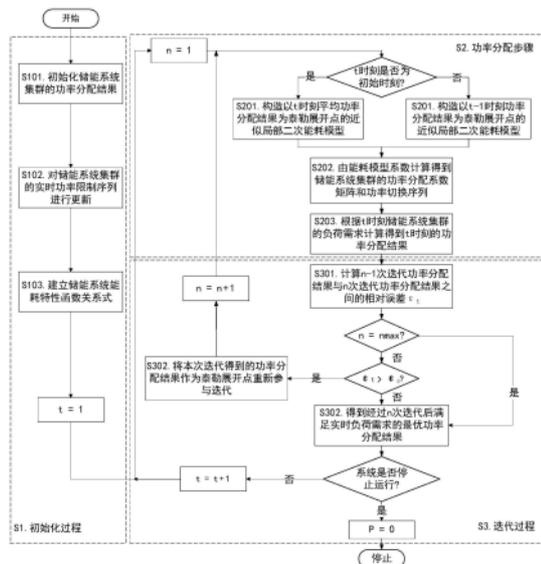
权利要求书7页 说明书17页 附图7页

(54) 发明名称

一种电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法

(57) 摘要

本发明公开一种电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法,属于储能系统优化控制领域,其步骤为:系统控制参量初始化及能耗特性建模,包括储能系统集群功率分配结果的初始化,储能系统集群实时功率限制序列的更新以及储能电池能耗特性模型和级联变换器特性曲线的建模;基于实时负荷需求对系统进行功率分配,分为充电功率分配和放电功率分配两种情况;基于迭代对储能系统集群实时功率分配结构进行最优化逼近。本发明采用基于迭代的能量管理策略,对实时功率分配结果进行优化,能够实现储能系统集群能耗经济方面的提升。



1. 一种电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、系统控制参量初始化及能耗特性建模,包括储能系统集群功率分配结果的初始化,储能系统集群实时功率限制序列的更新以及储能电池能耗特性模型和级联变换器特性曲线的建模;

S2、基于实时负荷需求对系统进行功率分配,分为充电功率分配和放电功率分配两种情况,具体步骤包括对储能系统能耗特性模型的局部二次降阶,计算储能系统集群的功率分配系数矩阵和功率切换序列,以及针对不同时刻负荷需求的大小进行功率分配;

S3、基于迭代对储能系统集群实时功率分配结构进行最优化逼近,具体步骤包括计算功率分配结果的相对误差,并判断是否需要功率分配结果进行迭代;

所述步骤S1包括以下步骤:

S101、针对储能系统集群之间的功率分配结果的初始化,采用平均功率分配方法,将单工况周期内的负荷需求除以储能系统集群中的储能系统数量,将负荷需求平均分配给每套储能系统作为储能系统集群的初始功率分配结果,如公式(1)所示:

$$P_{gross,1}^t = P_{gross,2}^t = \dots = P_{gross,m}^t = \frac{P_{d,t}}{m} \quad (1)$$

其中, $P_{d,t}$ 表示t时刻储能系统集群的负荷需求, $P_{gross,1}^t = P_{gross,2}^t = \dots = P_{gross,m}^t$ 表示针对t时刻的负荷需求各储能系统所应承担的负荷功率;

S102、根据t时刻各储能系统的SOC和RUL,对储能系统集群的功率限制序列进行更新,如公式(2)和(3)所示:

$$P_{net,t}^{\max} = E_m^t * Q^t * CR^{\max} - R_{dis}^t * (Q^t * CR^{\max})^2 \quad (2)$$

$$P_{net,t}^{\min} = -E_m^t * Q^t * CR^{\max} - R_{chg}^t * (Q^t * CR^{\max})^2 \quad (3)$$

其中, $P_{net,t}^{\max}$ 和 $P_{net,t}^{\min}$ 分别表示储能系统集群在t时刻的最大功率限制序列和最小功率限制序列; E_m^t 、 Q^t 、 R_{dis}^t 和 R_{chg}^t 分别表示储能系统集群在t时刻的开路电压,可用容量和放电、充电等效内阻,与各储能系统当前的SOC和RUL有关; CR^{\max} 表示储能系统集群的最大充放电倍率,为常数;

S103、首先,以Rint等效电路为基准建立储能电池等效模型,并通过泰勒级数展开,得到储能电池输出功率与净输出功率之间关系的能耗特性表达式,如公式(4)所示:

$$P_{gross} = c_1 P_{bat} + c_2 P_{bat}^2 + \dots + c_M P_{bat}^M = \sum_{\alpha=1}^M c_{\alpha} P_{bat}^{\alpha} \quad (4)$$

其中, P_{gross} 为储能电池不考虑损耗时的输出功率; P_{bat} 为储能电池减去损耗后的净输出功率,也即级联变换器的输入功率; c_{α} 表示储能电池等效模型以 $P_{bat}=0$ 为泰勒展开点的M次泰勒展开式的第 α 个系数,与储能电池当前的SOC、RUL及充放电状态有关;具体公式如下:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{E_m^2}{2R_v} \cdot \frac{1}{2} \\ c_2 = \frac{E_m^2}{2R_v} \cdot \frac{1}{4} \\ \vdots \\ c_M = \frac{E_m^2}{2R_v} \cdot \frac{(2m-3)!}{2^{2m-2} m!(m-2)!} \quad , \quad m > 1 \end{cases} \quad (5)$$

其次,选定Buck-Boost双向变换器作为储能系统的级联变换器,并根据级联变换器特性曲线,得到级联变换器输入功率与输出功率的高阶非线性拟合表达式,如公式(6)所示:

$$P_{bat} = d_0 + d_1 P_{net} + \dots + d_N P_{net}^N = \sum_{\beta=0}^N d_{\beta} P_{net}^{\beta} \quad (6)$$

其中, d_{β} 表示储能电池变换器模型的N次拟合多项式的第 β 个系数,与储能电池当前的SOC和充放电状态有关; P_{net} 为级联变换器的净输出功率;

最后,将储能电池与级联变换器的表达式结合起来,构成描述单套储能系统输出功率 P_{gross} 与净输出功率 P_{net} 之间关系的能耗特性模型,如公式(7)所示:

$$P_{gross} = e_0 + e_1 P_{net} + e_2 P_{net}^2 + \dots + e_{MN} P_{net}^{MN} = \sum_{\gamma=0}^{MN} e_{\gamma} P_{net}^{\gamma} \quad (7)$$

其中, e_{γ} 表示单套储能系统的M*N次能耗特性函数表达式的第 γ 个系数; e_{γ} 与公式(4)中 c_{α} 、公式(6)中 d_{β} 的关系如下:

$$\begin{cases} e_0 = c_1 d_0 + c_2 d_0^2 + \dots + c_M d_0^M \\ e_1 = c_1 d_1 \\ e_2 = c_1 d_2 + c_2 d_1^2 \\ \vdots \\ e_{MN} = c_M d_N^M \quad , \quad MN \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

2.根据权利要求1所述的一种电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法,其特征在于,所述步骤S2包括以下步骤:

S201、在能耗特性模型的基础上进行局部二次降阶,分别构造单套储能系统在t时刻的近似局部二次能耗充电和放电函数,如公式(9)所示:

$$\begin{cases} P_{gross,i}^t = a_{0,i}^t + a_{1,i}^t P_{net,i}^t + a_{2,i}^t P_{net,i}^t{}^2 \quad , \quad i = 1, 2, \dots, m \\ P_{gross,i}^t = b_{0,i}^t + b_{1,i}^t P_{net,i}^t + b_{2,i}^t P_{net,i}^t{}^2 \quad , \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (9)$$

其中, $a_{2,i}^t$ 、 $a_{1,i}^t$ 和 $a_{0,i}^t$ 是t时刻与SOC有关的第i套储能系统放电能耗函数模型的二次项系数、一次项系数和常数项系数; $b_{2,i}^t$ 、 $b_{1,i}^t$ 和 $b_{0,i}^t$ 是t时刻与SOC有关的第i套储能系统充电能耗函数模型的二次项系数、一次项系数和常数项系数;

上述系数根据不同时刻选取的泰勒展开点不同会有所差异,分为以下两种情况:

情况1,若处于初始时刻 $t=1$ 时,则以充放电模型以 $t=1$ 时刻的初始化功率平均分配结果作为泰勒展开点,并根据该时刻功率需求的正负采用不同的能耗函数,此时各系数表达式如公式(10)和(11)所示:

$$\begin{cases} a_{2,i}^1 = \frac{1}{2} f''(\overline{P_{net,i}^1}) \\ a_{1,i}^1 = f'(\overline{P_{net,i}^1}) - f''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} \\ a_{0,i}^1 = f(\overline{P_{net,i}^1}) - f'(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} + \frac{1}{2} f''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot (\overline{P_{net,i}^1})^2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} b_{2,i}^1 = \frac{1}{2} g''(\overline{P_{net,i}^1}) \\ b_{1,i}^1 = g'(\overline{P_{net,i}^1}) - g''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} \\ b_{0,i}^1 = g(\overline{P_{net,i}^1}) - g'(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} + \frac{1}{2} g''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot (\overline{P_{net,i}^1})^2 \end{cases} \quad (11)$$

情况2,若不处于初始时刻 $t=1$ 时,则以充放电模型以 $t-1$ 时刻的功率分配结果作为泰勒展开点,并根据该时刻功率需求的正负采用不同的能耗函数,此时各系数表达式如公式(12)和(13)所示:

$$\begin{cases} a_{2,i}^t = \frac{1}{2} f''(P_{net,i}^{t-1}) \\ a_{1,i}^t = f'(P_{net,i}^{t-1}) - f''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} \\ a_{0,i}^t = f(P_{net,i}^{t-1}) - f'(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} + \frac{1}{2} f''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot (P_{net,i}^{t-1})^2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} b_{2,i}^t = \frac{1}{2} g''(P_{net,i}^{t-1}) \\ b_{1,i}^t = g'(P_{net,i}^{t-1}) - g''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} \\ b_{0,i}^t = g(P_{net,i}^{t-1}) - g'(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} + \frac{1}{2} g''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot (P_{net,i}^{t-1})^2 \end{cases} \quad (13)$$

其中, f 、 f' 和 f'' 是放电时单套储能系统 P_{gross} 与 P_{net} 之间的关系式函数、一阶导函数和二阶导函数; g 、 g' 和 g'' 是充电时单套储能系统 P_{gross} 与 P_{net} 之间的关系式函数、一阶导函数和二阶导函数; $\overline{P_{net,i}^1}$ 为 $t=1$ 时刻的初始化功率平均分配结果,如公式(14)所示:

$$\overline{P_{net,i}^1} = \frac{P_{d,1}}{m}, \quad i=1,2,\dots,m \quad (14)$$

S202、计算储能系统集群内部的功率分配系数矩阵,如公式(15)所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} K^{DDS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & k_{1,m} \\ 0 & 0 & \cdots & k_{2,m-1} & k_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & k_{m-1,2} & \cdots & k_{m-1,m-1} & k_{m-1,m} \\ k_{m,1} & k_{m,2} & \cdots & k_{m,m-1} & k_{m,m} \end{bmatrix}, L^{DDS} = \begin{bmatrix} P_{net,1}^{max} & P_{net,1}^{max} & \cdots & P_{net,1}^{max} & l_{1,m} \\ P_{net,2}^{max} & P_{net,2}^{max} & \cdots & l_{2,m-1} & l_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{net,m-1}^{max} & l_{m-1,2} & \cdots & l_{m-1,m-1} & l_{m-1,m} \\ l_{m,1} & l_{m,2} & \cdots & l_{m,m-1} & l_{m,m} \end{bmatrix} \\ K^{DES} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & k_{1,m} \\ 0 & 0 & \cdots & k_{2,m-1} & k_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & k_{m-1,2} & \cdots & k_{m-1,m-1} & k_{m-1,m} \\ k_{m,1} & k_{m,2} & \cdots & k_{m,m-1} & k_{m,m} \end{bmatrix}, L^{DES} = \begin{bmatrix} P_{net,1}^{min} & P_{net,1}^{min} & \cdots & P_{net,1}^{min} & l_{1,m} \\ P_{net,2}^{min} & P_{net,2}^{min} & \cdots & l_{2,m-1} & l_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{net,m-1}^{min} & l_{m-1,2} & \cdots & l_{m-1,m-1} & l_{m-1,m} \\ l_{m,1} & l_{m,2} & \cdots & l_{m,m-1} & l_{m,m} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (15)$$

其中, K^{DDS} 和 L^{DDS} 分别表示与功率上限相关的储能系统集群功率分配一次项系数和常数项系数矩阵; K^{DES} 和 L^{DES} 分别表示与功率下限相关的储能系统集群功率分配一次项系数和常数项系数矩阵; 记 $k_{\rho,s}$ 和 $l_{\rho,s}$ 分别表示储能系统集群功率分配表达式中参与调控的第 ρ 套储能系统的一次项系数和常数项系数; 各系数表达式如式 (16) 所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{\rho,s} = \frac{A_{\rho}}{\omega_{\rho} \sum_{j=1}^m (A_j / \omega_j)} \\ l_{\rho,s} = \frac{A_{\rho} \sum_{j=1}^m (A_j (q_j - q_{\rho}) / \omega_j)}{2\omega_{\rho} \sum_{j=1}^m (A_j / \omega_j)} \end{array} \right. , \quad \rho = m-s+1, m-s+2, \dots, m; \quad s = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

其中, s 表示参与调控的储能系统的数量; m 表示储能系统集群中单套储能系统的数量; ω_{ρ} 表示调节各参与调控的储能系统SOC一致性的惩罚系数; A_{ρ} 和 q_{ρ} 分别表示各参与调控的单套储能系统充放电等效模型二次函数形式的二次项系数的倒数和一次项系数; ω_{ρ} 、 A_{ρ} 和 q_{ρ} 的表达式如式 (17) 和 (18) 所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{\rho} = \frac{1}{a_{2,\rho}}, \quad q_{\rho} = a_{1,\rho}; \quad \text{放电时} \\ A_{\rho} = \frac{1}{b_{2,\rho}}, \quad q_{\rho} = b_{1,\rho}; \quad \text{充电时} \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\omega_{\rho} = 1 - 2\mu \frac{SOC_{\rho} - 0.5(SOC_{HL} + SOC_{LL})}{SOC_{HL} - SOC_{LL}} \quad (18)$$

其中, μ 表示调节储能系统间一致性速度的常数; SOC_{HL} 和 SOC_{LL} 分别表示储能系统集群所设定的荷电状态上限和荷电状态下限; SOC_{ρ} 表示参与调控的第 ρ 套储能系统的荷电状态;

计算储能系统集群的功率切换序列; 首先, 对储能系统集群根据各单套储能系统自身性能的优劣确定各单套储能系统达到最大和最小功率限制的顺序, 如式 (19) 所示:

$$\begin{cases} P_{rank,i}^{\max} = \frac{P_{net,i}^{\max} - l_{i,m}}{k_{i,m}}, & i = 1, 2, \dots, m \\ P_{rank,i}^{\min} = \frac{P_{net,i}^{\min} - l_{i,m}}{k_{i,m}}, & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (19)$$

然后,将计算所得的 m 个 $P_{rank,i}^{\max}$ 和 m 个 $P_{rank,i}^{\min}$ 分别按升序和降序排列,得到各单套储能系统的最大功率限制顺序序列 $\{I_{rank,j}^{\max}\}$, $j = 1, 2, \dots, m$ 和最小功率限制顺序序列 $\{I_{rank,h}^{\min}\}$, $h = 1, 2, \dots, m$, h 与 j 的关系为 $h = m - j + 1$;

最后,根据所得最大功率限制顺序序列 $\{I_{rank,j}^{\max}\}$, $j = 1, 2, \dots, m$ 和最小功率限制顺序序列 $\{I_{rank,h}^{\min}\}$, $h = 1, 2, \dots, m$ 对应的储能系统集群的最大功率限制 $P_{net,j}^{\max}$, $j = 1, 2, \dots, m$ 和最小功率限制 $P_{net,h}^{\min}$, $h = 1, 2, \dots, m$ 进行排序后,计算得到相应各单套储能系统到达最大功率限制和降至最小功率限制时所对应的系统集群的负荷需求,即功率限制功率切换点,如式(20)所示:

$$\begin{cases} P_{Ind,j}^{\max} = \frac{P_{net,j}^{\max} - l_{i,m-j+1}}{k_{i,h}} + \sum_{i=1}^{j-1} P_{net,i}^{\max} \\ P_{Ind,h}^{\min} = \frac{P_{net,h}^{\min} - l_{i,h}}{k_{i,h}} + \sum_{i=h+1}^m P_{net,i}^{\min} \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad h = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

得到最大功率限制序列 $\{P_{Ind,j}^{\max}\}$, $j = 1, 2, \dots, m$ 和最小功率限制序列 $\{P_{Ind,h}^{\min}\}$, $h = 1, 2, \dots, m$;

S203、根据当前负荷需求的大小,储能系统集群的功率分配分为以下五种情况:

第一种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \leq P_{Ind,m}^{\min}$ 时,此时所有单套储能系统均未脱离自身的最小输出功率限制,均不参与功率调控,该时刻各单套储能系统的净输出功率如式(21)所示:

$$P_{net,i} = P_{net,i}^{\min}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

第二种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \in (P_{Ind,h'+1}^{\min}, P_{Ind,h'}^{\min})$, $h' = 1, 2, \dots, m-1$ 时,此时仍有部分储能系统未脱离自身的最小输出功率限制,该部分储能系统不参与功率调控,该时刻储能系统集群的功率分配满足式(22)所示关系:

$$P_{net}(I_{rank,h'}^{\min}) = K_{h'} [P_d - \sum_{\lambda=h'+1}^m P_{net,\lambda}^{\min}] + L_{h'}, \quad \lambda' = h' + 1, \dots, m \quad (22)$$

其中, $K_{h'}$ 和 $L_{h'}$ 分别表示参与调控的储能系统关于该时刻负荷需求的功率分配系数矩阵;具体形式如公式(23)和(24)所示:

$$K_{h'} = \begin{bmatrix} k_{1,h'} & k_{2,h'} & \cdots & k_{h'-1,h'} & k_{h',h'} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$L_{h'} = \begin{bmatrix} l_{1,h'} & l_{2,h'} & \cdots & l_{h'-1,h'} & l_{h',h'} \end{bmatrix} \quad (24)$$

此时,参与调控的各单套动力电池分配到的功率需求如公式(25)所示:

$$P_{net,i'} = k_{i',h'} P_d + l_{i',h'}, i' = 1, 2, \dots, h' \quad (25)$$

第三种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \in (P_{Ind,1}^{\min}, P_{Ind,1}^{\max})$ 时,此时所有单套储能系统均脱离自身的最小输出功率限制且未达到自身的最大输出功率限制,均参与功率调控,该时刻储能系统集群的功率分配满足式(26)所示关系:

$$P_{net}(I_{rank,h}^{\min}) = K_m P_d + L_m \quad (26)$$

其中, K_m 和 L_m 分别表示参与调控的储能系统关于该时刻负荷需求的功率分配系数矩阵;具体形式如公式(27)和(28)所示:

$$K_m = [k_{1,m} \ k_{2,m} \ \cdots \ k_{m-1,m} \ k_{m,m}] \quad (27)$$

$$L_m = [l_{1,m} \ l_{2,m} \ \cdots \ l_{m-1,m} \ l_{m,m}] \quad (28)$$

此时,参与调控的各单套动力电池分配到的功率需求如公式(29)所示:

$$P_{net,i} = k_{i,m} P_d + l_{i,m}, i = 1, 2, \dots, m \quad (29)$$

第四种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \in [P_{Ind,j'}^{\max}, P_{Ind,j'+1}^{\max}]$, $j' = 1, 2, \dots, m-1$ 时,此时只有部分储能系统达到自身的最大输出功率限制,该部分储能系统不参与功率调控,该时刻储能系统集群的功率分配满足式(30)所示关系:

$$P_{net}(I_{rank,j'}^{\max}) = K_{j'} [P_d - \sum_{\lambda^*=1}^{j'-1} P_{net,\lambda^*}^{\max}] + L_{j'}, \lambda^* = 1, \dots, j'-1 \quad (30)$$

其中, $K_{j'}$ 和 $L_{j'}$ 分别表示参与调控的储能系统关于该时刻负荷需求的功率分配系数矩阵;具体形式如公式(31)和(32)所示:

$$K_{j'} = [k_{j',m} \ k_{j'+1,m} \ \cdots \ k_{m-1,m} \ k_{m,m}] \quad (31)$$

$$L_{j'} = [l_{j',m} \ l_{j'+1,m} \ \cdots \ l_{m-1,m} \ l_{m,m}] \quad (32)$$

此时,参与调控的各单套动力电池分配到的功率需求如公式(33)所示:

$$P_{net,i''} = k_{i'',m} P_d + l_{i'',m}, i'' = j', j'+1, \dots, m \quad (33)$$

第五种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \geq P_{Ind,m}^{\max}$ 时,此时所有单套储能系统均达到自身的最大输出功率限制,均不参与功率调控,该时刻各单套储能系统的净输出功率如式(34)所示:

$$P_{net,i} = P_{net,i}^{\max}, i = 1, 2, \dots, m \quad (34)$$

3. 根据权利要求2所述的一种电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法,其特征在于,所述步骤S3包括以下步骤:

S301、根据t时刻是否为初始时刻,分为两种情况:

情况1,若t时刻为初始时刻,则计算t时刻更新后的功率分配结果与t时刻的平均功率分配结果之间的相对误差,如公式(35)所示:

$$\varepsilon_1^i = \left| \frac{P_{net,i}^t - P_{net,i}^t}{P_{net,i}^t} \right| \quad (35)$$

其中, ε_1^i 表示第 i 套储能系统在初始时刻的平均功率分配结果与初始时刻更新后的功率分配结果的差值除以初始时刻的平均功率分配结果取绝对值后得到的相对误差;

情况2, 若 t 时刻不为初始时刻, 则计算 t 时刻更新后的功率分配结果与 $t-1$ 时刻的最终功率分配结果之间的相对误差, 如公式 (36) 所示:

$$\varepsilon_t^i = \left| \frac{P_{net,i}^{t-1} - P_{net,i}^t}{P_{net,i}^{t-1}} \right| \quad (36)$$

其中, ε_t^i 表示第 i 套储能系统在 $t-1$ 时刻的最终功率分配结果与 t 时刻更新后的功率分配结果的差值除以 $t-1$ 时刻的最终功率分配结果得到的相对误差;

S302、判断 t 时刻更新后的功率分配结果是否满足设定条件;

若当前迭代次数 n 未达到设定的上限 n_{max} 且本次迭代储能系统集群功率分配的相对误差 $\{\varepsilon_t^i\}$ 序列存在部分储能系统的相对误差 ε_t^i 大于设定值 $\varepsilon_0 = 0.1\%$ 的情况, 则将 t 时刻更新后的功率分配结果代替 $t-1$ 时刻的最终功率分配结果或 t 时刻的平均功率分配结果, 返回 S201 步骤重新参与迭代, 直至各套储能系统的相对误差 ε_t^i 均不大于 ε_0 或该时刻的迭代次数已达到迭代次数上限 n_{max} ;

若当前迭代次数 n 未达到迭代次数上限 n_{max} , 各套储能系统的相对误差 ε_t^i 就已经都满足 $\varepsilon_t^i \leq \varepsilon_0$, 则将本次迭代得到的更新后的功率分配结果作为 t 时刻的最终功率分配结果; 若当前迭代次数 n 已达到迭代次数上限 n_{max} , 则将最后一次迭代得到的更新后的功率分配结果作为 t 时刻的最终功率分配结果;

最后, 若储能系统集群停止运行, 则所有储能系统的输出功率为零, 即 $P=0$ 。

一种电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法

技术领域

[0001] 本发明涉及储能系统性能优化控制领域,具体涉及一种电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法。

背景技术

[0002] 随着经济的不断发展,电力消费量也在逐年上升,而仅靠传统化石燃料发电会显著地增加电力系统的发电成本,其迫切地需要摆脱对传统化石燃料的依赖,风力发电和光伏发电作为电力系统实现能源结构转型的介质得到了一致认可。然而风力发电和光伏发电等技术受到气候条件、周遭环境和地理位置等因素的影响,其能量转换过程具有波动性和不确定性,这给电网的持续稳定运行带来了一定的挑战,从而制约了这类技术的大规模并网运行。而储能技术可以有效解决新能源发电在时间和空间上与电网之间的不匹配问题,从而有效地提高电网运行的稳定性和连续性。

[0003] 锂离子电池作为储能电池的代表,因其面对实际电网工况中快速变动的功率需求时优秀的动态响应速度以及与其他种类的储能电池相比更长的循环寿命和更高的能量密度等特点,受到了储能领域的青睐,从而带动了锂离子电池的需求量不断上升。然而,锂离子电池的能耗特性容易受到很多内在和外在因素的干扰,如温度,充放电工况波动情况,级联变换器的效率以及各电池组之间荷电状态的不一致性等。故如何在控制好干扰因素的前提下,尽可能地提高锂电池的能耗效率成为了储能电站系统领域的研究侧重点之一。

[0004] 由于在储能技术领域,大规模储能电站系统是由多套储能系统构成的,每套储能系统又由数百至数千个电池组成,这就导致储能系统集群的充放电功率极大,极大的充放电功率使储能系统集群对各储能系统间性能的一致性有着较高的要求。而因组成各储能系统的单体电池在性能上存在差异,储能系统之间势必存在不一致性,对储能系统集群的能耗效率和使用寿命造成巨大的影响。因此,制定合理的能量优化管理策略对改善储能系统间性能的不一致性从而提升储能系统集群的经济性和耐久性具有重要的意义。

发明内容

[0005] 为了解决上述问题,本发明针对电网实际运行过程中负荷需求的变化,以实时效率最优为目标提出了一种电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法,对储能系统集群进行优化控制管理,设计合理,解决了现有技术的不足,具有良好的效果。

[0006] 为了实现上述目的,本发明采取如下技术方案:

[0007] 一种电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法,包括以下步骤:

[0008] S1、系统控制参量初始化及能耗特性建模,包括储能系统集群功率分配结果的初始化,储能系统集群实时功率限制序列的更新以及储能电池能耗特性模型和级联变换器特性曲线的建模;

[0009] S2、基于实时负荷需求对系统进行功率分配,分为充电功率分配和放电功率分配两种情况,具体步骤包括对储能系统能耗特性模型的局部二次降阶,计算储能系统集群的

功率分配系数矩阵和功率切换序列,以及针对不同时刻负荷需求的大小进行功率分配;

[0010] S3、基于迭代对储能系统集群实时功率分配结构进行最优化逼近,具体步骤包括计算功率分配结果的相对误差,并判断是否需要功率分配结果进行迭代。

[0011] 进一步地,所述步骤S1包括以下步骤:

[0012] S101、针对储能系统集群之间的功率分配结果的初始化,采用平均功率分配方法,将单工况周期内的负荷需求除以储能系统集群中的储能系统数量,将负荷需求平均分配给每套储能系统作为储能系统集群的初始功率分配结果,如公式(1)所示:

$$[0013] \quad P_{gross,1}^t = P_{gross,2}^t = \dots = P_{gross,m}^t = \frac{P_{d,t}}{m} \quad (1)$$

[0014] 其中, $P_{d,t}$ 表示t时刻储能系统集群的负荷需求, $P_{gross,1}^t = P_{gross,2}^t = \dots = P_{gross,m}^t$ 表示针对t时刻的负荷需求各储能系统所应承担的负荷功率;

[0015] S102、根据t时刻各储能系统的SOC和RUL,对储能系统集群的功率限制序列进行更新,如公式(2)和(3)所示:

$$[0016] \quad P_{net,t}^{\max} = E_m^t * Q^t * CR^{\max} - R_{dis}^t * (Q^t * CR^{\max})^2 \quad (2)$$

$$[0017] \quad P_{net,t}^{\min} = -E_m^t * Q^t * CR^{\max} - R_{chg}^t * (Q^t * CR^{\max})^2 \quad (3)$$

[0018] 其中, $P_{net,t}^{\max}$ 和 $P_{net,t}^{\min}$ 分别表示储能系统集群在t时刻的最大功率限制序列和最小功率限制序列; E_m^t 、 Q^t 、 R_{dis}^t 和 R_{chg}^t 分别表示储能系统集群在t时刻的开路电压,可用容量和放电、充电等效内阻,与各储能系统当前的SOC和RUL有关; CR^{\max} 表示储能系统集群的最大充放电倍率,为常数;

[0019] S103、首先,以Rint等效电路为基准建立储能电池等效模型,并通过泰勒级数展开,得到储能电池输出功率与净输出功率之间关系的能耗特性表达式,如公式(4)所示:

$$[0020] \quad P_{gross} = c_1 P_{bat} + c_2 P_{bat}^2 + \dots + c_M P_{bat}^M = \sum_{\alpha=1}^M c_{\alpha} P_{bat}^{\alpha} \quad (4)$$

[0021] 其中, P_{gross} 为储能电池不考虑损耗时的输出功率; P_{bat} 为储能电池减去损耗后的净输出功率,也即级联变换器的输入功率; c_{α} 表示储能电池等效模型以 $P_{bat}=0$ 为泰勒展开点的M次泰勒展开式的第 α 个系数,与储能电池当前的SOC、RUL及充放电状态有关;具体公式如下:

$$[0022] \quad \begin{cases} c_1 = \frac{E_m^2}{2R_v} \cdot \frac{1}{2} \\ c_2 = \frac{E_m^2}{2R_v} \cdot \frac{1}{4} \\ \vdots \\ c_M = \frac{E_m^2}{2R_v} \cdot \frac{(2m-3)!}{2^{2m-2} m!(m-2)!} \quad , \quad m > 1 \end{cases} \quad (5)$$

[0023] 其次,选定Buck-Boost双向变换器作为储能系统的级联变换器,并根据级联变换器特性曲线,得到级联变换器输入功率与输出功率的高阶非线性拟合表达式,如公式(6)所示:

$$[0024] \quad P_{bat} = d_0 + d_1 P_{net} + \dots + d_N P_{net}^N = \sum_{\beta=0}^N d_{\beta} P_{net}^{\beta} \quad (6)$$

[0025] 其中, d_{β} 表示储能电池变换器模型的N次拟合多项式的第 β 个系数,与储能电池当前的SOC和充放电状态有关; P_{net} 为级联变换器的净输出功率;

[0026] 最后,将储能电池与级联变换器的表达式结合起来,构成描述单套储能系统输出功率 P_{gross} 与净输出功率 P_{net} 之间关系的能耗特性模型,如公式(7)所示:

$$[0027] \quad P_{gross} = e_0 + e_1 P_{net} + e_2 P_{net}^2 + \dots + e_{MN} P_{net}^{MN} = \sum_{\gamma=0}^{MN} e_{\gamma} P_{net}^{\gamma} \quad (7)$$

[0028] 其中, e_{γ} 表示单套储能系统的M*N次能耗特性函数表达式的第 γ 个系数; e_{γ} 与公式(4)中 c_{α} 、公式(6)中 d_{β} 的关系如下:

$$[0029] \quad \begin{cases} e_0 = c_1 d_0 + c_2 d_0^2 + \dots + c_M d_0^M \\ e_1 = c_1 d_1 \\ e_2 = c_1 d_2 + c_2 d_1^2 \\ \vdots \\ e_{MN} = c_M d_N^M, \quad MN \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

[0030] 进一步地,所述步骤S2包括以下步骤:

[0031] S201、在能耗特性模型的基础上进行局部二次降阶,分别构造单套储能系统在t时刻的近似局部二次能耗充电和放电函数,如公式(9)所示:

$$[0032] \quad \begin{cases} P_{gross,i}^t = a_{0,i}^t + a_{1,i}^t P_{net,i}^t + a_{2,i}^t P_{net,i}^t{}^2, & i = 1, 2, \dots, m \\ P_{gross,i}^t = b_{0,i}^t + b_{1,i}^t P_{net,i}^t + b_{2,i}^t P_{net,i}^t{}^2, & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (9)$$

[0033] 其中, $a_{2,i}^t$ 、 $a_{1,i}^t$ 和 $a_{0,i}^t$ 是t时刻与SOC有关的第i套储能系统放电能耗函数模型的二次项系数、一次项系数和常数项系数; $b_{2,i}^t$ 、 $b_{1,i}^t$ 和 $b_{0,i}^t$ 是t时刻与SOC有关的第i套储能系统充电能耗函数模型的二次项系数、一次项系数和常数项系数;

[0034] 上述系数根据不同时刻选取的泰勒展开点不同会有所差异,分为以下两种情况:

[0035] 情况1,若处于初始时刻 $t=1$ 时,则以充放电模型以 $t=1$ 时刻的初始化功率平均分配结果作为泰勒展开点,并根据该时刻功率需求的正负采用不同的能耗函数,此时各系数表达式如公式(10)和(11)所示:

$$[0036] \begin{cases} a_{2,i}^1 = \frac{1}{2} f''(\overline{P_{net,i}^1}) \\ a_{1,i}^1 = f'(\overline{P_{net,i}^1}) - f''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} \\ a_{0,i}^1 = f(\overline{P_{net,i}^1}) - f'(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} + \frac{1}{2} f''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot (\overline{P_{net,i}^1})^2 \end{cases} \quad (10)$$

$$[0037] \begin{cases} b_{2,i}^1 = \frac{1}{2} g''(\overline{P_{net,i}^1}) \\ b_{1,i}^1 = g'(\overline{P_{net,i}^1}) - g''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} \\ b_{0,i}^1 = g(\overline{P_{net,i}^1}) - g'(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} + \frac{1}{2} g''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot (\overline{P_{net,i}^1})^2 \end{cases} \quad (11)$$

[0038] 情况2,若不处于初始时刻 $t=1$ 时,则以充放电模型以 $t-1$ 时刻的功率分配结果作为泰勒展开点,并根据该时刻功率需求的正负采用不同的能耗函数,此时各系数表达式如公式(12)和(13)所示:

$$[0039] \begin{cases} a_{2,i}^t = \frac{1}{2} f''(P_{net,i}^{t-1}) \\ a_{1,i}^t = f'(P_{net,i}^{t-1}) - f''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} \\ a_{0,i}^t = f(P_{net,i}^{t-1}) - f'(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} + \frac{1}{2} f''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot (P_{net,i}^{t-1})^2 \end{cases} \quad (12)$$

$$[0040] \begin{cases} b_{2,i}^t = \frac{1}{2} g''(P_{net,i}^{t-1}) \\ b_{1,i}^t = g'(P_{net,i}^{t-1}) - g''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} \\ b_{0,i}^t = g(P_{net,i}^{t-1}) - g'(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} + \frac{1}{2} g''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot (P_{net,i}^{t-1})^2 \end{cases} \quad (13)$$

[0041] 其中, f 、 f' 和 f'' 是放电时单套储能系统 P_{gross} 与 P_{net} 之间的关系式函数、一阶导函数和二阶导函数; g 、 g' 和 g'' 是充电时单套储能系统 P_{gross} 与 P_{net} 之间的关系式函数、一阶导函数和二阶导函数; $\overline{P_{net,i}^1}$ 为 $t=1$ 时刻的初始化功率平均分配结果,如公式(14)所示:

$$[0042] \quad \overline{P_{net,i}^1} = \frac{P_{d,1}}{m}, \quad i=1,2,\dots,m \quad (14)$$

[0043] S202、计算储能系统集群内部的功率分配系数矩阵,如公式(15)所示:

$$[0044] \quad \left\{ \begin{array}{l} K^{DDS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & k_{1,m} \\ 0 & 0 & \cdots & k_{2,m-1} & k_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & k_{m-1,2} & \cdots & k_{m-1,m-1} & k_{m-1,m} \\ k_{m,1} & k_{m,2} & \cdots & k_{m,m-1} & k_{m,m} \end{bmatrix}, L^{DDS} = \begin{bmatrix} P_{net,1}^{max} & P_{net,1}^{max} & \cdots & P_{net,1}^{max} & l_{1,m} \\ P_{net,2}^{max} & P_{net,2}^{max} & \cdots & l_{2,m-1} & l_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{net,m-1}^{max} & l_{m-1,2} & \cdots & l_{m-1,m-1} & l_{m-1,m} \\ l_{m,1} & l_{m,2} & \cdots & l_{m,m-1} & l_{m,m} \end{bmatrix} \\ K^{DES} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & k_{1,m} \\ 0 & 0 & \cdots & k_{2,m-1} & k_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & k_{m-1,2} & \cdots & k_{m-1,m-1} & k_{m-1,m} \\ k_{m,1} & k_{m,2} & \cdots & k_{m,m-1} & k_{m,m} \end{bmatrix}, L^{DES} = \begin{bmatrix} P_{net,1}^{min} & P_{net,1}^{min} & \cdots & P_{net,1}^{min} & l_{1,m} \\ P_{net,2}^{min} & P_{net,2}^{min} & \cdots & l_{2,m-1} & l_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{net,m-1}^{min} & l_{m-1,2} & \cdots & l_{m-1,m-1} & l_{m-1,m} \\ l_{m,1} & l_{m,2} & \cdots & l_{m,m-1} & l_{m,m} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (15)$$

[0045] 其中, K^{DDS} 和 L^{DDS} 分别表示与功率上限相关的储能系统集群功率分配一次项系数和常数项系数矩阵; K^{DES} 和 L^{DES} 分别表示与功率下限相关的储能系统集群功率分配一次项系数和常数项系数矩阵; $k_{\rho,s}$ 和 $l_{\rho,s}$ 分别表示储能系统集群功率分配表达式中参与调控的第 ρ 套储能系统的一次项系数和常数项系数; 各系数表达式如式 (16) 所示:

$$[0046] \quad \left\{ \begin{array}{l} k_{i,s} = \frac{A_i}{\omega_i \sum_{j=1}^m (A_j / \omega_j)} \\ l_{i,s} = \frac{A_i \sum_{j=1}^m (A_j (q_j - q_i) / \omega_j)}{2\omega_i \sum_{j=1}^m (A_j / \omega_j)} \end{array} \right. , \quad i = m-s+1, m-s+2, \dots, m; \quad s = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

[0047] 其中, s 表示参与调控的储能系统的数量; m 表示储能系统集群中单套储能系统的数量; ω_ρ 表示调节各参与调控的储能系统 SOC 一致性的惩罚系数; A_ρ 和 q_ρ 分别表示各参与调控的单套储能系统充放电等效模型二次函数形式的二次项系数的倒数和一次项系数; ω_ρ 、 A_ρ 和 q_ρ 的表达式如式 (17) 和 (18) 所示:

$$[0048] \quad \left\{ \begin{array}{l} A_\rho = \frac{1}{a_{2,\rho}}, \quad q_\rho = a_{1,\rho}; \quad \text{放电时} \\ A_\rho = \frac{1}{b_{2,\rho}}, \quad q_\rho = b_{1,\rho}; \quad \text{充电时} \end{array} \right. \quad (17)$$

$$[0049] \quad \omega_\rho = 1 - 2\mu \frac{SOC_\rho - 0.5(SOC_{HL} + SOC_{LL})}{SOC_{HL} - SOC_{LL}} \quad (18)$$

[0050] 其中, μ 表示调节储能系统间一致性速度的常数; SOC_{HL} 和 SOC_{LL} 分别表示储能系统集群所设定的荷电状态上限和荷电状态下限; SOC_ρ 表示参与调控的第 ρ 套储能系统的荷电状态;

[0051] 计算储能系统集群的功率切换序列; 首先, 对储能系统集群根据各单套储能系统自身性能的优劣确定各单套储能系统达到最大和最小功率限制的顺序, 如式 (19) 所示:

$$[0052] \quad \begin{cases} P_{rank,i}^{\max} = \frac{P_{net,i}^{\max} - l_{i,m}}{k_{i,m}}, & i = 1, 2, \dots, m \\ P_{rank,i}^{\min} = \frac{P_{net,i}^{\min} - l_{i,m}}{k_{i,m}}, & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (19)$$

[0053] 然后,将计算所得的 m 个 $P_{rank,i}^{\max}$ 和 m 个 $P_{rank,i}^{\min}$ 分别按升序和降序排列,得到各单套储能系统的最大功率限制顺序序列 $\{I_{rank,j}^{\max}\}$, $j = 1, 2, \dots, m$ 和最小功率限制顺序序列 $\{I_{rank,h}^{\min}\}$, $h = 1, 2, \dots, m$, h 与 j 的关系为 $h = m - j + 1$;

[0054] 最后,根据所得最大功率限制顺序序列 $\{I_{rank,j}^{\max}\}$, $j = 1, 2, \dots, m$ 和最小功率限制顺序序列 $\{I_{rank,h}^{\min}\}$, $h = 1, 2, \dots, m$ 对应的储能系统集群的最大功率限制 $P_{net,j}^{\max}$, $j = 1, 2, \dots, m$ 和最小功率限制 $P_{net,h}^{\min}$, $h = 1, 2, \dots, m$ 进行排序后,计算得到相应各单套储能系统到达最大功率限制和降至最小功率限制时所对应的系统集群的负荷需求,即功率限制功率切换点,如式(20)所示:

$$[0055] \quad \begin{cases} P_{Ind,j}^{\max} = \frac{P_{net,j}^{\max} - l_{i,m-j+1}}{k_{m-j+1}} + \sum_{i=1}^{j-1} P_{net,i}^{\max} \\ P_{Ind,h}^{\min} = \frac{P_{net,h}^{\min} - l_{i,h}}{k_{i,h}} + \sum_{i=h+1}^m P_{net,i}^{\min} \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad h = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

[0056] 得到最大功率限制序列 $\{P_{Ind,j}^{\max}\}$, $j = 1, 2, \dots, m$ 和最小功率限制序列 $\{P_{Ind,h}^{\min}\}$, $h = 1, 2, \dots, m$;

[0057] S203、根据当前负荷需求的大小,储能系统集群的功率分配分为以下五种情况:

[0058] 第一种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \leq P_{Ind,m}^{\min}$ 时,此时所有单套储能系统均未脱离自身的最小输出功率限制,均不参与功率调控,该时刻各单套储能系统的净输出功率如式(21)所示:

$$[0059] \quad P_{net,i} = P_{net,i}^{\min}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

[0060] 第二种情况,当储能系统集群的负荷需求

$P_d \in (P_{Ind,h'+1}^{\min}, P_{Ind,h'}^{\min})$, $h' = 1, 2, \dots, m-1$ 时,此时仍有部分储能系统未脱离自身的最小输出功率限制,该部分储能系统不参与功率调控,该时刻储能系统集群的功率分配满足式(22)所示关系:

$$[0061] \quad P_{net}(I_{rank,h'}^{\min}) = K_{h'} [P_d - \sum_{\lambda'=h'+1}^m P_{net,\lambda'}^{\min}] + L_{h'}, \quad \lambda' = h' + 1, \dots, m \quad (22)$$

[0062] 其中, $K_{h'}$ 和 $L_{h'}$ 分别表示参与调控的储能系统关于该时刻负荷需求的功率分配系数矩阵;具体形式如公式(23)和(24)所示:

[0063] $K_{h'} = [k_{1,h'}, k_{2,h'} \cdots k_{h'-1,h'} k_{h',h'}]$ (23)

[0064] $L_{h'} = [l_{1,h'}, l_{2,h'} \cdots l_{h'-1,h'} l_{h',h'}]$ (24)

[0065] 此时,参与调控的各单套动力电池分配到的功率需求如公式(25)所示:

[0066] $P_{net,i'} = k_{i',h'} P_d + l_{i',h'}, i = 1, 2, \cdots, h$ (25)

[0067] 第三种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \in (P_{Ind,1}^{\min}, P_{Ind,1}^{\max})$ 时,此时所有单套储能系统均脱离自身的最小输出功率限制且未达到自身的最大输出功率限制,均参与功率调控,该时刻储能系统集群的功率分配满足式(26)所示关系:

[0068] $P_{net}(I_{rank,h}^{\min}) = K_m P_d + L_m$ (26)

[0069] 其中, K_m 和 L_m 分别表示参与调控的储能系统关于该时刻负荷需求的功率分配系数矩阵;具体形式如公式(27)和(28)所示:

[0070] $K_m = [k_{1,m} k_{2,m} \cdots k_{m-1,m} k_{m,m}]$ (27)

[0071] $L_m = [l_{1,m} l_{2,m} \cdots l_{m-1,m} l_{m,m}]$ (28)

[0072] 此时,参与调控的各单套动力电池分配到的功率需求如公式(29)所示:

[0073] $P_{net,i} = k_{i,m} P_d + l_{i,m}, i = 1, 2, \cdots, m$ (29)

[0074] 第四种情况,当储能系统集群的负荷需求

$P_d \in [P_{Ind,j'}^{\max}, P_{Ind,j'+1}^{\max}]$, $j' = 1, 2, \cdots, m-1$ 时,此时只有部分储能系统达到自身的最大输出功率限制,该部分储能系统不参与功率调控,该时刻储能系统集群的功率分配满足式(30)所示关系:

[0075] $P_{net}(I_{rank,j'}^{\max}) = K_{j'} [P_d - \sum_{\lambda'=1}^{j'-1} P_{net,\lambda'}^{\max}] + L_{j'}, \lambda' = 1, \cdots, j'-1$ (30)

[0076] 其中, $K_{j'}$ 和 $L_{j'}$ 分别表示参与调控的储能系统关于该时刻负荷需求的功率分配系数矩阵;具体形式如公式(31)和(32)所示:

[0077] $K_{j'} = [k_{j',m} k_{j'+1,m} \cdots k_{m-1,m} k_{m,m}]$ (31)

[0078] $L_{j'} = [l_{j',m} l_{j'+1,m} \cdots l_{m-1,m} l_{m,m}]$ (32)

[0079] 此时,参与调控的各单套动力电池分配到的功率需求如公式(33)所示:

[0080] $P_{net,i''} = k_{i'',m} P_d + l_{i'',m}, i = j, j+1, \cdots, m$ (33)

[0081] 第五种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \geq P_{Ind,m}^{\max}$ 时,此时所有单套储能系统均达到自身的最大输出功率限制,均不参与功率调控,该时刻各单套储能系统的净输出功率如式(34)所示:

[0082] $P_{net,i} = P_{net,i}^{\max}, i = 1, 2, \dots, m$ (34)。

[0083] 进一步地,所述步骤S3包括以下步骤:

[0084] S301、根据t时刻是否为初始时刻,分为两种情况:

[0085] 情况1,若t时刻为初始时刻,则计算t时刻更新后的功率分配结果与t时刻的平均功率分配结果之间的相对误差,如公式(35)所示:

$$[0086] \quad \varepsilon_i^t = \left| \frac{\overline{P_{net,i}^t} - P_{net,i}^t}{P_{net,i}^t} \right| \quad (35)$$

[0087] 其中, ε_i^t 表示第 i 套储能系统在 t 时刻的平均功率分配结果与 t 时刻更新后的功率分配结果的差值除以 t 时刻的平均功率分配结果取绝对值后得到的相对误差;

[0088] 情况 2, 若 t 时刻不为初始时刻, 则计算 t 时刻更新后的功率分配结果与 t-1 时刻的最终功率分配结果之间的相对误差, 如公式 (36) 所示:

$$[0089] \quad \varepsilon_t^i = \left| \frac{P_{net,i}^{t-1} - P_{net,i}^t}{P_{net,i}^{t-1}} \right| \quad (36)$$

[0090] 其中, ε_i^t 表示第 i 套储能系统在 t-1 时刻的最终功率分配结果与 t 时刻更新后的功率分配结果的差值除以 t-1 时刻的最终功率分配结果得到的相对误差;

[0091] S302、判断 t 时刻更新后的功率分配结果是否满足设定条件;

[0092] 若当前迭代次数 n 未达到设定的上限 n_{max} 且本次迭代储能系统集群功率分配的相对误差 $\{\varepsilon_i^t\}$ 序列存在部分储能系统的相对误差 ε_t 大于设定值 ε_0 ($\varepsilon_0 = 0.1\%$) 的情况, 则将 t 时刻更新后的功率分配结果代替 t-1 时刻的最终功率分配结果或 t 时刻的平均功率分配结果, 返回 S201 步骤重新参与迭代, 直至各套储能系统的相对误差 ε_t 均不大于 ε_0 或该时刻的迭代次数已达到迭代次数上限 n_{max} ;

[0093] 若当前迭代次数 n 未达到迭代次数上限 n_{max} , 各套储能系统的相对误差 ε_t 就已经都满足 $\varepsilon_t \leq \varepsilon_0$, 则将本次迭代得到的更新后的功率分配结果作为 t 时刻的最终功率分配结果; 若当前迭代次数 n 已达到迭代次数上限 n_{max} , 则将最后一次迭代得到的更新后的功率分配结果作为 t 时刻的最终功率分配结果;

[0094] 最后, 若储能系统集群停止运行, 则所有储能系统的输出功率为零, 即 $P=0$ 。

[0095] 本发明所带来的有益技术效果:

[0096] 相较于已有的储能系统集群能量管理策略, 本发明综合考虑储能系统间的性能差异对所述储能系统集群能耗特性的影响, 对储能系统集群进行了更为合理的实时电网负荷需求的分配, 优化了储能系统集群的实时效率的同时平衡了各储能系统间 SOC 的一致性, 从而实现储能系统集群能耗经济性的提升。

附图说明

[0097] 图 1 为本发明提供的电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法的整体流程图;

[0098] 图 2 为本发明提供的初始化过程的详细流程图;

[0099] 图 3 为本发明提供的基于实时负荷需求对系统进行功率分配的详细流程图;

[0100] 图 4 为本发明提供的根据功率需求与功率切换点之间的比较进行功率分配的详细流程图;

[0101] 图 5 为本发明提供的基于迭代对储能系统集群实时功率分配结果进行最优化逼近

的详细流程图；

[0102] 图6为实施例1提供的放电过程中分配功率随系统总功率需求变化图；

[0103] 图7为实施例1提供的充电过程中分配功率随系统总功率需求变化图；

具体实施方式

[0104] 下面结合附图和具体实施例对本发明的具体实施方式做进一步说明：

[0105] 一种电池储能系统集群实时效率最优能量管理方法，如图1所示，包括以下步骤：

[0106] S1、系统控制参量初始化及能耗特性建模，包括储能系统集群功率分配结果的初始化，储能系统集群实时功率限制序列的更新以及储能电池能耗特性模型和级联变换器特性曲线的建模；

[0107] 如图2所示，步骤S1包括以下步骤：

[0108] S101、针对储能系统集群之间的功率分配结果的初始化，采用平均功率分配方法，将单工况周期内的负荷需求除以储能系统集群中的储能系统数量，将负荷需求平均分配给每套储能系统作为储能系统集群的初始功率分配结果，如公式(1)所示：

$$[0109] \quad P_{gross,1}^t = P_{gross,2}^t = \dots = P_{gross,m}^t = \frac{P_{d,t}}{m} \quad (1)$$

[0110] 其中， $P_{d,t}$ 表示t时刻储能系统集群的负荷需求， $P_{gross,1}^t = P_{gross,2}^t = \dots = P_{gross,m}^t$ 表示针对t时刻的负荷需求各储能系统所应承担的负荷功率；

[0111] S102、根据t时刻各储能系统的SOC和RUL，对储能系统集群的功率限制序列进行更新，如公式(2)和(3)所示：

$$[0112] \quad P_{net,t}^{\max} = E_m^t * Q^t * CR^{\max} - R_{dis}^t * (Q^t * CR^{\max})^2 \quad (2)$$

$$[0113] \quad P_{net,t}^{\min} = -E_m^t * Q^t * CR^{\max} - R_{chg}^t * (Q^t * CR^{\max})^2 \quad (3)$$

[0114] 其中， $P_{net,t}^{\max}$ 和 $P_{net,t}^{\min}$ 分别表示储能系统集群在t时刻的最大功率限制序列和最小功率限制序列； E_m^t 、 Q^t 、 R_{dis}^t 和 R_{chg}^t 分别表示储能系统集群在t时刻的开路电压，可用容量和放电、充电等效内阻，与各储能系统当前的SOC和RUL有关； CR^{\max} 表示储能系统集群的最大充放电倍率，为常数。

[0115] S103、首先，以 R_{int} 等效电路为基准建立储能电池等效模型，并通过泰勒级数展开，得到储能电池输出功率与净输出功率之间关系的能耗特性表达式，如公式(4)所示：

$$[0116] \quad P_{gross} = c_1 P_{bat} + c_2 P_{bat}^2 + \dots + c_M P_{bat}^M = \sum_{\alpha=1}^M c_{\alpha} P_{bat}^{\alpha} \quad (4)$$

[0117] 其中， P_{gross} 为储能电池不考虑损耗时的输出功率； P_{bat} 为储能电池减去损耗后的净输出功率，也即级联变换器的输入功率； c_{α} 表示储能电池等效模型以 $P_{bat}=0$ 为泰勒展开点的M次泰勒展开式的第 α 个系数，与储能电池当前的SOC、RUL及充放电状态有关；具体公式如下：

$$[0118] \quad \begin{cases} c_1 = \frac{E_m^2}{2R_v} \cdot \frac{1}{2} \\ c_2 = \frac{E_m^2}{2R_v} \cdot \frac{1}{4} \\ \vdots \\ c_M = \frac{E_m^2}{2R_v} \cdot \frac{(2m-3)!}{2^{2m-2} m!(m-2)!} \quad , \quad m > 1 \end{cases} \quad (5)$$

[0119] 其次,选定Buck-Boost双向变换器作为储能系统的级联变换器,并根据级联变换器特性曲线,得到级联变换器输入功率与输出功率的高阶非线性拟合表达式,如公式(6)所示:

$$[0120] \quad P_{bat} = d_0 + d_1 P_{net} + \dots + d_N P_{net}^N = \sum_{\beta=0}^N d_{\beta} P_{net}^{\beta} \quad (6)$$

[0121] 其中, d_{β} 表示储能电池变换器模型的N次拟合多项式的第 β 个系数,与储能电池当前的SOC和充放电状态有关; P_{net} 为级联变换器的净输出功率;

[0122] 最后,将储能电池与级联变换器的表达式结合起来,构成描述单套储能系统输出功率 P_{gross} 与净输出功率 P_{net} 之间关系的能耗特性模型,如公式(7)所示:

$$[0123] \quad P_{gross} = e_0 + e_1 P_{net} + e_2 P_{net}^2 + \dots + e_{MN} P_{net}^{MN} = \sum_{\gamma=0}^{MN} e_{\gamma} P_{net}^{\gamma} \quad (7)$$

[0124] 其中, e_{γ} 表示单套储能系统的M*N次能耗特性函数表达式的第 γ 个系数; e_{γ} 与公式(4)中 c_{α} 、公式(6)中 d_{β} 的关系如下:

$$[0125] \quad \begin{cases} e_0 = c_1 d_0 + c_2 d_0^2 + \dots + c_M d_0^M \\ e_1 = c_1 d_1 \\ e_2 = c_1 d_2 + c_2 d_1^2 \\ \vdots \\ e_{MN} = c_M d_N^M \quad , \quad MN \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

[0126] S2、基于实时负荷需求对系统进行功率分配,分为充电功率分配和放电功率分配两种情况,具体步骤包括对储能系统能耗特性函数的局部二次降阶,计算储能系统集群的功率分配系数矩阵和功率切换序列,以及针对不同时刻负荷需求的大小进行功率分配;

[0127] 如图3所示,步骤S2包括以下步骤:

[0128] S201、因步骤S1中构建的单套储能系统能耗特性模型结构复杂,具有高度非线性和强耦合性的特点,故在原模型的基础上进行局部二次降阶,分别构造单套储能系统在t时刻的近似局部二次能耗充电和放电函数,如公式(9)所示:

$$[0129] \quad \begin{cases} P_{gross,i}^t = a_{0,i}^t + a_{1,i}^t P_{net,i}^t + a_{2,i}^t P_{net,i}^{t^2} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, m \\ P_{gross,i}^t = b_{0,i}^t + b_{1,i}^t P_{net,i}^t + b_{2,i}^t P_{net,i}^{t^2} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (9)$$

[0130] 其中, $a'_{2,i}$ 、 $a'_{1,i}$ 和 $a'_{0,i}$ 是在t时刻与SOC有关的第i套储能系统放电能耗函数模型的二次项系数、一次项系数和常数项系数; $b'_{2,i}$ 、 $b'_{1,i}$ 和 $b'_{0,i}$ 是在t时刻与SOC有关的第i套储能系统充电能耗函数模型的二次项系数、一次项系数和常数项系数;

[0131] 上述系数根据不同时刻选取的泰勒展开点不同会有所差异,分为以下两种情况:

[0132] 情况1,若处于初始时刻 $t=1$ 时,则以充放电模型以 $t=1$ 时刻的初始化功率平均分配结果作为泰勒展开点,并根据该时刻功率需求的正负采用不同的能耗函数,此时各系数表达式如公式(10)和(11)所示:

$$[0133] \begin{cases} a_{2,i}^1 = \frac{1}{2} f''(\overline{P_{net,i}^1}) \\ a_{1,i}^1 = f'(\overline{P_{net,i}^1}) - f''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} \\ a_{0,i}^1 = f(\overline{P_{net,i}^1}) - f'(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} + \frac{1}{2} f''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot (\overline{P_{net,i}^1})^2 \end{cases} \quad (10)$$

$$[0134] \begin{cases} b_{2,i}^1 = \frac{1}{2} g''(\overline{P_{net,i}^1}) \\ b_{1,i}^1 = g'(\overline{P_{net,i}^1}) - g''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} \\ b_{0,i}^1 = g(\overline{P_{net,i}^1}) - g'(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot \overline{P_{net,i}^1} + \frac{1}{2} g''(\overline{P_{net,i}^1}) \cdot (\overline{P_{net,i}^1})^2 \end{cases} \quad (11)$$

[0135] 情况2,若不处于初始时刻 $t=1$ 时,则以充放电模型以 $t-1$ 时刻的功率分配结果作为泰勒展开点,并根据该时刻功率需求的正负采用不同的能耗函数,此时各系数表达式如公式(12)和(13)所示:

$$[0136] \begin{cases} a_{2,i}^t = \frac{1}{2} f''(P_{net,i}^{t-1}) \\ a_{1,i}^t = f'(P_{net,i}^{t-1}) - f''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} \\ a_{0,i}^t = f(P_{net,i}^{t-1}) - f'(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} + \frac{1}{2} f''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot (P_{net,i}^{t-1})^2 \end{cases} \quad (12)$$

$$[0137] \begin{cases} b_{2,i}^t = \frac{1}{2} g''(P_{net,i}^{t-1}) \\ b_{1,i}^t = g'(P_{net,i}^{t-1}) - g''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} \\ b_{0,i}^t = g(P_{net,i}^{t-1}) - g'(P_{net,i}^{t-1}) \cdot P_{net,i}^{t-1} + \frac{1}{2} g''(P_{net,i}^{t-1}) \cdot (P_{net,i}^{t-1})^2 \end{cases} \quad (13)$$

[0138] 其中, f 、 f' 和 f'' 是放电时单套储能系统 P_{gross} 与 P_{net} 之间的关系式函数、一阶导函数和二阶导函数; g 、 g' 和 g'' 是充电时单套储能系统 P_{gross} 与 P_{net} 之间的关系式函数、一阶导函数和二阶导函数; $\overline{P_{net,i}^1}$ 为 $t=1$ 时刻的初始化功率平均分配结果,如公式(14)所示:

$$[0139] \quad \overline{P_{net,i}^1} = \frac{P_{d,1}}{m}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

[0140] S202、计算储能系统集群内部的功率分配系数矩阵,如公式(15)所示:

$$[0141] \quad \left\{ \begin{array}{l} K^{DDS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & k_{1,m} \\ 0 & 0 & \dots & k_{2,m-1} & k_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & k_{m-1,2} & \dots & k_{m-1,m-1} & k_{m-1,m} \\ k_{m,1} & k_{m,2} & \dots & k_{m,m-1} & k_{m,m} \end{bmatrix}, L^{DDS} = \begin{bmatrix} P_{net,1}^{\max} & P_{net,1}^{\max} & \dots & P_{net,1}^{\max} & l_{1,m} \\ P_{net,2}^{\max} & P_{net,2}^{\max} & \dots & l_{2,m-1} & l_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{net,m-1}^{\max} & l_{m-1,2} & \dots & l_{m-1,m-1} & l_{m-1,m} \\ l_{m,1} & l_{m,2} & \dots & l_{m,m-1} & l_{m,m} \end{bmatrix} \\ K^{DES} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & k_{1,m} \\ 0 & 0 & \dots & k_{2,m-1} & k_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & k_{m-1,2} & \dots & k_{m-1,m-1} & k_{m-1,m} \\ k_{m,1} & k_{m,2} & \dots & k_{m,m-1} & k_{m,m} \end{bmatrix}, L^{DES} = \begin{bmatrix} P_{net,1}^{\min} & P_{net,1}^{\min} & \dots & P_{net,1}^{\min} & l_{1,m} \\ P_{net,2}^{\min} & P_{net,2}^{\min} & \dots & l_{2,m-1} & l_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{net,m-1}^{\min} & l_{m-1,2} & \dots & l_{m-1,m-1} & l_{m-1,m} \\ l_{m,1} & l_{m,2} & \dots & l_{m,m-1} & l_{m,m} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (15)$$

[0142] 其中, K^{DDS} 和 L^{DDS} 分别表示与功率上限相关的储能系统集群功率分配一次项系数和常数项系数矩阵; K^{DES} 和 L^{DES} 分别表示与功率下限相关的储能系统集群功率分配一次项系数和常数项系数矩阵; $k_{\rho,s}$ 和 $l_{\rho,s}$ 分别表示储能系统集群功率分配表达式中参与调控的第 ρ 套储能系统的一次项系数和常数项系数;各系数表达式如式(16)所示:

$$[0143] \quad \left\{ \begin{array}{l} k_{i,s} = \frac{A_i}{\omega_i \sum_{j=1}^m (A_j / \omega_j)} \\ l_{i,s} = \frac{A_i \sum_{j=1}^m (A_j (q_j - q_i) / \omega_j)}{2\omega_i \sum_{j=1}^m (A_j / \omega_j)} \end{array} \right. , \quad i = m-s+1, m-s+2, \dots, m; \quad s = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

[0144] 其中, s 表示参与调控的储能系统的数量; m 表示储能系统集群中单套储能系统的数量; ω_ρ 表示调节各参与调控的储能系统SOC一致性的惩罚系数; A_ρ 和 q_ρ 分别表示各参与调控的单套储能系统充放电等效模型二次函数形式的二次项系数的倒数和一次项系数; ω_ρ 、 A_ρ 和 q_ρ 的表达式如式(17)和(18)所示:

$$[0145] \quad \left\{ \begin{array}{l} A_\rho = \frac{1}{a_{2,\rho}}, \quad q_\rho = a_{1,\rho}; \quad \text{放电时} \\ A_\rho = \frac{1}{b_{2,\rho}}, \quad q_\rho = b_{1,\rho}; \quad \text{充电时} \end{array} \right. \quad (17)$$

$$[0146] \quad \omega_\rho = 1 - 2\mu \frac{SOC_\rho - 0.5(SOC_{HL} + SOC_{LL})}{SOC_{HL} - SOC_{LL}} \quad (18)$$

[0147] 其中, μ 表示调节储能系统间一致性速度的常数; SOC_{HL} 和 SOC_{LL} 分别表示储能系统集群所设定的荷电状态上限和荷电状态下限; SOC_ρ 表示参与调控的第 ρ 套储能系统的荷电状态;

[0148] 计算储能系统集群的功率切换序列;首先,对储能系统集群根据各单套储能系统自身性能的优劣确定各单套储能系统达到最大和最小功率限制的顺序,如式(19)所示:

$$[0149] \quad \begin{cases} P_{rank,i}^{\max} = \frac{P_{net,i}^{\max} - l_{i,m}}{k_{i,m}}, & i = 1, 2, \dots, m \\ P_{rank,i}^{\min} = \frac{P_{net,i}^{\min} - l_{i,m}}{k_{i,m}}, & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (19)$$

[0150] 然后,将计算所得的 m 个 $P_{rank,i}^{\max}$ 和 m 个 $P_{rank,i}^{\min}$ 分别按升序和降序排列,得到各单套储能系统的最大功率限制顺序序列 $\{I_{rank,j}^{\max}\}(j=1,2,\dots,m)$ 和最小功率限制顺序序列 $\{I_{rank,h}^{\min}\}(h=1,2,\dots,m)$, h 与 j 的关系为 $h=m-j+1$;

[0151] 最后,根据所得最大功率限制顺序序列 $\{I_{rank,j}^{\max}\}(j=1,2,\dots,m)$ 和最小功率限制顺序序列 $\{I_{rank,h}^{\min}\}(h=1,2,\dots,m)$ 对应的储能系统集群的最大功率限制 $P_{net,j}^{\max}(j=1,2,\dots,m)$ 和最小功率限制 $P_{net,h}^{\min}(h=1,2,\dots,m)$ 进行排序后,计算得到相应各单套储能系统到达最大功率限制和降至最小功率限制时所对应的系统集群的负荷需求,即功率限制功率切换点,如式(20)所示:

$$[0152] \quad \begin{cases} P_{Ind,j}^{\max} = \frac{P_{net,j}^{\max} - l_{i,m-j+1}}{k_{m-j+1}} + \sum_{i=1}^{j-1} P_{net,i}^{\max} \\ P_{Ind,h}^{\min} = \frac{P_{net,h}^{\min} - l_{i,h}}{k_{i,h}} + \sum_{i=h+1}^m P_{net,i}^{\min} \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad h = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

[0153] 得到最大功率限制序列 $\{P_{Ind,j}^{\max}\}, j=1,2,\dots,m$ 和最小功率限制序列 $\{P_{Ind,h}^{\min}\}, h=1,2,\dots,m$;

[0154] S203、根据当前负荷需求的大小,储能系统集群的功率分配分为以下五种情况:

[0155] 第一种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \leq P_{Ind,m}^{\min}$ 时,此时所有单套储能系统均未脱离自身的最小输出功率限制,均不参与功率调控,该时刻各单套储能系统的净输出功率如式(21)所示:

$$[0156] \quad P_{net,i} = P_{net,i}^{\min}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

[0157] 第二种情况,当储能系统集群的负荷需求

$P_d \in (P_{Ind,h'+1}^{\min}, P_{Ind,h'}^{\min})$, $h' = 1, 2, \dots, m-1$ 时,此时仍有部分储能系统未脱离自身的最小输出功率限制,该部分储能系统不参与功率调控,该时刻储能系统集群的功率分配满足式(22)所示关系:

$$[0158] \quad P_{net}(I_{rank,h'}^{\min}) = K_{h'} [P_d - \sum_{\lambda'=h'+1}^m P_{net,\lambda'}^{\min}] + L_{h'}, \quad \lambda' = h'+1, \dots, m \quad (22)$$

[0159] 其中, $K_{h'}$ 和 $L_{h'}$ 分别表示参与调控的储能系统关于该时刻负荷需求的功率分配系数矩阵;具体形式如公式(23)和(24)所示:

[0160] $K_h = [k_{1,h}, k_{2,h}, \dots, k_{h-1,h}, k_{h,h}]$ (23)

[0161] $L_h = [l_{1,h}, l_{2,h}, \dots, l_{h-1,h}, l_{h,h}]$ (24)

[0162] 此时,参与调控的各单套动力电池分配到的功率需求如公式(25)所示:

[0163] $P_{net,i} = k_{i,h} P_d + l_{i,h}, i = 1, 2, \dots, h$ (25)

[0164] 第三种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \in (P_{Ind,1}^{\min}, P_{Ind,1}^{\max})$ 时,此时所有单套储能系统均脱离自身的最小输出功率限制且未达到自身的最大输出功率限制,均参与功率调控,该时刻储能系统集群的功率分配满足式(26)所示关系:

[0165] $P_{net}(I_{rank,h}^{\min}) = K_m P_d + L_m$ (26)

[0166] 其中, K_m 和 L_m 分别表示参与调控的储能系统关于该时刻负荷需求的功率分配系数矩阵;具体形式如公式(27)和(28)所示:

[0167] $K_m = [k_{1,m}, k_{2,m}, \dots, k_{m-1,m}, k_{m,m}]$ (27)

[0168] $L_m = [l_{1,m}, l_{2,m}, \dots, l_{m-1,m}, l_{m,m}]$ (28)

[0169] 此时,参与调控的各单套动力电池分配到的功率需求如公式(29)所示:

[0170] $P_{net,i} = k_{i,m} P_d + l_{i,m}, i = 1, 2, \dots, m$ (29)

[0171] 第四种情况,当储能系统集群的负荷需求

$P_d \in [P_{Ind,j}^{\max}, P_{Ind,j+1}^{\max}]$, $j' = 1, 2, \dots, m-1$ 时,此时只有部分储能系统达到自身的最大输出功率限制,该部分储能系统不参与功率调控,该时刻储能系统集群的功率分配满足式(30)所示关系:

[0172] $P_{net}(I_{rank,j'}^{\max}) = K_{j'} [P_d - \sum_{\lambda'=1}^{j'-1} P_{net,\lambda'}^{\max}] + L_{j'}, \lambda' = 1, \dots, j'-1$ (30)

[0173] 其中, $K_{j'}$ 和 $L_{j'}$ 分别表示参与调控的储能系统关于该时刻负荷需求的功率分配系数矩阵;具体形式如公式(31)和(32)所示:

[0174] $K_{j'} = [k_{j',m}, k_{j'+1,m}, \dots, k_{m-1,m}, k_{m,m}]$ (31)

[0175] $L_{j'} = [l_{j',m}, l_{j'+1,m}, \dots, l_{m-1,m}, l_{m,m}]$ (32)

[0176] 此时,参与调控的各单套动力电池分配到的功率需求如公式(33)所示:

[0177] $P_{net,i} = k_{i,m} P_d + l_{i,m}, i = j, j+1, \dots, m$ (33)

[0178] 第五种情况,当储能系统集群的负荷需求 $P_d \geq P_{Ind,m}^{\max}$ 时,此时所有单套储能系统均达到自身的最大输出功率限制,均不参与功率调控,该时刻各单套储能系统的净输出功率如式(34)所示:

[0179] $P_{net,i} = P_{net,i}^{\max}, i = 1, 2, \dots, m$ (34)。

[0180] 图4展示了根据功率需求与功率切换点之间的比较进行功率分配的详细流程图,将实时功率需求与功率切换点进行比较,即图中左边菱形中的公式,进而确定其所在的区间,进而确定其功率分配公式,即图中右边对应的长方形中的公式,从而得到该时刻的功率分配结果。

[0181] S3. 基于迭代对储能系统集群实时功率分配结果进行最优化逼近,包括计算功率分配结果的相对误差,并判断是否需要功率分配结果进行迭代;

[0182] 如图5所示,步骤S3包括以下步骤:

[0183] S301、根据t时刻是否为初始时刻,分为两种情况:

[0184] 情况1,若t时刻为初始时刻,则计算t时刻更新后的功率分配结果与t时刻的平均功率分配结果之间的相对误差,如公式(35)所示:

$$[0185] \quad \varepsilon_i^t = \left| \frac{\overline{P_{net,i}^t} - P_{net,i}^t}{P_{net,i}^t} \right| \quad (35)$$

[0186] 其中, ε_i^t 表示第i套储能系统在t时刻的平均功率分配结果与t时刻更新后的功率分配结果的差值除以t时刻的平均功率分配结果取绝对值后得到的相对误差;

[0187] 情况2,若t时刻不为初始时刻,则计算t时刻更新后的功率分配结果与t-1时刻的最终功率分配结果之间的相对误差,如公式(36)所示:

$$[0188] \quad \varepsilon_t^i = \left| \frac{P_{net,i}^{t-1} - P_{net,i}^t}{P_{net,i}^{t-1}} \right| \quad (36)$$

[0189] 其中, ε_t^i 表示第i套储能系统在t-1时刻的最终功率分配结果与t时刻更新后的功率分配结果的差值除以t-1时刻的最终功率分配结果得到的相对误差;

[0190] S302、判断t时刻更新后的功率分配结果是否满足设定条件;

[0191] 若当前迭代次数n未达到设定的上限 n_{max} 且本次迭代储能系统集群功率分配的相对误差 $\{\varepsilon_t^i\}$ 序列存在部分储能系统的相对误差 ε_t 大于设定值 ε_0 ($\varepsilon_0=0.1\%$)的情况,则将t时刻更新后的功率分配结果代替t-1时刻的最终功率分配结果或t时刻的平均功率分配结果,返回S201步骤重新参与迭代,直至各套储能系统的相对误差 ε_t 均不大于 ε_0 或该时刻的迭代次数已达到迭代次数上限 n_{max} ;

[0192] 若当前迭代次数n未达到迭代次数上限 n_{max} ,各套储能系统的相对误差 ε_t 就已经都满足 $\varepsilon_t \leq \varepsilon_0$,则将本次迭代得到的更新后的功率分配结果作为t时刻的最终功率分配结果;若当前迭代次数n已达到迭代次数上限 n_{max} ,则将最后一次迭代得到的更新后的功率分配结果作为t时刻的最终功率分配结果;

[0193] 最后,若储能系统集群停止运行,则所有储能系统的输出功率为零,即 $P=0$ 。

[0194] 实施例1

[0195] 该实施例是通过采集储能系统中一组真实数据,并使用本发明提出的能量管理策略对储能系统集群进行效率优化控制管理的一次应用。本实施例中,储能系统集群中单套储能系统的数目为4。

[0196] 其中,初始时刻各单套储能系统的内部参数如表1所示:

[0197] 表1初始时刻各单套动力电池系统的内部参数

[0198]

单套储能系统参数	j=1	j=2	j=3	j=4
SOC _i	0.5	0.5	0.5	0.5
RUL _i	0.98	0.96	0.94	0.92
Q _i	58.80	57.60	56.40	55.20

- [0199] 步骤S1、系统控制参量初始化及能耗特性建模；
- [0200] S101、根据公式 (1) 对储能系统集群进行功率分配结果的初始化,以便于对初始时刻的功率分配结果进行更新；
- [0201] 公式 (1) 中单套储能系统的数量 $m=4$ ；
- [0202] S102、根据公式 (2) - (3) 计算储能系统集群的实时功率限制序列,公式 (2) - (3) 中的开路电压 E_m 、等效内阻 R_{chg} 和 R_{dis} 、可用容量 Q 以及对应的功率限制序列 P_{net}^{min} 和 P_{net}^{max} 会随着不同时刻下的SOC和RUL发生变化；
- [0203] 公式 (2) - (3) 中最大充放电倍率 $CR^{max}=4$ ；
- [0204] S103、首先,根据公式 (4) 计算储能电池随当前时刻SOC和RUL变化的能耗特性表达式；
- [0205] 然后,根据公式 (6) 计算级联变换器随当前时刻SOC变化的特性曲线拟合多项式；
- [0206] 最后,在公式 (7) 中组合公式 (4) - (6) 得到的表达式,得到单套储能系统能耗特性表达式。
- [0207] 步骤S2、基于实时负荷需求对系统进行功率分配；
- [0208] S201、根据公式 (9) 计算各单套储能系统近似局部二次能耗充放电函数,并根据当前时刻的不同选取不同的泰勒展开点。
- [0209] S202、按照公式 (15) - (18) 计算储能系统集群与功率上下限相关的功率分配表达式的一次项系数矩阵 K^{DDS} 和 K^{DES} 以及常数项矩阵 L^{DDS} 和 L^{DES} ；
- [0210] 式 (18) 中储能系统集群的荷电状态上限和下限分别取0.8和0.2,调节储能系统间一致性速度的常数 μ 取0.5830；
- [0211] 由公式 (2) - (3) 得到的初始时刻各单套储能系统最大功率限制为： $[7.1094 \times 10^4 \ 6.9766 \times 10^4 \ 6.8093 \times 10^4 \ 6.613 \times 10^4]$ ；
- [0212] 最小功率限制为： $[-13.4624 \times 10^4 \ -13.179 \times 10^4 \ -12.9199 \times 10^4 \ 12.6815 \times 10^4]$ ；
- [0213] 按照公式 (19) 计算对应的 $P_{rank,i}^{max}$ 值为 $[2.7642 \times 10^5 \ 2.7503 \times 10^5 \ 2.7439 \times 10^5 \ 2.7444 \times 10^5]$ ；
- [0214] 将计算所得的 $P_{rank,i}^{max}$ 按升序排列： $[2.7439 \times 10^5 \ 2.7444 \times 10^5 \ 2.7503 \times 10^5 \ 2.7642 \times 10^5]$ ；
- [0215] 对应的储能系统序号为： $[3 \ 4 \ 2 \ 1]$ ；
- [0216] 按照公式 (19) 计算对应的 $P_{rank,i}^{min}$ 值为 $[-5.2395 \times 10^5 \ -5.1979 \times 10^5 \ -5.2048 \times 10^5 \ -5.2559 \times 10^5]$ ；
- [0217] 将计算所得的 $P_{rank,i}^{min}$ 按降序排列： $[-5.1979 \times 10^5 \ -5.2048 \times 10^5 \ -5.2395 \times 10^5 \ -5.2559 \times 10^5]$ ；
- [0218] 对应的储能系统序号为： $[2 \ 3 \ 1 \ 4]$ ；
- [0219] 按照公式 (20) 计算对应的 $P_{Ind,i}^{max}$ 值为 $[2.7439 \times 10^5 \ 2.7443 \times 10^5 \ 2.7473 \times 10^5 \ 2.7508 \times 10^5]$ ；

- [0220] 对应的 $P_{Ind,i}^{\min}$ 值为 $[-5.1979 \times 10^5 \ -5.2031 \times 10^5 \ -5.2203 \times 10^5 \ -5.2243 \times 10^5]$;
- [0221] S203、储能系统集群的功率分配;
- [0222] 根据公式 (21) - (34) 计算各单套储能系统的实时功率分配结果;
- [0223] 各单套储能系统放电过程实时分配的功率随需求功率变化结果如图6所示;充电过程实时分配的功率随需求功率变化结果如图7所示;从图中可以看出,性能较好的储能系统承担更多的功率需求,性能较差的储能系统承担更少的功率需求;
- [0224] 步骤S3、基于迭代对储能系统集群实时功率分配结果进行最优化逼近;
- [0225] S301、根据公式 (35) 计算各单套储能系统功率分配结果的相对误差;
- [0226] S302、首先将当前循环的迭代次数 n 与迭代上限 n_{\max} 相比较,若小于 n_{\max} 则将公式 (35) 计算得到的相对误差与设定值 ϵ_0 相比较 ($\epsilon_0 = 0.1\%$), 判断是否需要进行一次迭代;
- [0227] 本发明所采用的迭代上限 $n_{\max} = 10$; 设定值 $\epsilon_0 = 0.1\%$ 。
- [0228] 当然,上述说明并非是对本发明的限制,本发明也并不仅限于上述举例,本技术领域的技术人员在本发明的实质范围内所做出的变化、改型、添加或替换,也应属于本发明的保护范围。

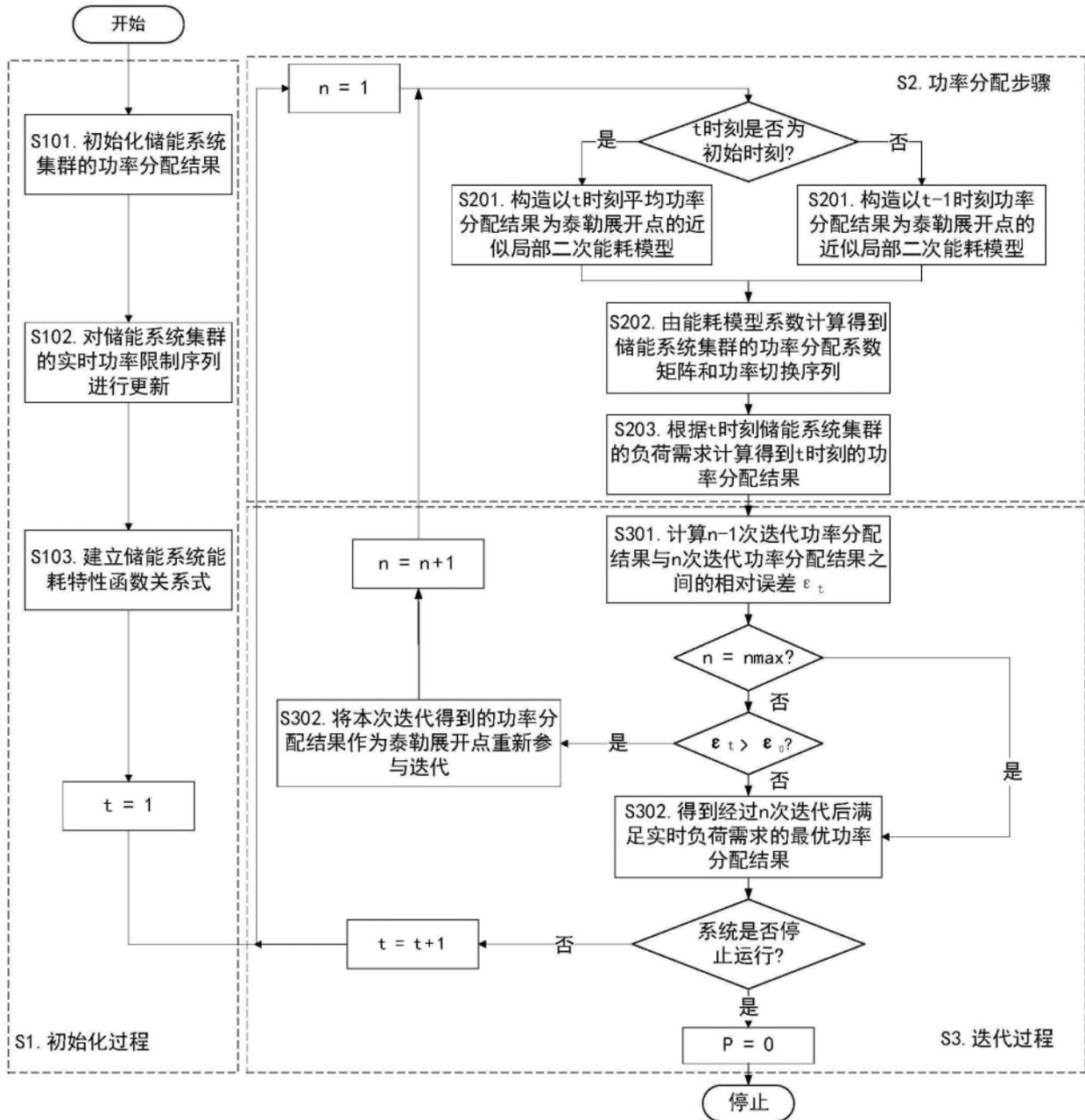


图1

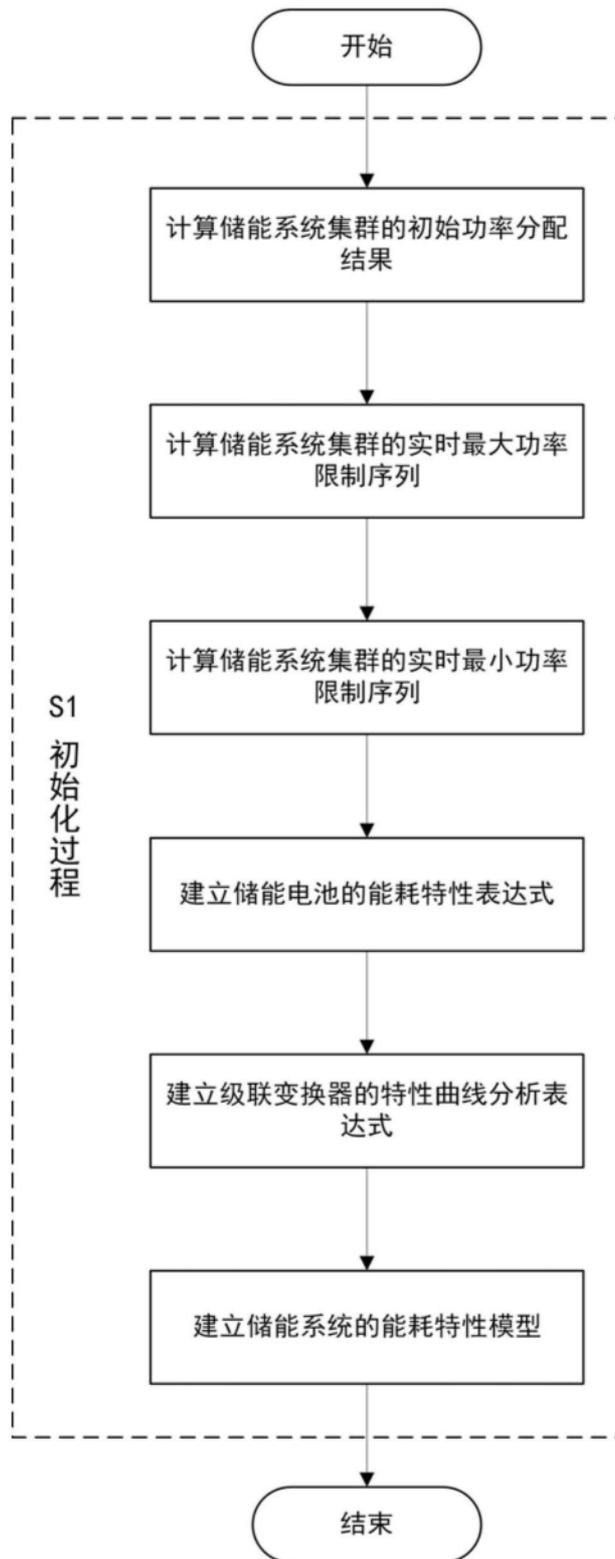


图2

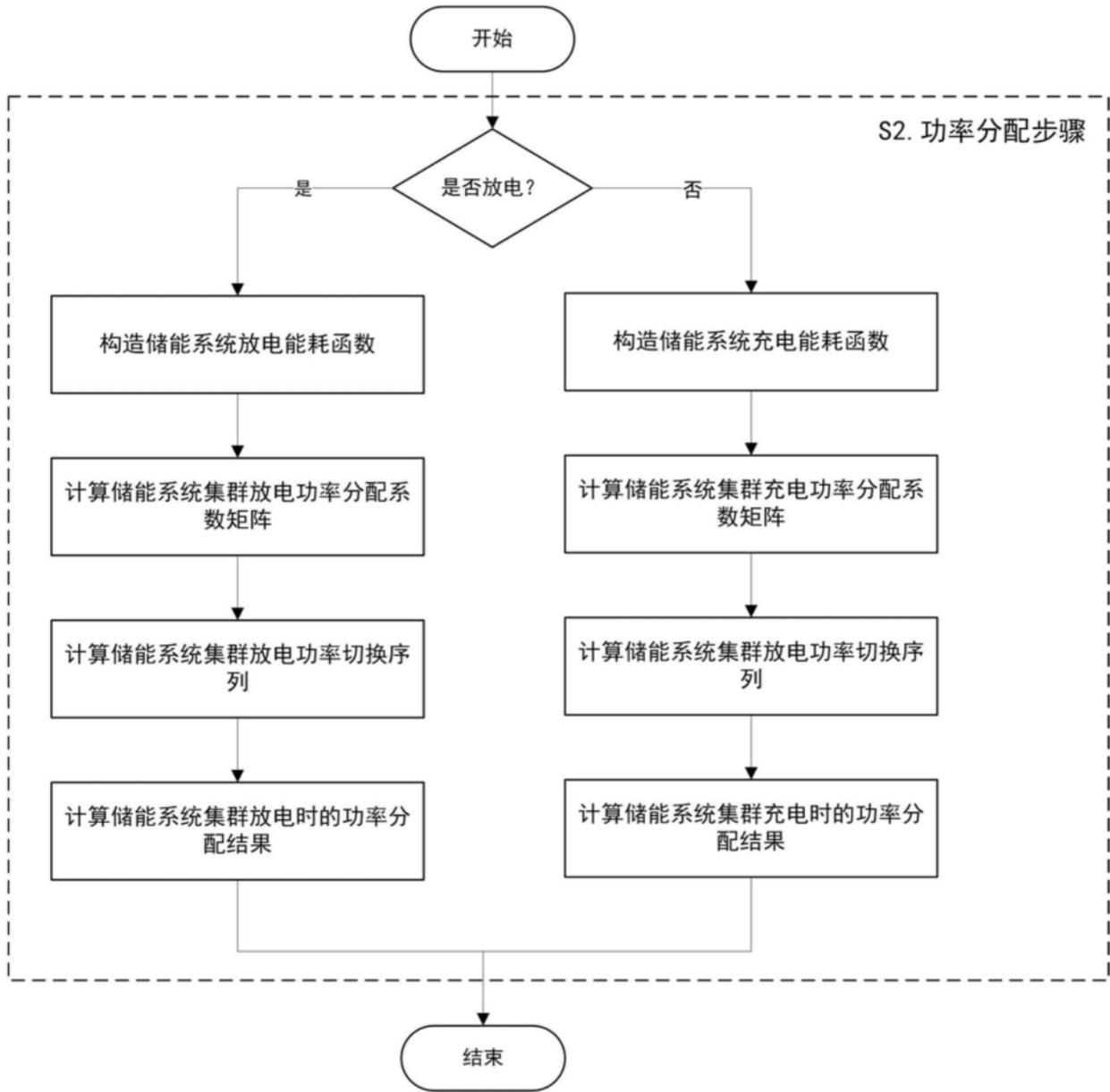


图3

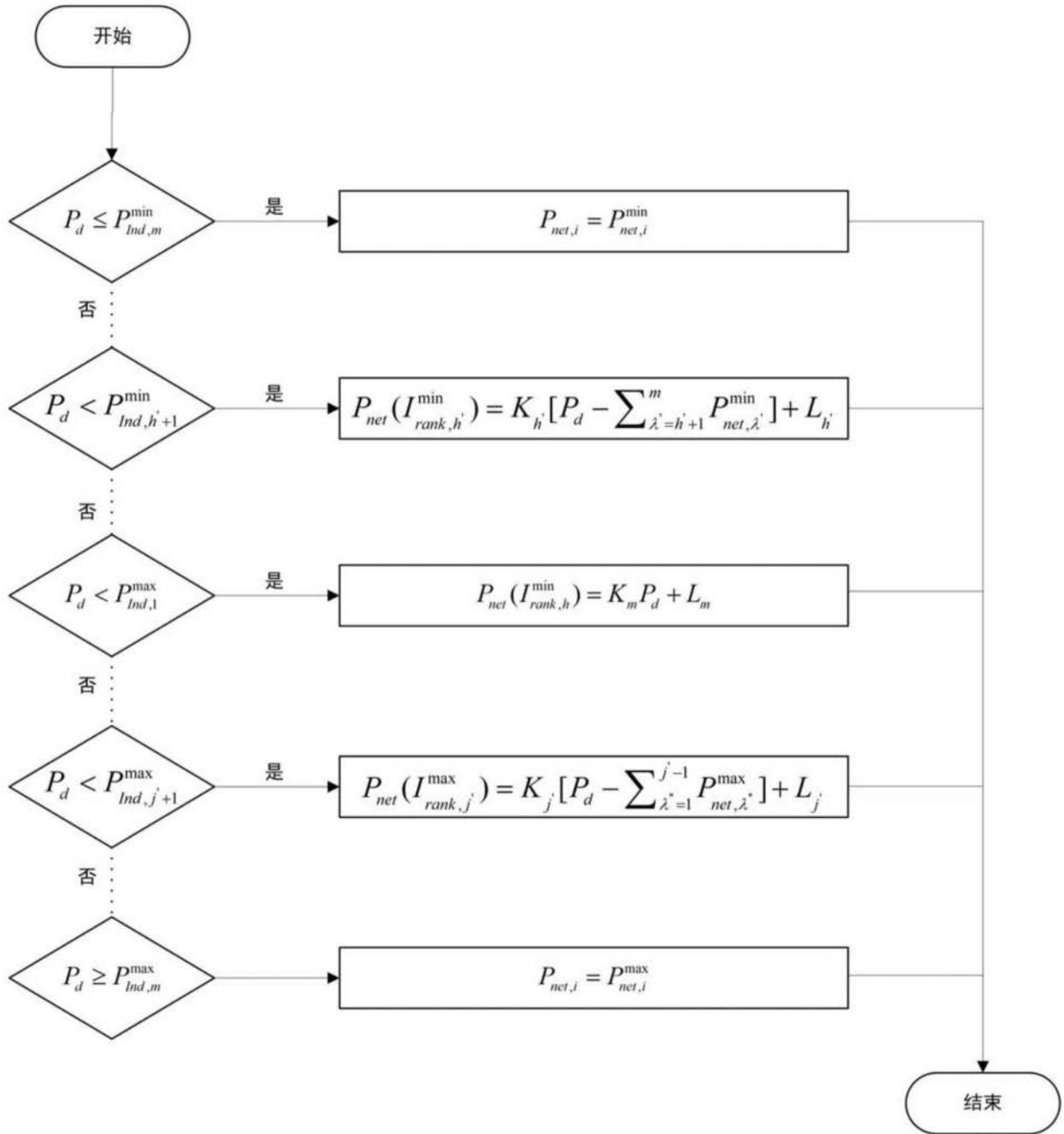


图4

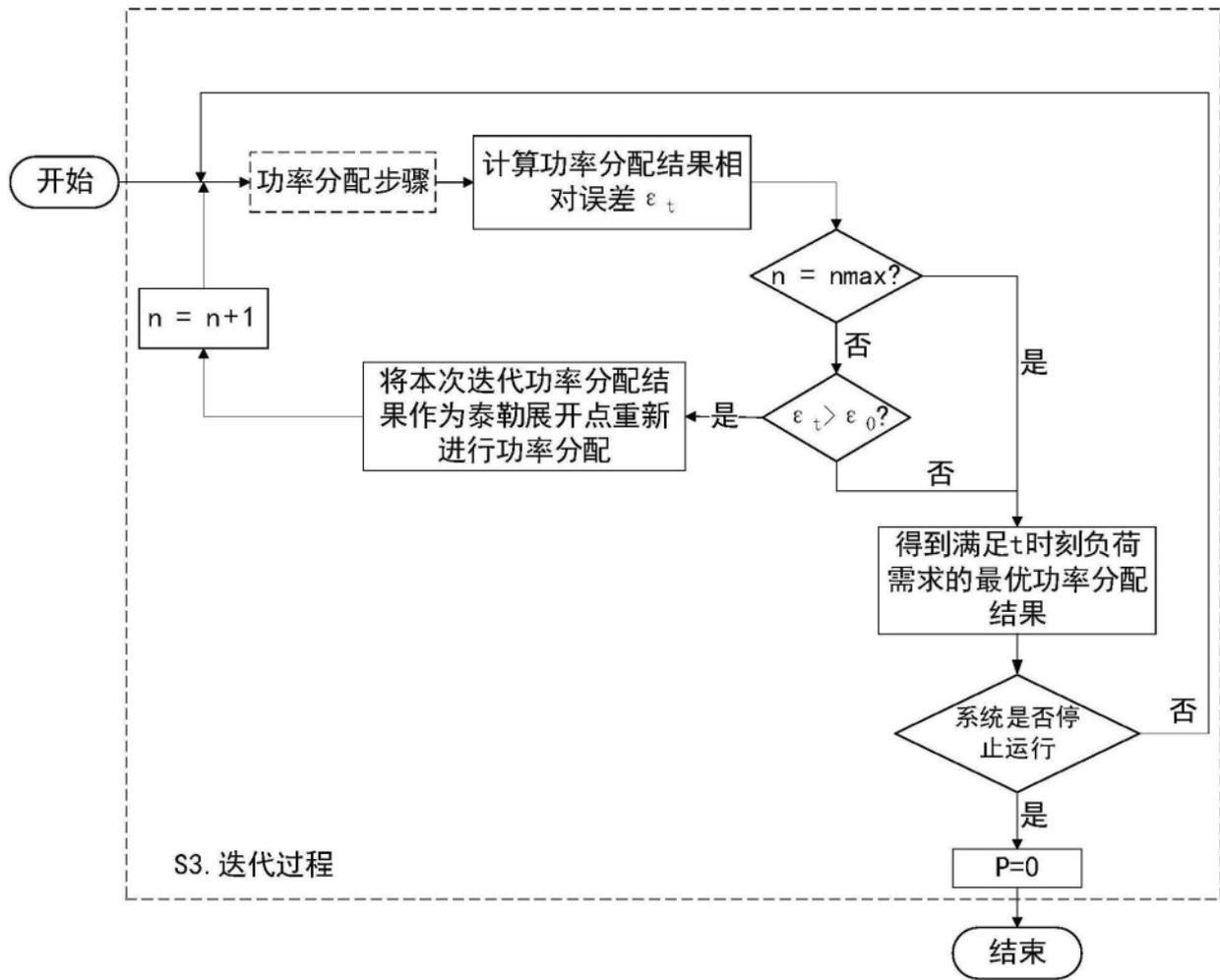


图5

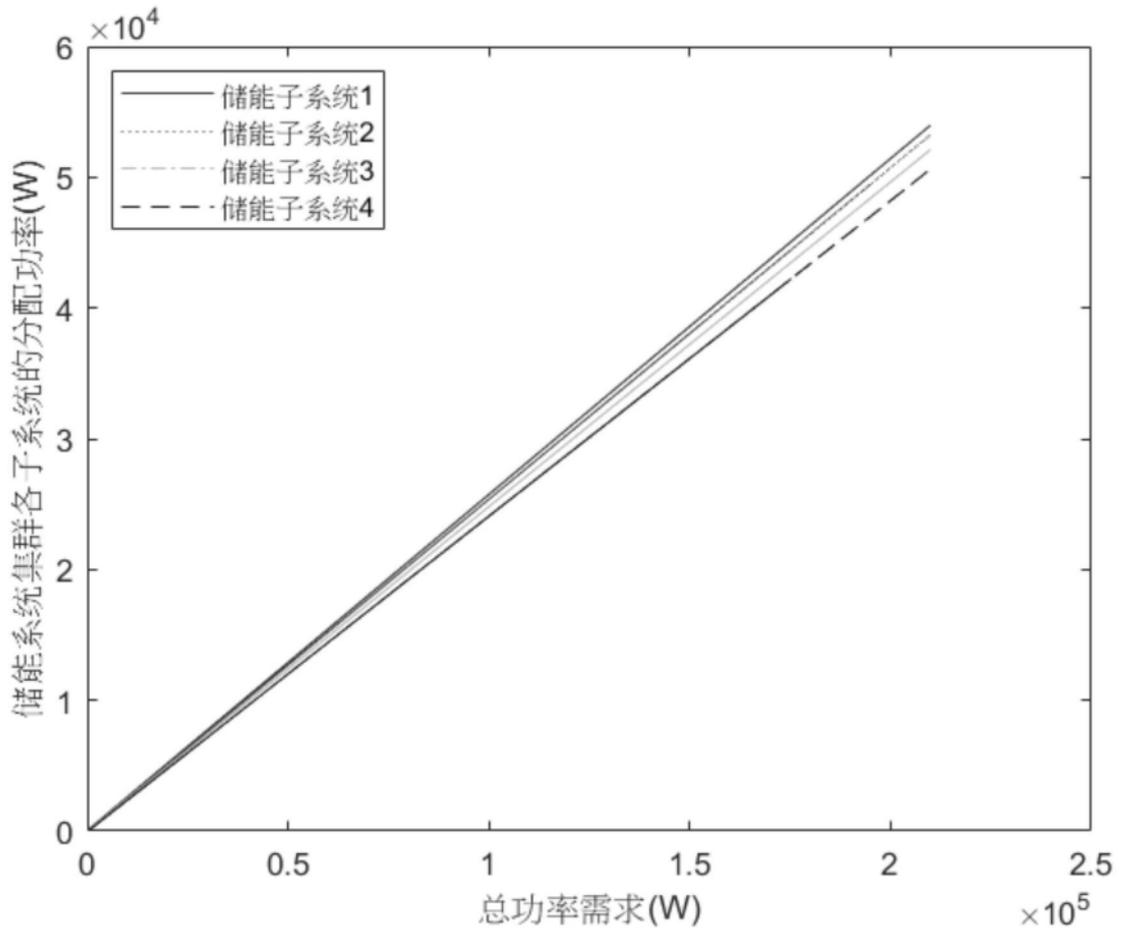


图6

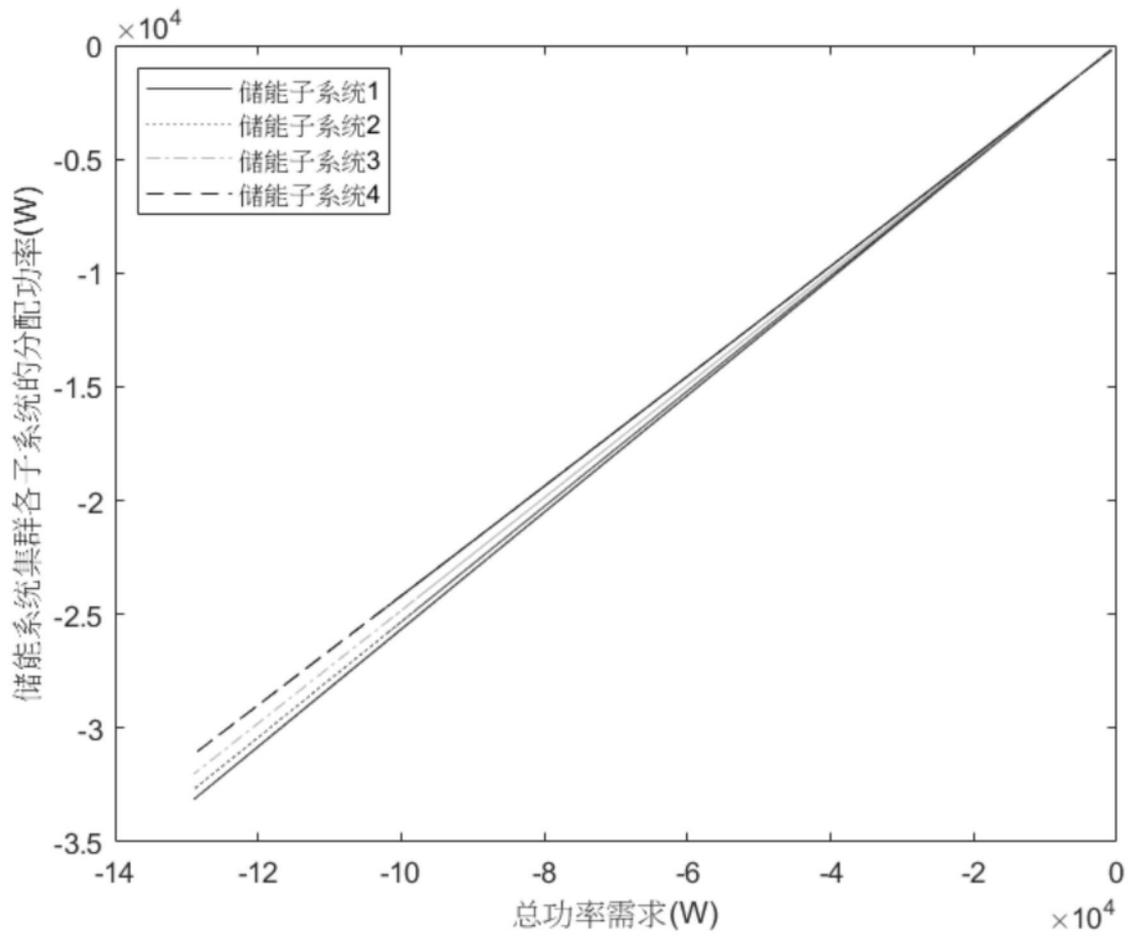


图7