



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106099964 B

(45)授权公告日 2018.09.11

(21)申请号 201610430803.X

(22)申请日 2016.06.16

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106099964 A

(43)申请公布日 2016.11.09

(73)专利权人 南京工程学院

地址 211167 江苏省南京市江宁区弘景大道1号

(72)发明人 杨志超 陆文伟 葛乐 马寿虎

陆文涛 顾佳易 王蒙

(74)专利代理机构 江苏圣典律师事务所 32237

代理人 邓丽

(51)Int.Cl.

H02J 3/32(2006.01)

(56)对比文件

CN 103956758 A,2014.07.30,

CN 104779630 A,2015.07.15,

US 2016/0043548 A1,2016.02.11,

审查员 施岚

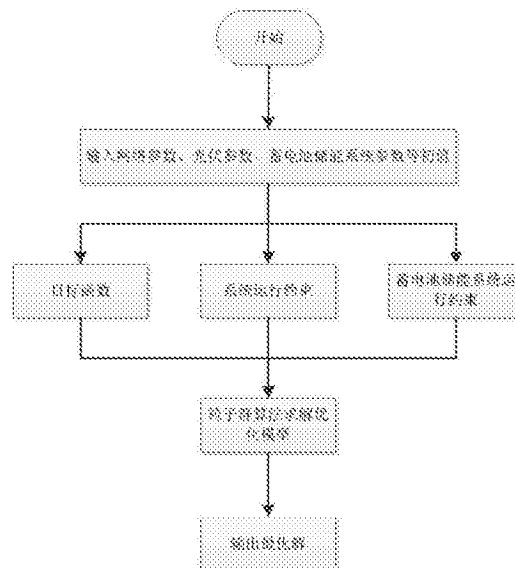
权利要求书3页 说明书7页 附图4页

(54)发明名称

一种储能系统参与主动配电网运行调节计算方法

(57)摘要

本发明提供一种储能系统参与主动配电网运行调节计算方法,针对蓄电池组成的储能系统,以配电网系统有功损耗最小为目标函数,考虑系统自身的运行约束,包括系统潮流约束、运行电压约束、支路电流约束以及储能系统运行约束,采用粒子群算法对算例进行求解,最终输出在满足系统可靠性前提下储能系统各时段的充放电功率作为最优解。本发明相较于传统方法,可有效降低配电网系统的有功网损,减小电网运行成本,增加了光伏能源的利用效率。



1. 一种储能系统参与主动配电网运行调节计算方法,其特征在於,包括如下步骤:

(1) 综合考虑储能系统的有功和无功特性,建立储能系统运行模型;

(2) 确定储能系统参与主动配电网运行调节的目标函数为:配电网系统的有功损耗最小;

(3) 计算过程中兼顾配电网系统自身的运行约束,包括系统潮流约束、运行电压约束、支路电流约束和储能系统运行约束,具体如下:

(3-1) 系统潮流约束

$$P_i(t) = G_{ii}(U_i(t))^2 + \sum_{j \in \Omega(i)} (U_i(t)U_j(t)G_{ij} \cos(\theta_{ij}(t)) + U_i(t)U_j(t)B_{ij} \sin(\theta_{ij}(t))) = P_i^{PV}(t) + P_i^{ESS}(t) - P_i^L(t)$$

式 (7),

$$Q_i(t) = -B_{ii}(U_i(t))^2 - \sum_{j \in \Omega(i)} (U_i(t)U_j(t)B_{ij} \cos(\theta_{ij}(t)) - U_i(t)U_j(t)G_{ij} \sin(\theta_{ij}(t))) = Q_i^{PV}(t) + Q_i^{ESS}(t) - Q_i^L(t)$$

式 (8),

式中:  $i=2,3,\dots,N$ ;  $\Omega(i)$  为节点  $i$  的相邻节点的集合;  $U_i(t)$ ,  $U_j(t)$ ,  $\theta_{ij}(t)$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  和  $j$  的电压幅值和相角差;  $G_{ii}$ ,  $B_{ii}$ ,  $G_{ij}$ ,  $B_{ij}$  分别为节点导纳矩阵中的自电导、自电纳、互电导和互电纳;  $P_i^{PV}(t)$ ,  $P_i^{ESS}(t)$ ,  $P_i^L(t)$ ,  $Q_i^{PV}(t)$ ,  $Q_i^{ESS}(t)$ ,  $Q_i^L(t)$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  上光伏电站、蓄电池、负荷注入的有功功率和无功功率;

(3-2) 运行电压约束

$$U_{i\min} \leq U_i(t) \leq U_{i\max} \quad \text{式 (9)}, i=1,2,\dots,N,$$

式中,  $U_{i\min}$  和  $U_{i\max}$  分别为节点  $i$  电压幅值的上下限;

(3-3) 支路电流约束

$$(I_{ij}(t))^2 = ((U_i(t))^2 + (U_j(t))^2 - 2U_i(t)U_j(t)\cos(\theta_{ij}(t)))(G_{ij}^2 + B_{ij}^2) \leq I_{ij\max}^2 \quad \text{式 (10)},$$

式中,  $I_{ij}(t)$  为  $t$  时刻流过节点  $i$  和节点  $j$  之间支路的电流幅值;  $U_i(t)$ ,  $U_j(t)$ ,  $\theta_{ij}(t)$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  和  $j$  的电压幅值和相角差;  $G_{ii}$ ,  $B_{ii}$ ,  $G_{ij}$ ,  $B_{ij}$  分别为节点导纳矩阵中的自电导、自电纳、互电导和互电纳;  $I_{ij\max}$  为支路  $ij$  的电流幅值上限;

(3-4) 储能系统运行约束

$$\sqrt{(P_k^{ESS}(t))^2 + (Q_k^{ESS}(t))^2} \leq S_{k\max}^{ESS} \quad \text{式 (1)},$$

$$-P_{k\max}^{ESS} \leq P_k^{ESS}(t) \leq P_{k\max}^{ESS} \quad \text{式 (2)},$$

$$P_k^{ESS}(t) = \begin{cases} P_k^{\text{dis}}(t) & P_k^{ESS}(t) \geq 0 \\ P_k^{\text{ch}}(t) & P_k^{ESS}(t) < 0 \end{cases} \quad \text{式 (3)},$$

$$S_{\text{SOC}k}^{ESS}(t) - S_{\text{SOC}k}^{ESS}(t + \Delta t) = \frac{P_k^{ESS}(t)\Delta t}{E_{k,\text{rate}}^{ESS}} \quad \text{式 (4)},$$

$$S_{\text{SOC}k,\min}^{ESS} \leq S_{\text{SOC}k}^{ESS}(t) \leq S_{\text{SOC}k,\max}^{ESS} \quad \text{式 (5)},$$

式中,  $k=1,2,\dots,N_{ESS}$ , 其中  $N_{ESS}$  为储能系统数;  $P_k^{ESS}(t)$  和  $Q_k^{ESS}(t)$  分别为  $t$  时刻第  $k$  个换流器输出的有功功率和无功功率;  $S_{k\max}^{ESS}$  和  $P_{k\max}^{ESS}$  分别为第  $k$  个换流器的额定容量和有功功率上限;  $P_k^{\text{ch}}(t)$  和  $P_k^{\text{dis}}(t)$  分别为蓄电池的充放电功率;  $\Delta t$  为仿真步长;  $S_{\text{SOC}k}^{ESS}(t)$  为  $t$  时刻第  $k$  个储能

系统的荷电状态;  $E_{k,rate}^{ESS}$ ,  $S_{SOCK,max}^{ESS}$ ,  $S_{SOCK,min}^{ESS}$  分别为第k个储能系统的容量以及荷电状态的上下限值;

(4) 利用粒子群算法求解储能系统参与配电网运行调节的优化模型;

(5) 输出最优解:在满足配电网系统可靠性前提下,储能系统各时段的充放电功率即为最优解。

2. 根据权利要求1所述的储能系统参与主动配电网运行调节计算方法,其特征在于,步骤(1)中,建立储能系统运行模型时,假定储能系统向配电网输出功率为正方向,综合考虑其有功和无功特性,运行边界约束如下:

$$\sqrt{(P_k^{ESS}(t))^2 + (Q_k^{ESS}(t))^2} \leq S_{k,max}^{ESS} \quad \text{式(1)},$$

$$-P_{k,max}^{ESS} \leq P_k^{ESS}(t) \leq P_{k,max}^{ESS} \quad \text{式(2)},$$

$$P_k^{ESS}(t) = \begin{cases} P_k^{dis}(t) & P_k^{ESS}(t) \geq 0 \\ P_k^{ch}(t) & P_k^{ESS}(t) < 0 \end{cases} \quad \text{式(3)},$$

式中:  $k=1, 2, \dots, N_{ESS}$ , 其中  $N_{ESS}$  为储能系统数;  $P_k^{ESS}(t)$  和  $Q_k^{ESS}(t)$  分别为t时刻第k个换流器输出的有功功率和无功功率;  $S_{k,max}^{ESS}$  和  $P_{k,max}^{ESS}$  分别为第k个换流器的额定容量和有功功率上限;  $P_k^{ch}(t)$  和  $P_k^{dis}(t)$  分别为储能系统的充放电功率;

所述储能系统的荷电状态在时序上具有绝对的连续性,其严格按照时间顺序根据充放电功率大小进行积累计算,计算公式如下:

$$S_{SOCK}^{ESS}(t) - S_{SOCK}^{ESS}(t + \Delta t) = \frac{P_k^{ESS}(t)\Delta t}{E_{k,rate}^{ESS}} \quad \text{式(4)},$$

式中:  $k=1, 2, \dots, N_{ESS}$ ;  $\Delta t$  为仿真步长;  $S_{SOCK}^{ESS}(t)$  为t时刻第k个储能系统的荷电状态;

所述储能系统每个时间点的储能量介于荷电状态的上下限之间,表达式如下:

$$S_{SOCK,min}^{ESS} \leq S_{SOCK}^{ESS}(t) \leq S_{SOCK,max}^{ESS} \quad \text{式(5)},$$

式中,  $E_{k,rate}^{ESS}$ ,  $S_{SOCK,max}^{ESS}$ ,  $S_{SOCK,min}^{ESS}$  分别为第k个储能系统的容量以及荷电状态的上下限值。

3. 根据权利要求1所述的储能系统参与主动配电网运行调节计算方法,其特征在于,步骤(2)中,所述配电网系统的有功损耗为整个配电网系统所注入的有功功率减去负荷所消耗的有功功率,即配电网系统各个节点注入的有功功率之和,其数学表达式为:

$$\min \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^N P_i(t)\Delta t \quad \text{式(6)},$$

式中,  $N$  为系统节点数;  $N_T$  为时间断面数;  $P_i(t)$  为t时刻节点i处注入的有功功率;  $\Delta t$  为步长。

4. 根据权利要求1所述的储能系统参与主动配电网运行调节计算方法,其特征在于,步骤(4)中所述的粒子群算法中每个粒子在迭代过程中按下式对粒子的速度和位置进行更新:

$$v_{t+1} = \omega v_t + c_1 \text{rand}() (P_t - x_t) + c_2 \text{rand}() (G_t - x_t) \quad \text{式(11)},$$

$x_{t+1}=x_i+v_t$  式(12),

式中, $i$ 为进化代数; $\omega$ 为惯性权重; $c_1$ 、 $c_2$ 为加速因子; $\text{rand}()$ 为 $[0,1]$ 之间的随机数。

5. 根据权利要求1所述的储能系统参与主动配电网运行调节计算方法,其特征在于,步骤(4)中,借助matlab计算软件,利用粒子群算法求解储能系统参与配电网运行调节的优化模型。

## 一种储能系统参与主动配电网运行调节计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种储能系统参与主动配电网运行调节技术,具体涉及一种蓄电池储能系统参与主动配电网运行调节计算方法。

### 背景技术

[0002] 受能源与环境的双重压力,以可再生能源利用为核心的分布式发电技术在世界范围内广泛兴起,极大地促进了储能技术在电力系统中的应用和发展。一方面,借助于储能系统可以有效地减少分布式电源出力间歇性和随机性所带来的影响,形成以微电网为核心的独立自治系统;另一方面,大容量的储能系统也给配电网的运行调节提供了新的手段和方法。从配电系统角度看,储能技术的应用不仅能够提高分布式能源的消纳能力,还能够积极参与系统潮流的有效调节和优化,可以大大地提高配电系统运行的经济性和可靠性。

[0003] 如何充分利用储能系统,实现配电系统的高效可靠运行时目前关注的重点,国内外的相关学者对其进行了研究,并取得了一些理论和实践方面的成果,如分析了蓄电池位置分布和容量大小的影响,以及对调峰所发挥的积极作用;研究了含分布式电源和蓄电池的配电网/微电网运行优化问题,给出了蓄电池有功和无功功率同时进行优化的数学模型;以及根据蓄电池的可调度特性以及电荷量信息,提出了一种基于恒电流—恒电压控制策略的蓄电池充放电数学模型。

[0004] 与分布式电源不同,储能系统的运行具有明显的时序特性,其运行优化不再局限于单个时间断面,而是扩展到更长的时间尺度上,存在了时序运行优化问题,进而导致其决策变量维数随时间断面数的增多而迅速增长。

### 发明内容

[0005] 本发明的发明目的是为解决上述问题,针对蓄电池储能系统参与主动配电网运行调节的优化调度模型,提供一种储能系统参与主动配电网运行调节计算方法。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明的实施例提供一种储能系统参与主动配电网运行调节计算方法,包括如下步骤:

[0007] (1) 综合考虑储能系统的有功和无功特性,建立储能系统运行模型;

[0008] (2) 确定储能系统参与主动配电网运行调节的目标函数为:配电网系统的有功损耗最小;

[0009] (3) 计算过程中兼顾配电网系统自身的运行约束,包括系统潮流约束、运行电压约束、支路电流约束和储能系统运行约束;

[0010] (4) 利用粒子群算法求解储能系统参与配电网运行调节的优化模型;

[0011] (5) 输出最优解:在满足配电网系统可靠性前提下,储能系统各时段的充放电功率即为最优解。

[0012] 以典型的蓄电池储能系统为例,它主要由蓄电池和换流器构成,换流器主要负责监测电网运行状况、发出控制信号等工作。换流器作为蓄电池与电网相连的电气接口,是蓄

电池储能系统与配电网进行能量交换的枢纽,能够实现有功功率的充放电控制,并且,换流器具有一定的无功辅助功能,在执行充电和放电功能的同时,通过无功控制能够为配电网提供电压支持。

[0013] 其中,步骤(1)中建立蓄电池储能系统运行模型时,假定蓄电池储能系统以向配电网输出功率为正方向,综合考虑其有功和无功特性,运行边界约束如下:

$$[0014] \quad \sqrt{(P_k^{\text{ESS}}(t))^2 + (Q_k^{\text{ESS}}(t))^2} \leq S_{k,\text{max}}^{\text{ESS}} \quad \text{式(1)},$$

$$[0015] \quad -P_{k,\text{max}}^{\text{ESS}} \leq P_k^{\text{ESS}}(t) \leq P_{k,\text{max}}^{\text{ESS}} \quad \text{式(2)},$$

$$[0016] \quad P_k^{\text{ESS}}(t) = \begin{cases} P_k^{\text{dis}}(t) & P_k^{\text{ESS}}(t) \geq 0 \\ P_k^{\text{ch}}(t) & P_k^{\text{ESS}}(t) < 0 \end{cases} \quad \text{式(3)},$$

[0017] 式中: $k=1,2,\dots,N_{\text{ESS}}$ ,其中 $N_{\text{ESS}}$ 为蓄电池储能系统数; $P_k^{\text{ESS}}(t)$ 和 $Q_k^{\text{ESS}}(t)$ 分别为t时刻第k个换流器输出的有功功率和无功功率; $S_{k,\text{max}}^{\text{ESS}}$ 和 $P_{k,\text{max}}^{\text{ESS}}$ 分别为第k个换流器的额定容量和有功功率上限; $P_k^{\text{ch}}(t)$ 和 $P_k^{\text{dis}}(t)$ 分别为蓄电池储能系统的充放电功率。

[0018] 步骤(1),假定蓄电池储能系统以向配电网输出功率为正方向,则蓄电池储能系统输入功率为负方向,当然也可以假定蓄电池储能系统以向配电网输出功率为负方向,则蓄电池储能系统输入功率为正方向,都适用于本优化调节计算方法。

[0019] 所述蓄电池储能系统的荷电状态在时序上具有绝对的连续性,其严格按照时间顺序根据充放电功率大小进行积累计算,计算公式如下:

$$[0020] \quad S_{\text{SOCK}k}^{\text{ESS}}(t) - S_{\text{SOCK}k}^{\text{ESS}}(t + \Delta t) = \frac{P_k^{\text{ESS}}(t)\Delta t}{E_{k,\text{rate}}^{\text{ESS}}} \quad \text{式(4)},$$

[0021] 式中: $k=1,2,\dots,N_{\text{ESS}}$ ;  $\Delta t$ 为仿真步长; $S_{\text{SOCK}k}^{\text{ESS}}(t)$ 为t时刻第k个蓄电池储能系统的荷电状态;

[0022] 所述蓄电池储能系统每个时间点的储能量应满足荷电状态上下限的要求,表达式如下:

$$[0023] \quad S_{\text{SOCK},\text{min}}^{\text{ESS}} \leq S_{\text{SOCK}k}^{\text{ESS}}(t) \leq S_{\text{SOCK},\text{max}}^{\text{ESS}} \quad \text{式(5)},$$

[0024] 式中, $E_{k,\text{rate}}^{\text{ESS}}$ ,  $S_{\text{SOCK},\text{max}}^{\text{ESS}}$ ,  $S_{\text{SOCK},\text{min}}^{\text{ESS}}$ 分别为第k个蓄电池储能系统的容量以及荷电状态的上下限值。

[0025] 含储能系统的配电网运行优化问题通常以发电成本、全网有功损耗、变电站出力最小、新能源接纳能力最大以及多种目标函数的组合等为优化目标,所述配电网系统的有功损耗为整个配电网系统所注入的有功功率减去负荷所消耗的有功功率,即配电网系统各个节点注入的有功功率之和,上述的步骤(2)中以配电网系统有功损耗最小为目标函数,其数学表达式为:

$$[0026] \quad \min \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{t=1}^N P_i(t)\Delta t \quad \text{式(6)},$$

[0027] 式中, $N$ 为系统节点数; $N_T$ 为时间断面数; $P_i(t)$ 为t时刻节点i处注入的有功功率;

$\Delta t$ 为步长。

[0028] 其中,步骤(3)中,所述配电网系统自身的运行约束包括系统潮流约束、运行电压约束、支路电流约束和蓄电池储能系统运行约束,具体如下:

[0029] (3-1) 系统潮流约束

[0030]

$$P_i(t) = G_{ii}(U_i(t))^2 + \sum_{j \in \Omega(i)} (U_i(t)U_j(t)G_{ij} \cos(\theta_{ij}(t)) + U_i(t)U_j(t)B_{ij} \sin(\theta_{ij}(t))) = P_i^{PV}(t) + P_i^{ESS}(t) - P_i^L(t)$$

式(7),

[0031]

$$Q_i(t) = -B_{ii}(U_i(t))^2 - \sum_{j \in \Omega(i)} (U_i(t)U_j(t)B_{ij} \cos(\theta_{ij}(t)) - U_i(t)U_j(t)G_{ij} \sin(\theta_{ij}(t))) = Q_i^{PV}(t) + Q_i^{ESS}(t) - Q_i^L(t)$$

式(8),

[0032] 式中: $i=2,3,\dots,N$ ;  $\Omega(i)$ 为节点i的相邻节点的集合; $U_i(t), U_j(t), \theta_{ij}(t)$ 分别为t时刻节点i和j的电压幅值和相角差; $G_{ii}, B_{ii}, G_{ij}, B_{ij}$ 分别为节点导纳矩阵中的自电导、自电纳、互电导和互电纳; $P_i^{PV}(t), P_i^{ESS}(t), P_i^L(t), Q_i^{PV}(t), Q_i^{ESS}(t), Q_i^L(t)$ 分别为t时刻节点i上PV、蓄电池、负荷注入的有功功率和无功功率;

[0033] (3-2) 运行电压约束

[0034]  $U_{imin} \leq U_i(t) \leq U_{imax}$  式(9),  $i=1,2,\dots,N$ ,

[0035] 式中, $U_{imin}$ 和 $U_{imax}$ 分别为节点i电压幅值的上下限;

[0036] (3-3) 支路电流约束

$$[0037] \quad (I_{ij}(t))^2 = ((U_i(t))^2 + (U_j(t))^2 - 2U_i(t)U_j(t)\cos(\theta_{ij}(t)))(G_{ij}^2 + B_{ij}^2) \leq I_{ij,max}^2 \quad \text{式(10)},$$

[0038] 式中, $I_{ij}(t)$ 为t时刻流过节点i和节点j之间支路的电流幅值; $U_i(t), U_j(t), \theta_{ij}(t)$ 分别为t时刻节点i和j的电压幅值和相角差; $G_{ii}, B_{ii}, G_{ij}, B_{ij}$ 分别为节点导纳矩阵中的自电导、自电纳、互电导和互电纳; $I_{ij,max}$ 为支路ij的电流幅值上限;

[0039] (3-4) 蓄电池储能系统运行约束

$$[0040] \quad \sqrt{(P_k^{ESS}(t))^2 + (Q_k^{ESS}(t))^2} \leq S_{k,max}^{ESS} \quad \text{式(1)},$$

$$\sqrt{-P_{k,max}^{ESS} \leq P_k^{ESS}(t) \leq P_{k,max}^{ESS}} \quad \text{式(2)},$$

$$[0041] \quad P_k^{ESS}(t) = \begin{cases} P_k^{dis}(t) & P_k^{ESS}(t) \geq 0 \\ P_k^{ch}(t) & P_k^{ESS}(t) < 0 \end{cases} \quad \text{式(3)},$$

$$[0042] \quad S_{SOCK}^{ESS}(t) - S_{SOCK}^{ESS}(t + \Delta t) = \frac{P_k^{ESS}(t)\Delta t}{E_{k,rate}^{ESS}} \quad \text{式(4)},$$

$$[0043] \quad S_{SOCK,min}^{ESS} \leq S_{SOCK}^{ESS}(t) \leq S_{SOCK,max}^{ESS} \quad \text{式(5)},$$

[0044] 式中, $k=1,2,\dots,N_{ESS}$ ,其中 $N_{ESS}$ 为蓄电池储能系统数; $P_k^{ESS}(t)$ 和 $Q_k^{ESS}(t)$ 分别为t时刻第k个换流器输出的有功功率和无功功率; $S_{k,max}^{ESS}$ 和 $P_{k,max}^{ESS}$ 分别为第k个换流器的额定容量和有功功率上限; $P_k^{ch}(t)$ 和 $P_k^{dis}(t)$ 分别为蓄电池的充放电功率; $\Delta t$ 为仿真步长; $S_{SOCK}^{ESS}(t)$ 为t时

刻第k个蓄电池储能系统的荷电状态;  $E_{k,rate}^{ESS}$ ,  $S_{SOCK,max}^{ESS}$ ,  $S_{SOCK,min}^{ESS}$  分别为第k个蓄电池储能系统的容量以及荷电状态的上下限值。

[0045] 其中,步骤(4)中,借助matlab计算软件,利用粒子群算法求解储能系统参与配电网运行调节的优化模型。所述的粒子群算法中每个粒子在迭代过程中按下式对粒子的速度和位置进行更新:

$$[0046] \quad v_{t+1} = \omega v_t + c_1 \text{rand}() (P_t - x_t) + c_2 \text{rand}() (G_t - x_t) \quad \text{式(11)},$$

$$[0047] \quad x_{t+1} = x_i + v_t \quad \text{式(12)},$$

[0048] 式中,i为进化代数; $\omega$ 为惯性权重; $c_1$ 、 $c_2$ 为加速因子;rand()为[0,1]之间的随机数。

[0049] 本发明的上述技术方案的有益效果如下:本发明提供了一种储能系统参与主动配电网运行调节计算方法,相较于传统方法,可有效降低配电网系统的有功网损,减小电网运行成本,增加了光伏能源的利用效率。

## 附图说明

- [0050] 图1为本发明实施例一的计算流程图;  
 [0051] 图2为实施例一中IEEE33节点配电网结构图;  
 [0052] 图3为实施例一中光储系统结构示意图;  
 [0053] 图4为实施例一中光伏和负荷日运行曲线;  
 [0054] 图5为实施例一中蓄电池储能系统充放电功率曲线;  
 [0055] 图6为实施例一中蓄电池储能系统无功功率曲线;  
 [0056] 图7为实施例一中蓄电池储能系统荷电状态变化曲线。

## 具体实施方式

[0057] 为使本发明要解决的技术问题、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图及具体实施例进行详细描述。

[0058] 本发明以蓄电池储能系统为例,提供一种储能系统参与主动配电网运行调节计算方法,包括如下步骤:

[0059] (1) 综合考虑储能系统的有功和无功特性,建立蓄电池储能系统运行模型;

[0060] (2) 确定蓄电池储能系统参与主动配电网运行调节的目标函数为:配电网系统的有功损耗最小;

[0061] (3) 计算过程中兼顾配电网系统自身的运行约束,包括系统潮流约束、运行电压约束、支路电流约束和蓄电池储能系统运行约束;

[0062] (4) 利用粒子群算法求解储能系统参与配电网运行调节的优化模型;

[0063] (5) 输出最优解:在满足配电网系统可靠性前提下,蓄电池储能系统各时段的充放电功率即为最优解。

[0064] 储能系统参与主动配电网运行调节计算方法的计算流程如图1所示,具体实施过程如下:

[0065] 与分布式电源不同,储能系统的运行具有明显的时序特性,其运行优化不再局限于单个时间断面,而是扩展到更长的时间尺度上,形成了时序运行优化问题,进而导致其决



策变量维数随时间断面数的增多而迅速增长。为此,本发明针对蓄电池储能系统参与主动配电网运行调节的优化调度模型,提出了一种储能系统参与主动配电网运行调节计算方法。

[0066] 下文以IEEE33节点算例(结构如图2)的求解对含储能系统的配电网运行优化算法的有效性和快速性进行验证。在算例中接入8组光储系统,其系统结构和基本配置参数如图3和表1所示。考虑进行一天的储能优化,负荷日运行曲线利用负荷预测方法获得,取30min一个点,光伏的处理方式相同。整个系统的光伏出力和负荷变化情况如图4所示。

[0067] 表1光储系统配置参数

[0068]

光储系统 ESS	接入位置 (节点)	光伏容 量/kW	光储额定容 量/kVA	储能充放电功 率上下限/kVar	额定储能 量/(kW·h)	储能量 初值/%	储能上 下限/%
ESS1	7	500	700	-180,180	800	100	10,100
ESS2	10	400	600	-150,150	620	100	10,100
ESS3	13	500	700	-180,180	740	100	10,100
ESS4	19	400	600	-150,150	630	100	10,100
ESS5	23	400	600	-150,150	620	100	10,100
ESS6	27	500	700	-180,180	800	100	10,100
ESS7	30	300	500	-110,110	440	100	10,100
ESS8	33	400	600	-150,150	640	100	10,100

[0069] 1、建立蓄电池储能系统运行模型

[0070] 假定蓄电池储能系统以向电网输出功率为正方向,综合考虑其有功和无功特性,运行边界约束如下:

$$[0071] \quad \sqrt{(P_k^{\text{ESS}}(t))^2 + (Q_k^{\text{ESS}}(t))^2} \leq S_{k,\text{max}}^{\text{ESS}} \quad \text{式(1)},$$

$$[0072] \quad -P_{k,\text{max}}^{\text{ESS}} \leq P_k^{\text{ESS}}(t) \leq P_{k,\text{max}}^{\text{ESS}} \quad \text{式(2)},$$

$$[0073] \quad P_k^{\text{ESS}}(t) = \begin{cases} P_k^{\text{dis}}(t) & P_k^{\text{ESS}}(t) \geq 0 \\ P_k^{\text{ch}}(t) & P_k^{\text{ESS}}(t) < 0 \end{cases} \quad \text{式(3)},$$

[0074] 式中: $k=1,2,\dots,N_{\text{ESS}}$ ,其中 $N_{\text{ESS}}$ 为蓄电池储能系统数; $P_k^{\text{ESS}}(t)$ 和 $Q_k^{\text{ESS}}(t)$ 分别为 $t$ 时刻第 $k$ 个换流器输出的有功功率和无功功率; $S_{k,\text{max}}^{\text{ESS}}$ 和 $P_{k,\text{max}}^{\text{ESS}}$ 分别为第 $k$ 个换流器的额定容量和有功功率上限; $P_k^{\text{ch}}(t)$ 和 $P_k^{\text{dis}}(t)$ 分别为蓄电池储能系统的充放电功率。

[0075] 另一方面,蓄电池储能系统的荷电状态在时序上具有绝对的连续性,它严格按照时间顺序根据充放电功率大小进行累积计算,并且每个时间点的储能量应满足荷电状态上下限的要求,

$$[0076] \quad S_{\text{SOC}k}^{\text{ESS}}(t) - S_{\text{SOC}k}^{\text{ESS}}(t + \Delta t) = \frac{P_k^{\text{ESS}}(t)\Delta t}{E_{k,\text{rate}}^{\text{ESS}}} \quad \text{式(4)},$$

$$[0077] \quad S_{\text{SOC}k,\text{min}}^{\text{ESS}} \leq S_{\text{SOC}k}^{\text{ESS}}(t) \leq S_{\text{SOC}k,\text{max}}^{\text{ESS}} \quad \text{式(5)},$$

[0078] 式中： $k=1,2,\dots,N_{ESS}$ ； $\Delta t$ 为仿真步长； $S_{SOCK}^{ESS}(t)$ 为t时刻第k个蓄电池储能系统的荷电状态； $E_{k,rate}^{ESS}$ ， $S_{SOCK,max}^{ESS}$ ， $S_{SOCK,min}^{ESS}$ 分别为第k个蓄电池储能系统的容量以及荷电状态的上下限值。

[0079] 2、以配电网系统有功损耗最小为目标函数

[0080] 所述配电网系统的有功损耗为整个配电网系统所注入的有功功率减去负荷所消耗的有功功率，即配电网系统各个节点注入的有功功率之和，其数学表达式为：

$$[0081] \quad \min \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^N P_i(t) \Delta t \quad \text{式 (6)},$$

[0082] 式中，N为系统节点数； $N_T$ 为时间断面数； $P_i(t)$ 为t时刻节点i处注入的有功功率； $\Delta t$ 为步长。

[0083] 3、考虑配电网系统自身的运行约束，包括系统潮流约束、运行电压约束、支路电流约束以及蓄电池储能系统运行约束，具体如下：

[0084] (3-1) 系统潮流约束

[0085]

$$P_i(t) = G_{ii}(U_i(t))^2 + \sum_{j \in \Omega(i)} (U_i(t)U_j(t)G_{ij} \cos(\theta_{ij}(t)) + U_i(t)U_j(t)B_{ij} \sin(\theta_{ij}(t))) = P_i^{PV}(t) + P_i^{ESS}(t) - P_i^L(t)$$

式 (7)，

[0086]

$$Q_i(t) = -B_{ii}(U_i(t))^2 - \sum_{j \in \Omega(i)} (U_i(t)U_j(t)B_{ij} \cos(\theta_{ij}(t)) - U_i(t)U_j(t)G_{ij} \sin(\theta_{ij}(t))) = Q_i^{PV}(t) + Q_i^{ESS}(t) - Q_i^L(t)$$

式 (8)，

[0087] 式中： $i=2,3,\dots,N$ ； $\Omega(i)$ 为节点i的相邻节点的集合； $U_i(t)$ ， $U_j(t)$ ， $\theta_{ij}(t)$ 分别为t时刻节点i和j的电压幅值和相角差； $G_{ii}$ ， $B_{ii}$ ， $G_{ij}$ ， $B_{ij}$ 分别为节点导纳矩阵中的自电导、自电纳、互电导和互电纳； $P_i^{PV}(t)$ ， $P_i^{ESS}(t)$ ， $P_i^L(t)$ ， $Q_i^{PV}(t)$ ， $Q_i^{ESS}(t)$ ， $Q_i^L(t)$ 分别为t时刻节点i上PV、蓄电池、负荷注入的有功功率和无功功率；

[0088] (3-2) 运行电压约束

[0089]  $U_{imin} \leq U_i(t) \leq U_{imax}$  式 (9)， $i=1,2,\dots,N$ ，

[0090] 式中， $U_{imin}$ 和 $U_{imax}$ 分别为节点i电压幅值的上下限；

[0091] (3-3) 支路电流约束

[0092]

$$(I_{ij}(t))^2 = ((U_i(t))^2 + (U_j(t))^2 - 2U_i(t)U_j(t)\cos(\theta_{ij}(t)))(G_{ij}^2 + B_{ij}^2) \leq I_{ij,max}^2 \quad \text{式 (10)},$$

[0093] 式中， $I_{ij}(t)$ 为t时刻流过节点i和节点j之间支路的电流幅值； $U_i(t)$ ， $U_j(t)$ ， $\theta_{ij}(t)$ 分别为t时刻节点i和j的电压幅值和相角差； $G_{ii}$ ， $B_{ii}$ ， $G_{ij}$ ， $B_{ij}$ 分别为节点导纳矩阵中的自电导、自电纳、互电导和互电纳； $I_{ij,max}$ 为支路ij的电流幅值上限；

[0094] (3-4) 蓄电池储能系统运行约束

$$[0095] \quad \sqrt{\left(P_k^{\text{ESS}}(t)\right)^2 + \left(Q_k^{\text{ESS}}(t)\right)^2} \leq S_{k \max}^{\text{ESS}} \quad \text{式 (1),}$$

$$\sqrt{-P_{k \max}^{\text{ESS}}} \leq P_k^{\text{ESS}}(t) \leq P_{k \max}^{\text{ESS}} \quad \text{式 (2),}$$

$$[0096] \quad P_k^{\text{ESS}}(t) = \begin{cases} P_k^{\text{dis}}(t) & P_k^{\text{ESS}}(t) \geq 0 \\ P_k^{\text{ch}}(t) & P_k^{\text{ESS}}(t) < 0 \end{cases} \quad \text{式 (3),}$$

$$[0097] \quad S_{\text{SOCK}}^{\text{ESS}}(t) - S_{\text{SOCK}}^{\text{ESS}}(t + \Delta t) = \frac{P_k^{\text{ESS}}(t)\Delta t}{E_{k, \text{rate}}^{\text{ESS}}} \quad \text{式 (4),}$$

$$[0098] \quad S_{\text{SOCK}, \min}^{\text{ESS}} \leq S_{\text{SOCK}}^{\text{ESS}}(t) \leq S_{\text{SOCK}, \max}^{\text{ESS}} \quad \text{式 (5),}$$

[0099] 式中,  $k=1, 2, \dots, N_{\text{ESS}}$ , 其中  $N_{\text{ESS}}$  为蓄电池储能系统数;  $P_k^{\text{ESS}}(t)$  和  $Q_k^{\text{ESS}}(t)$  分别为  $t$  时刻第  $k$  个换流器输出的有功功率和无功功率;  $S_{k \max}^{\text{ESS}}$  和  $P_{k \max}^{\text{ESS}}$  分别为第  $k$  个换流器的额定容量和有功功率上限;  $P_k^{\text{ch}}(t)$  和  $P_k^{\text{dis}}(t)$  分别为蓄电池的充放电功率;  $\Delta t$  为仿真步长;  $S_{\text{SOCK}}^{\text{ESS}}(t)$  为  $t$  时刻第  $k$  个蓄电池储能系统的荷电状态;  $E_{k, \text{rate}}^{\text{ESS}}$ ,  $S_{\text{SOCK}, \max}^{\text{ESS}}$ ,  $S_{\text{SOCK}, \min}^{\text{ESS}}$  分别为第  $k$  个蓄电池储能系统的容量以及荷电状态的上下限值。

[0100] 4、以式 (6) 为目标函数, 式 (1) - 式 (5)、式 (7) - (10) 为约束条件, 利用按式 (11) 和式 (12) 改进的粒子群算法, 借助 matlab 计算软件并代入具体数值, 利用粒子群算法求解储能系统参与配电网运行调节的优化模型, 其中, 所述的粒子群算法中每个粒子在迭代过程中按下式对粒子的速度和位置进行更新:

$$[0101] \quad v_{t+1} = \omega v_t + c_1 \text{rand}() (P_t - x_t) + c_2 \text{rand}() (G_t - x_t) \quad \text{式 (11),}$$

$$[0102] \quad x_{t+1} = x_t + v_t \quad \text{式 (12),}$$

[0103] 式中,  $i$  为进化代数;  $\omega$  为惯性权重;  $c_1$ 、 $c_2$  为加速因子;  $\text{rand}()$  为  $[0, 1]$  之间的随机数。

[0104] 5、输出最优解, 即为在满足系统可靠性前提下储能系统各时段的充放电功率。

[0105] 本实施例中, 根据图4所示的光伏与负荷日运行曲线, 利用上述的储能系统参与主动配电网运行调节计算方法对配电网系统进行优化, 结果如图5~图7所示。

[0106] 在 MATLAB 中采用粒子群算法求解优化模型, 在蓄电池储能系统参与配电网优化之前, 系统损耗为  $1316.05 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。蓄电池储能系统通过统筹各时段光伏出力情况以及负荷的用电需求, 来实现削峰填谷, 并提供一定的无功支撑, 最终可以将系统损耗降低至  $390.64 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

[0107] 以上所述是本发明的优选实施方式, 应当指出, 对于本技术领域的普通技术人员来说, 在不脱离本发明所述原理的前提下, 还可以作出若干改进和润饰, 这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

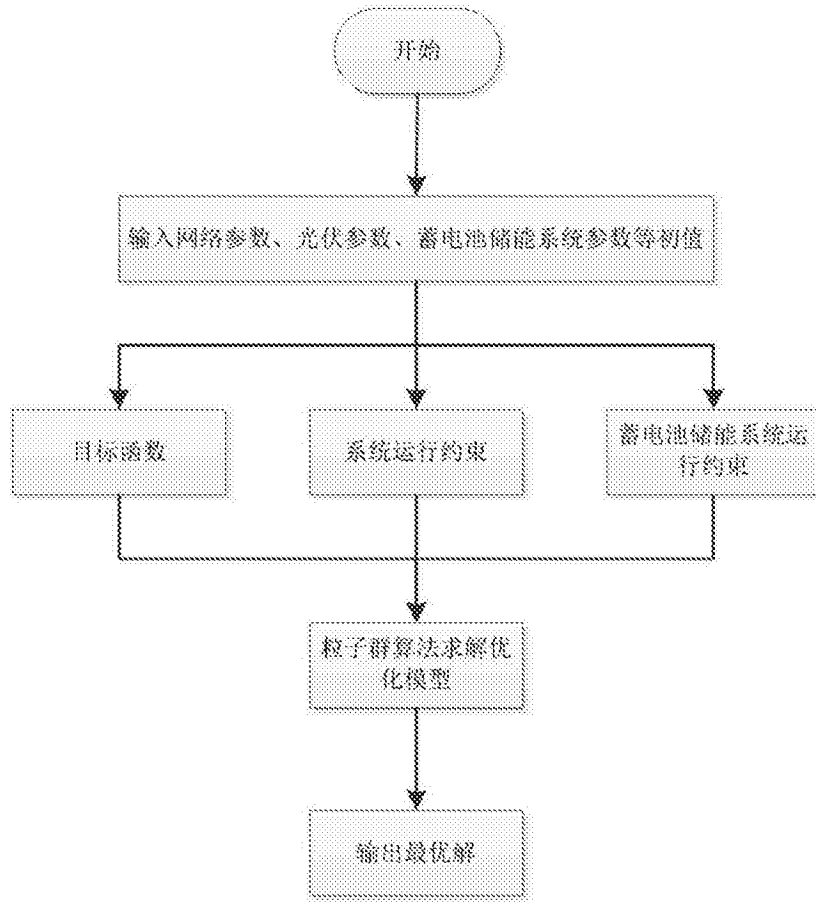


图1

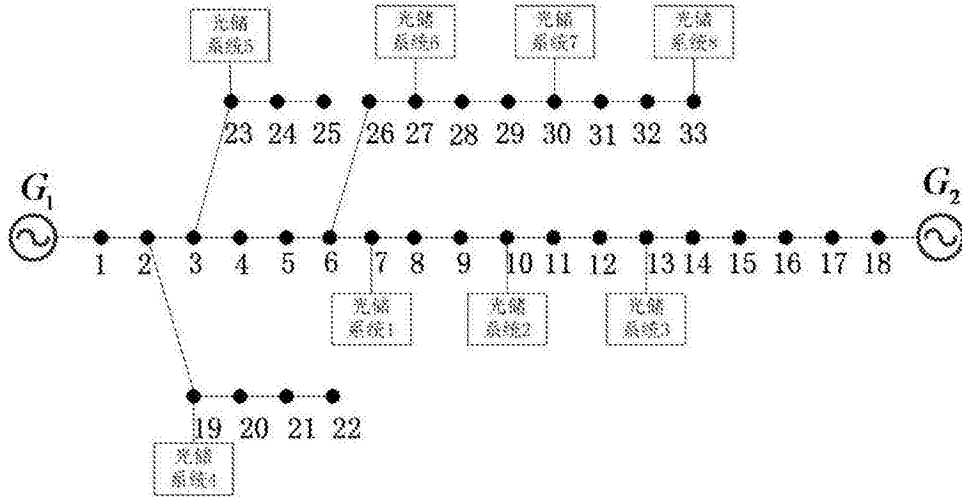


图2

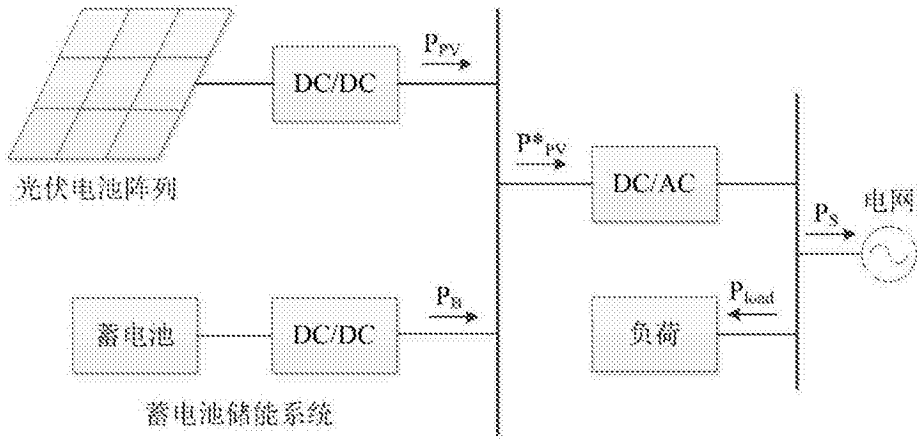


图3

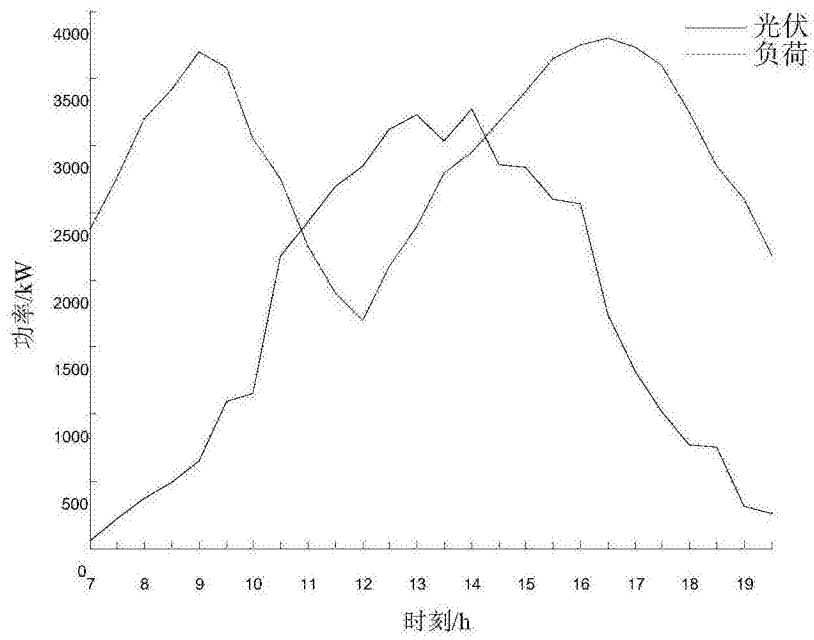


图4

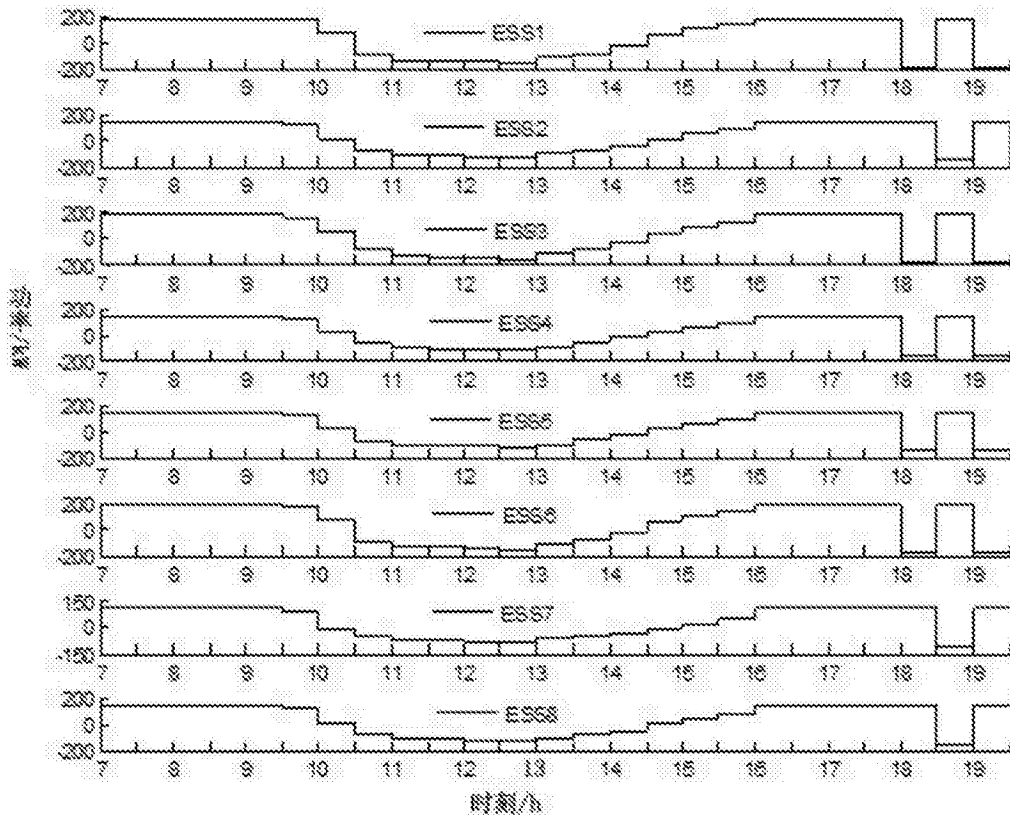


图5

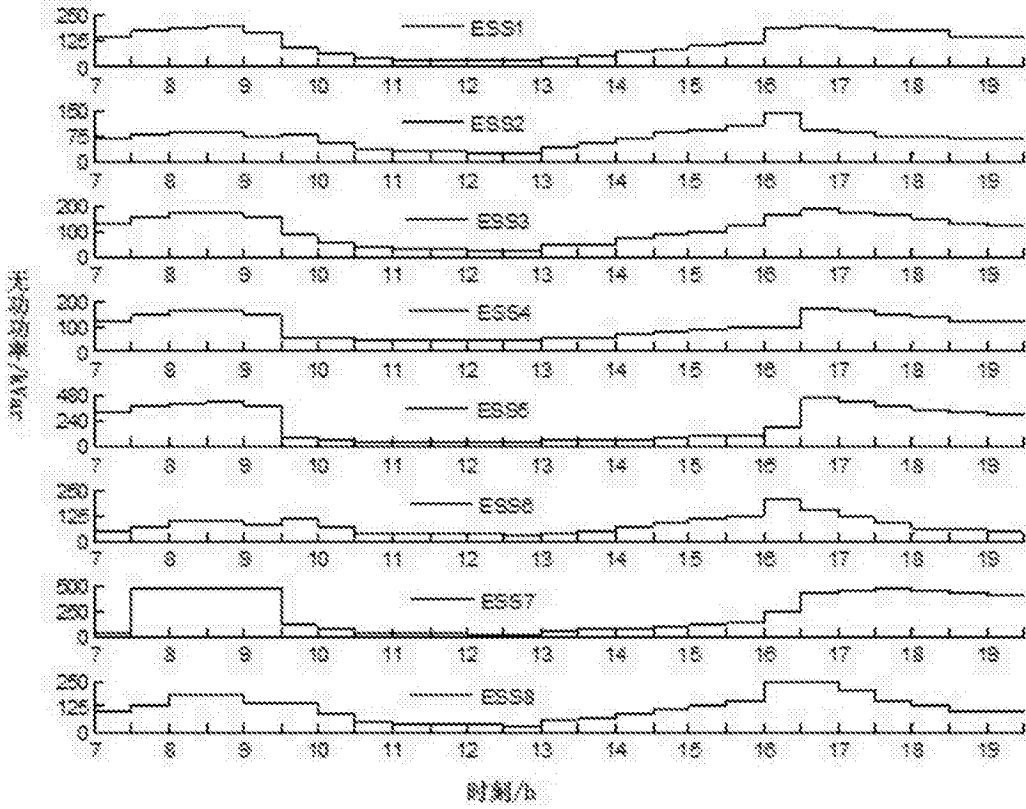


图6

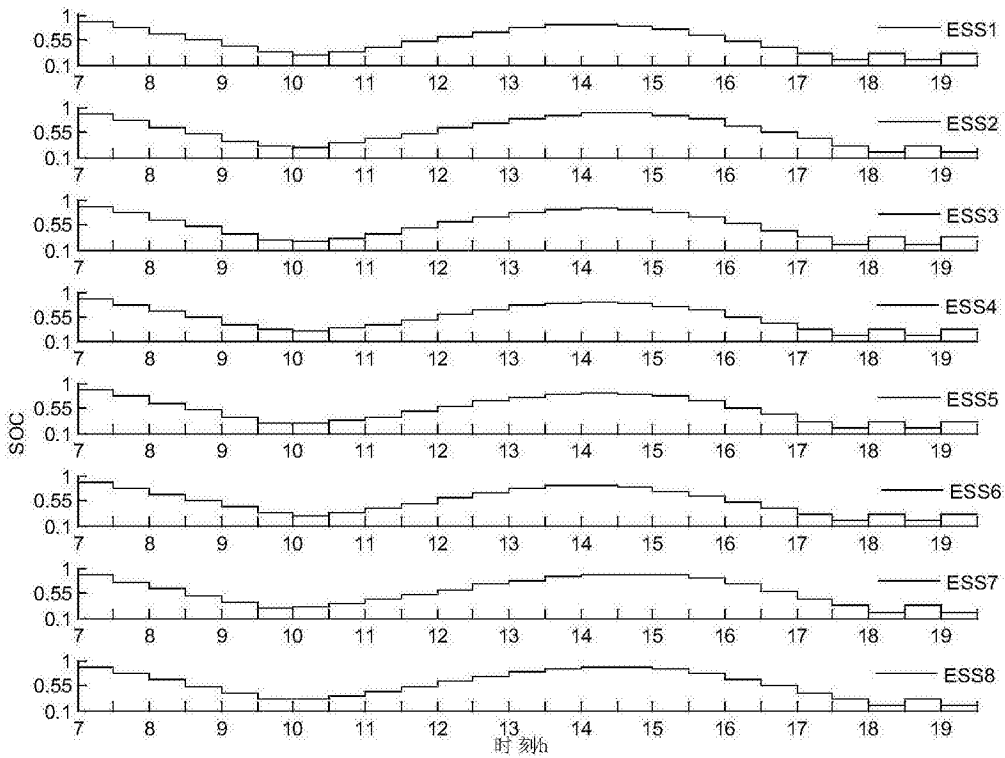


图7