



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105305489 B

(45)授权公告日 2018.03.23

(21)申请号 201510696027.3

(22)申请日 2015.10.23

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105305489 A

(43)申请公布日 2016.02.03

(73)专利权人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

(72)发明人 穆云飞 孟健 贾宏杰 余晓丹

(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代

理事务所 12201

代理人 程毓英

(51)Int.Cl.

H02J 3/38(2006.01)

H02J 3/02(2006.01)

(56)对比文件

EP 2056420 A1,2009.05.06,全文.

CN 102280903 B,2014.07.30,全文.

孟健等.实时电价下电动汽车变参与度动态频率控制策略.《电力建设》.2015,第36卷(第7期),第153-159页.

审查员 严开沁

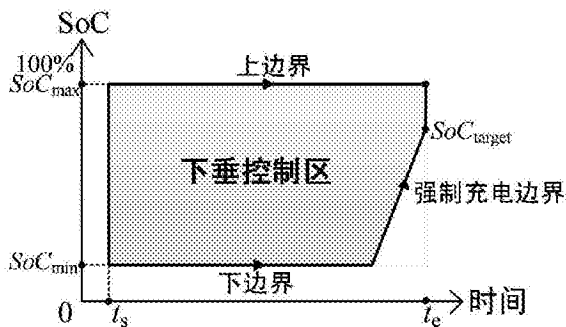
权利要求书2页 说明书4页 附图3页

(54)发明名称

一种电网需求侧响应资源频率响应能力评估方法

(57)摘要

本发明涉及一种电网需求侧响应资源频率响应能力评估方法,该方法将电动汽车的状态分为四种:双向可控状态,充电可控状态,反供电可控状态,不可控状态;确定各辆电动汽车的状态,若电动汽车充放电曲线位于充放电可行域内,则处于双向可控状态;若电动汽车充放电曲线位于上边界,则处于反供电可控状态;若电动汽车充放电曲线位于下边界,则处于充电可控状态;若电动汽车处于非停靠状态或其充放电曲线位于强制充电边界,则处于不可控状态;根据每辆电动汽车的状态将其分四个群;根据动态分群结果评估电动汽车频率响应能力.本发明可以反映每一时刻电动汽车总充放电功率可调节的区间和裕度。



1. 一种电网需求侧响应资源频率响应能力评估方法, 该评估方法适用的控制方法为:

步骤1: 识别当前时刻停靠电动汽车数量, 并设置停靠车辆用户需求参数:

设置电动汽车充电初始时间 $t_s$ ; 电动汽车预计出行时间 $t_e$ ; 电动汽车充电目标值 $SoC_{target}$ ;

步骤2: 识别停靠电动汽车充放电控制参数:

识别车载电池实时荷电状态 $SoC(t)$ ; 以防止过度放电为目标的最小荷电状态 $SoC_{min}$ ;

以防止过度充电为目标的最大荷电状态 $SoC_{max}$ ; 车载电池可接受最大充电功率 $P_{max}$ ; 车载电池容量 $E$ ;

步骤3: 计算每台停靠电动汽车初始充电功率 $P_0 = \frac{SoC_{target} - SoC_{start}}{t_e - t_s} \times E$ ;

步骤4: 识别电力系统实时频率 $f$ , 计算系统实时频率偏差 $\Delta f$ ;

步骤5: 对每辆可控电动汽车构建充放电可行域, 确定电动汽车充放电曲线位置;

根据 $t_s, t_e, SoC_{min}, SoC_{max}, SoC_{target}, P_{max}$ 构建电动汽车充放电可行域, 根据当前时间、当前充放电功率以及当前 $SoC$ 值, 确定充放电曲线位置;

位于上边界的判断条件为 $SoC(t) = SoC_{max}$ ;

位于下边界的判断条件为 $SoC(t) = SoC_{min}$ ;

位于强制充电边界的判断条件为 $SoC(t) = SoC_{target} - \frac{(t_e - t) \times P_{max}}{E}$ ,  $t$ 为当前时间;

若 $SoC_{min} < SoC(t) < SoC_{max}$ , 且 $SoC(t) > SoC_{target} - \frac{(t_e - t) \times P_{max}}{E}$ , 则充放电曲线的位置为位于充放电可行域内;

步骤6: 对每辆可控电动汽车构建强制充电区和下垂控制区, 确定充电功率;

第一步, 判断系统频率状态;

第二步, 根据系统频率状态构建强制充电区和下垂控制区, 包括两种情形:

1) 系统频率偏高即 $\Delta f \geq 0$ 时,

将充放电可行域划分为下垂控制区和强制充电区; 利用直角坐标系描述充放电可行域, 横轴为时间, 纵轴为车载电池 $SoC$ 值; 首先设定可控系数 $\alpha$ , 将强制充电边界向左平移 $\beta = \alpha \times |\Delta f|$ , 充放电可行域位于平移后与平移前边界之间的区域为强制充电区; 确定强制充电区后, 将充放电可行域内其余部分确定为下垂控制区; 可控系数的选取区间为 $\alpha \in [2000s/Hz, 4000s/Hz]$ , 为了达到最好的控制效果, 选取 $\alpha = 4000s/Hz$ ;

2) 当系统频率偏低 $\Delta f < 0$ 时, 充放电可行域均为下垂控制区;

第三步, 确定是否进行强制充电, 包括以下情形:

1) 若电动汽车充放电曲线位于强制充电区内, 则设置电动汽车充电功率为 $P_{max}$ ;

2) 若电动汽车充放电曲线位于强制充电边界上, 则设置电动汽车充电功率为 $P_{max}$ ;

第四步, 若不需强制充电, 计算下垂控制充放电功率 $P'$ , 包括以下情形:

设置 $k_+$ 和 $k_-$ 数值, 确定电动汽车充放电功率, 其中,  $k_+$ 为系统频率增加时用户增加充电功率的参与度,  $k_-$ 为系统频率降低时用户减少充电功率或增大反供电功率的参与度; 参数的选取区间为 $k_+ \in [5kW/Hz, 10kW/Hz]$ ,  $k_- \in [5kW/Hz, 10kW/Hz]$ ;

- 1) 设定阈值  $\Delta f_{db}$ , 若  $\Delta f \in [-\Delta f_{db}, \Delta f_{db}]$ , 则  $P' = P_0$ ;
- 2) 若  $\Delta f > \Delta f_{db}$ , 则  $P' = P_0 + k_+ \times \Delta f$ ; 若  $P' > P_{max}$ , 则  $P' = P_{max}$ ;
- 3) 若  $\Delta f < -\Delta f_{db}$ , 则  $P' = P_0 + k_- \times \Delta f$ ; 若  $P' < P_{min}$ , 则  $P' = P_{min}$ ;

第五步, 设置电动汽车充电功率  $P$ , 包括以下情形:

1) 若电动汽车充放电曲线位于下边界, 则设置电动汽车充电功率包括以下情形:

- ① 若  $P' > 0$ , 则  $P = P'$ ;
- ② 若  $P' \leq 0$ , 则  $P = 0$ ;

2) 若电动汽车充放电曲线位于上边界, 则设置电动汽车充电功率包括以下情形:

- ① 若  $P' < 0$ , 则  $P = P'$ ;
- ② 若  $P' \geq 0$ , 则  $P = 0$ ;

3) 若电动汽车充放电曲线位于下垂控制区, 则  $P = P'$ ;

此种控制方法的评估方法如下:

(1) 将电动汽车的状态分为四种: 双向可控状态, 充电可控状态, 反供电可控状态, 不可控状态, 处于双向可控状态的电动汽车可以调节充放电功率; 处于充电可控状态的电动汽车可以调节充电功率, 而不能进行反供电; 处于反供电可控状态的电动汽车可以调节反供电功率, 而不能进行充电; 处于不可控状态的电动汽车的充放电功率不可控;

(2) 确定各辆电动汽车的状态, 若电动汽车充放电曲线位于充放电可行域内, 则处于双向可控状态; 若电动汽车充放电曲线位于上边界, 则处于反供电可控状态; 若电动汽车充放电曲线位于下边界, 则处于充电可控状态; 若电动汽车处于非停靠状态或其充放电曲线位于强制充电边界, 则处于不可控状态;

(3) 根据每辆电动汽车的状态将其分为四个群, 双向可控群, 充电可控群, 反供电可控群和不可控群;

(4) 根据动态分群结果评估电动汽车频率响应能力, 包括以下步骤:

计算电动汽车负荷的充放电功率和其上下边界;

对于属于双向可控群的电动汽车, 其功率上边界为  $P_{max}$ , 功率下边界为  $P_{min}$ ; 对于属于充电可控群的电动汽车, 其功率上边界为  $P_{max}$ , 功率下边界为 0; 对于属于反供电可控群的电动汽车, 其功率上边界为 0, 功率下边界为  $P_{min}$ ; 对于属于不可控群的电动汽车, 其功率上、下边界均为实际充放电功率;

电动汽车负荷充放电功率及其上下边界计算方式为:

$$P_{充放电} = \sum_{i=1}^N P_i$$

$$P_{上边界} = \sum_{i=1}^N P_{i\_max}$$

$$P_{下边界} = \sum_{i=1}^N P_{i\_min}$$

其中,  $P_{充放电}$  为电动汽车负荷充放电功率;  $P_{上边界}$ 、 $P_{下边界}$  分别为电动汽车负荷充放电功率的上边界、下边界;  $P_i$  为第  $i$  辆电动汽车的充电功率;  $P_{i\_max}$ 、 $P_{i\_min}$  分别为第  $i$  辆电动汽车的充电功率的上边界、下边界;  $N$  为电动汽车总数目。

## 一种电网需求侧响应资源频率响应能力评估方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电网需求侧响应控制领域,尤其涉及一种电动汽车频率响应能力评估方法。

### 背景技术

[0002] 可再生能源发电的规模不断扩大,为电力系统提供了大量的清洁能源,缓解了环境压力,促进了经济社会的可持续发展。然而,从电力系统的供需平衡的角度,可再生能源具有间歇性的特点,大规模可再生能源的并网给电力系统稳定性带来了巨大的挑战。可再生能源的不稳定性既会增加系统的备用容量,增大了系统的运行成本,同时也会对电能质量产生很大的负面影响,如电网频率更加难以维持稳定。

[0003] 传统的调频手段配合储能系统,是目前常用的调节方法。储能装置在风电场和光伏发电系统都得到了广泛的应用,是新能源发电必须配备的辅助调节手段,也起到了一定的效果。然而,传统的调节手段不能有效地应对可再生能源并网带来的系统运行不稳定问题,而储能装置成本高、容量小的问题又在现阶段难以解决。因此,为确保可再生能源并网后系统的安全稳定运行,就必须有更加灵活有效的频率控制手段。

[0004] 大规模电动汽车的并网既是挑战也是机遇。一方面,电动汽车充电具有随机性,这种无序充电行为可能会产生新的负荷高峰,甚至与已有负荷高峰重合,设想数以百万计的电动汽车在结束一天的行程后,恰好在晚负荷高峰期几乎同时开始充电,将会对系统形成明显的冲击;另一方面,随着电力电子和控制技术的发展,电动汽车在vehicle-to-grid (V2G) 环境下可看成是一种移动分布式储能系统,在需要时通过电力电子接口实现向系统的快速充放电,辅助系统优化运行,是一种维护系统稳定运行的潜在可控资源,特别适合参与大规模间歇性新能源并网环境下电力系统的动态调频。

[0005] 在已有的国内外研究成果当中,电动汽车频率控制策略分为集中式控制策略和分散式控制策略。集中式控制策略是通过引入中间管理机构(如能效电厂等)将地理上分散的电动汽车组建为集群,并按照电网的需求进行统一优化调度管理,以实现整体控制效果最优,其缺点在于不能充分考虑用户差异化需求,同时需要依托于复杂的通信系统,响应速度较慢,投资成本较高。分散式控制策略是指电动汽车单体依据电网发布的频率、电价等信号进行充放电自我管理,为电网提供辅助调频服务。分散式控制策略的优势在于免去了复杂的优化过程,响应速度快且投资成本低,适合于快速的电力系统动态调频。

### 发明内容

[0006] 本发明针对一种引入强制充电边界的电动汽车频率响应控制方法,提供一种对电动汽车频率响应能力进行动态评估的方法。本发明在控制过程中对电动汽车进行动态分群,再根据分群结果对电动汽车频率响应能力实现动态评估。技术方案如下:

[0007] 一种电网需求侧响应资源频率响应能力评估方法,该评估方法适用的控制方法为:

[0008] 步骤1:识别当前时刻停靠电动汽车数量,并设置停靠车辆用户需求参数:

[0009] 设置电动汽车充电初始时间 $t_s$ ;电动汽车预计出行时间 $t_e$ ;电动汽车充电目标值 $SoC_{target}$ ;

[0010] 步骤2:识别停靠电动汽车充放电控制参数:

[0011] 识别车载电池实时荷电状态 $SoC(t)$ ;以防止过度放电为目标的最小荷电状态 $SoC_{min}$ ;

[0012] 以防止过度充电为目标的最大荷电状态 $SoC_{max}$ ;车载电池可接受最大充电功率 $P_{max}$ ;车载电池容量 $E$ ;

[0013] 步骤3:计算每台停靠电动汽车初始充电功率 $P_0 = \frac{SoC_{target} - SoC_{start}}{t_e - t_s} \times E$ ;

[0014] 步骤4:识别电力系统实时频率 $f$ ,计算系统实时频率偏差 $\Delta f$ ;

[0015] 步骤5:对每辆可控电动汽车构建充放电可行域,确定电动汽车充放电曲线位置;

[0016] 根据 $t_s, t_e, SoC_{min}, SoC_{max}, SoC_{target}, P_{max}$ 构建电动汽车充放电可行域,根据当前时间、当前充放电功率以及当前 $SoC$ 值,确定充放电曲线位置;

[0017] 位于上边界的判断条件为 $SoC(t) = SoC_{max}$ ;

[0018] 位于下边界的判断条件为 $SoC(t) = SoC_{min}$ ;

[0019] 位于强制充电边界的判断条件为 $SoC(t) = SoC_{target} - \frac{(t_e - t) \times P_{max}}{E}$ ,  $t$ 为当前时间;

[0020] 若 $SoC_{min} < SoC(t) < SoC_{max}$ ,且 $SoC(t) > SoC_{target} - \frac{(t_e - t) \times P_{max}}{E}$ ,则充放电曲线的位置为位于充放电可行域内;

[0021] 步骤6:对每辆可控电动汽车构建强制充电区和下垂控制区,确定充电功率;

[0022] 第一步,判断系统频率状态;

[0023] 第二步,根据系统频率状态构建强制充电区和下垂控制区,包括两种情形:

[0024] 1) 系统频率偏高即 $\Delta f \geq 0$ 时,

[0025] 将充放电可行域划分为下垂控制区和强制充电区;利用直角坐标系描述充放电可行域,横轴为时间,纵轴为车载电池 $SoC$ 值;首先设定可控系数 $\alpha$ ,将强制充电边界向左平移 $\beta = \alpha \times |\Delta f|$ ,充放电可行域位于平移后与平移前边界之间的区域为强制充电区;确定强制充电区后,将充放电可行域内其余部分确定为下垂控制区;可控系数的选取区间为 $\alpha \in [2000s/Hz, 4000s/Hz]$ ,为了达到最好的控制效果,选取 $\alpha = 4000s/Hz$ ;

[0026] 2) 当系统频率偏低 $\Delta f < 0$ 时,充放电可行域均为下垂控制区;

[0027] 第三步,确定是否进行强制充电,包括以下情形:

[0028] 1) 若电动汽车充放电曲线位于强制充电区内,则设置电动汽车充电功率为 $P_{max}$ ;

[0029] 2) 若电动汽车充放电曲线位于强制充电边界上,则设置电动汽车充电功率为 $P_{max}$ ;

[0030] 第四步,若不需强制充电,计算下垂控制充放电功率 $P'$ ,包括以下情形:

[0031] 设置 $k_+$ 和 $k_-$ 数值,确定电动汽车充放电功率,其中, $k_+$ 为系统频率增加时用户增加充电功率的参与度, $k_-$ 为系统频率降低时用户减少充电功率或增大反供电功率的参与度;参数的选取区间为 $k_+ \in [5kW/Hz, 10kW/Hz]$ , $k_- \in [5kW/Hz, 10kW/Hz]$ ;

[0032] 1) 设定阈值  $\Delta f_{db}$ , 若  $\Delta f \in [-\Delta f_{db}, \Delta f_{db}]$ , 则  $P' = P_0$ ;

[0033] 2) 若  $\Delta f > \Delta f_{db}$ , 则  $P' = P_0 + k_+ \times \Delta f$ ; 若  $P' > P_{max}$ , 则  $P' = P_{max}$ ;

[0034] 3) 若  $\Delta f < -\Delta f_{db}$ , 则  $P' = P_0 + k_- \times \Delta f$ ; 若  $P' < P_{min}$ , 则  $P' = P_{min}$ ;

[0035] 第五步, 设置电动汽车充电功率  $P$ , 包括以下情形:

[0036] 1) 若电动汽车充放电曲线位于下边界, 则设置电动汽车充电功率包括以下情形:

[0037] ①若  $P' > 0$ , 则  $P = P'$ ;

[0038] ②若  $P' \leq 0$ , 则  $P = 0$ ;

[0039] 2) 若电动汽车充放电曲线位于上边界, 则设置电动汽车充电功率包括以下情形:

[0040] ①若  $P' < 0$ , 则  $P = P'$ ;

[0041] ②若  $P' \geq 0$ , 则  $P = 0$ ;

[0042] 3) 若电动汽车充放电曲线位于下垂控制区, 则  $P = P'$ ;

[0043] 此种控制方法的评估方法如下:

[0044] (1) 将电动汽车的状态分为四种: 双向可控状态, 充电可控状态, 反供电可控状态, 不可控状态, 处于双向可控状态的电动汽车可以调节充放电功率; 处于充电可控状态的电动汽车可以调节充电功率, 而不能进行反供电; 处于反供电可控状态的电动汽车可以调节反供电功率, 而不能进行充电; 处于不可控状态的电动汽车的充放电功率不可控;

[0045] (2) 确定各辆电动汽车的状态, 若电动汽车充放电曲线位于充放电可行域内, 则处于双向可控状态; 若电动汽车充放电曲线位于上边界, 则处于反供电可控状态; 若电动汽车充放电曲线位于下边界, 则处于充电可控状态; 若电动汽车处于非停靠状态或其充放电曲线位于强制充电边界, 则处于不可控状态;

[0046] (3) 根据每辆电动汽车的状态将其分为四个群, 双向可控群, 充电可控群, 反供电可控群和不可控群;

[0047] (4) 根据动态分群结果评估电动汽车频率响应能力, 包括以下步骤:

[0048] 计算电动汽车负荷的充放电功率和其上下边界;

[0049] 对于属于双向可控群的电动汽车, 其功率上边界为  $P_{max}$ , 功率下边界为  $P_{min}$ ; 对于属于充电可控群的电动汽车, 其功率上边界为  $P_{max}$ , 功率下边界为 0; 对于属于反供电可控群的电动汽车, 其功率上边界为 0, 功率下边界为  $P_{min}$ ; 对于属于不可控群的电动汽车, 其功率上、下边界均为实际充放电功率;

[0050] 电动汽车负荷充放电功率及其上下边界计算方式为:

$$[0051] \quad P_{\text{充放电}} = \sum_{i=1}^N P_i$$

$$[0052] \quad P_{\text{上边界}} = \sum_{i=1}^N P_{i\_max}$$

$$[0053] \quad P_{\text{下边界}} = \sum_{i=1}^N P_{i\_min}$$

[0054] 其中,  $P_{\text{充放电}}$  为电动汽车负荷充放电功率;  $P_{\text{上边界}}$ 、 $P_{\text{下边界}}$  分别为电动汽车负荷充放电功率的上边界、下边界;  $P_i$  为第  $i$  辆电动汽车的充电功率;  $P_{i\_max}$ 、 $P_{i\_min}$  分别为第  $i$  辆电动汽车的充电功率的上边界、下边界;  $N$  为电动汽车总数目。

[0055] 本发明基于一种电动汽车动态调频控制方法, 给出其电动汽车负荷调频能力的评

估方法,评估参数包括电动汽车负荷总的实时充放电功率及其上下边界,反映了每一时刻电动汽车总充放电功率可调节的区间和裕度。

### 附图说明

- [0056] 图1是频率下垂控制策略示意图;
- [0057] 图2是电动汽车充放电可行域示意图;
- [0058] 图3是风力发电曲线图;
- [0059] 图4是双向可控电动汽车数量图;
- [0060] 图5是充电可控电动汽车数量图;
- [0061] 图6是反供电可控电动汽车数量图;
- [0062] 图7是不可控电动汽车数量图;
- [0063] 图8是电动汽车调频效果图;
- [0064] 图9是电动汽车调频能力评估结果图;
- [0065] 图10是简化的电力系统频率研究模型图。

### 具体实施方式

[0066] 本发明以电动汽车为例,在大规模风电并网的环境下,研究本发明在参与一个实际大电网动态调频时的控制效果,并分析电动汽车参与频率控制对传统发电机出力的影响。在SIMULINK仿真平台上搭建简化的电力系统频率研究模型如图10所示。

[0067] 设定算例中参与大电网频率控制的电动汽车聚合体含55万辆电动汽车,根据上述模型将其接入大电网测试系统。在大规模风电并网的环境下,风电出力波动如图3所示。由于风电具有间歇性,会在电网中产生频率偏差 $\Delta f$ 。根据电网频率的动态变化对电动汽车的充放电进行控制,参与系统的频率响应。在控制过程中对电动汽车进行动态分群,动态分群结果如图4-8所示,图4为双向可控群电动汽车数量,图5为充电可控群电动汽车数量,图6为反供电可控群电动汽车数量,图7为不可控群电动汽车数量。

[0068] 电动汽车频率控制效果如图8所示,在没有电动汽车控制情况下,电力系统频率出现较大波动。在有电动汽车控制情况下,电动汽车频率波动有所减小。在夜晚(18:00~6:00)频率控制效果较好,频率波动抑制效果明显;在白天(6:00~18:00)频率控制效果较差,频率波动抑制效果不明显。

[0069] 电动汽车调频能力评估结果如图9所示。在夜晚(18:00~6:00)电动汽车充放电功率可调节区间和裕度较大,在白天(6:00~18:00)电动汽车充放电功率可调节区间和裕度较小。评估结果与频率控制效果一致。

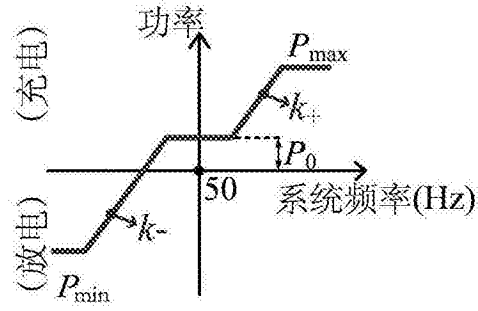


图1

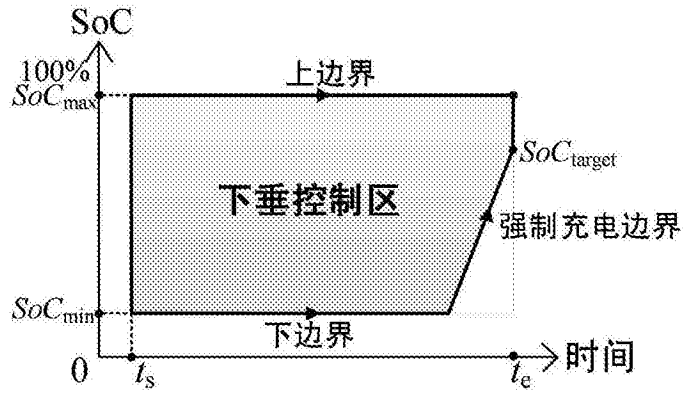


图2

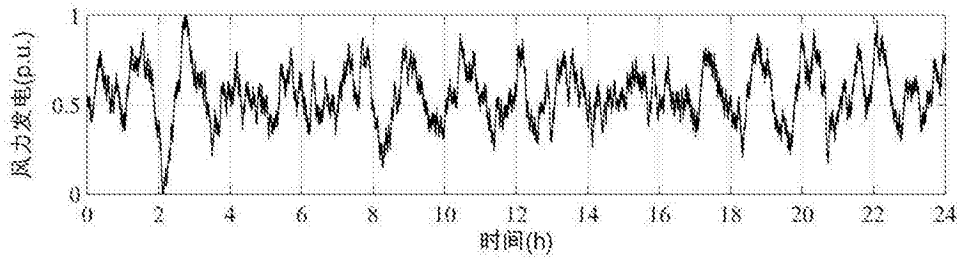


图3

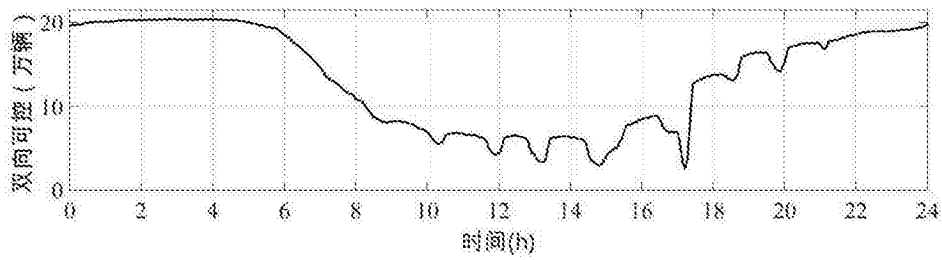


图4



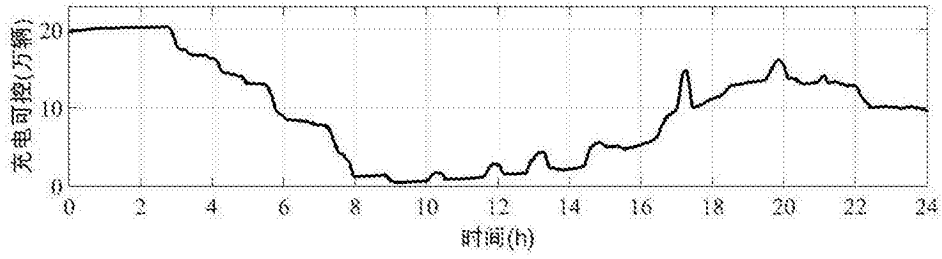


图5

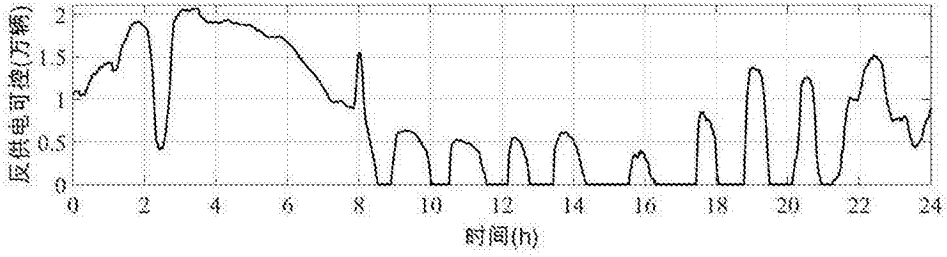


图6

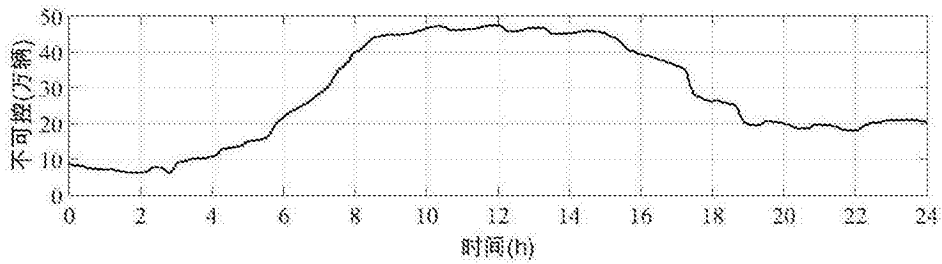


图7

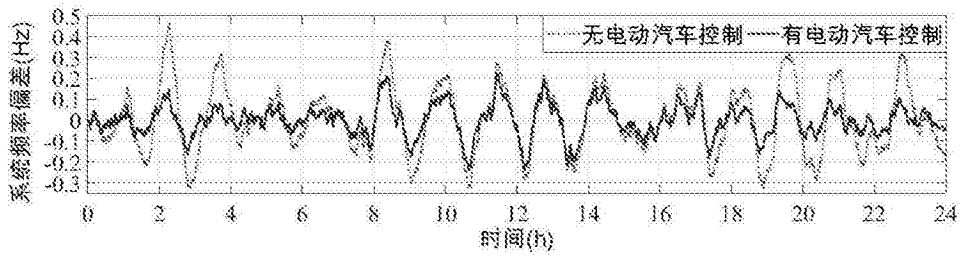


图8

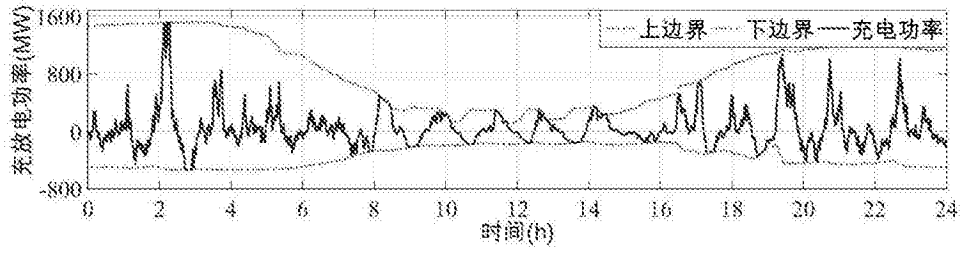


图9

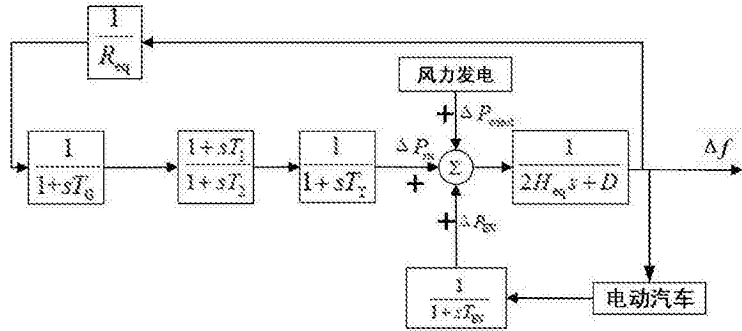


图10