



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103887816 A

(43) 申请公布日 2014. 06. 25

(21) 申请号 201410063914. 2

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2014. 02. 25

H02J 3/38(2006. 01)

(71) 申请人 国家电网公司

H02J 3/28(2006. 01)

地址 100031 北京市西城区西长安街 86 号
申请人 国网河北省电力公司电力科学研究院
河北省电力建设调整试验所

(72) 发明人 高志强 褚华宇 范辉 孟良
孙中记 梁宾 杨潇

(74) 专利代理机构 石家庄新世纪专利商标事务
所有限公司 13100

代理人 杨钦祥 张素静

权利要求书3页 说明书7页 附图4页

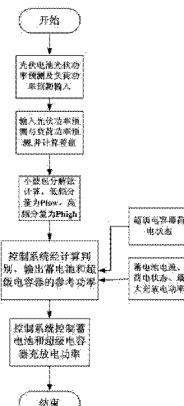
(54) 发明名称

一种基于功率预测的多元复合储能系统并网
控制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于功率预测的多元复合储能系统并网控制方法，其步骤如下：(1)根据光伏输出功率预测值 $P_{v,p}$ 和负荷功率的预测值 P_l ，计算二者差值 P_{v-l} ；(2)利用小波包分解方法，将 P_{v-l} 映射到 m 个小波包子空间中，得到不同频率信号；(3)将频率信号中与蓄电池的响应频率相近的频率信号作为低频信号 P_{low} ， P_{low} 由蓄电池补偿；剩余的频率信号以及未被电池吸收的频率信号作为高频信号 P_{high} ， P_{high} 由超级电容器补偿；

(4)采用外环功率控制、内环电流控制方法，根据具体情况利用超级电容器的荷电状态和蓄电池的电流、荷电状态、最大充放电功率，输出蓄电池和超级电容器的实时功率，控制蓄电池和超级电容器的充放电功率；本发明的优点是安全稳定、经济运行，蓄电池充放电次数减少。



1. 一种基于功率预测的多元复合储能系统并网控制方法,其特征在于步骤如下:

步骤一:根据光伏电池组件的光伏输出功率预测值 P_V 和负荷功率的预测值 P_L ,计算二者差值 $P_{V-L} = P_V - P_L$;

步骤二:利用小波包分解方法,将差值信号 P_{V-L} 映射到 m 个小波包子空间中,对 P_{V-L} 进行分解,得到不同频率的信号;

步骤三:从经小波包分解法后得到频率信号中选出与蓄电池的响应频率相近的频率信号作为低频信号 P_{low} , P_{low} 由蓄电池补偿;剩余的频率信号以及未被电池吸收的频率信号作为高频信号 P_{high} , P_{high} 由超级电容器补偿;

步骤四:并网运行模式下,蓄电池和超级电容器采用双环控制策略,即外环功率控制、内环电流控制的控制方法,利用超级电容器的荷电状态和蓄电池的电流、荷电状态、最大充放电功率,输出蓄电池和超级电容器的实时功率,控制蓄电池和超级电容器的充放电功率,根据具体情况采取如下操作:

设光伏电池输出功率为 P_V , 蓄电池功率为 P_B , 超级电容器功率为 P_E , 并网时电网与微电网的交换功率为 P_x , 负荷功率为 P_L , SOC_B 为蓄电池荷电状态, i_B 为蓄电池电流, SOC_{BMAX} 为蓄电池荷电状态最大值, SOC_{BMIN} 为蓄电池荷电状态最小值, SOC_{Eddc} 为超级电容器荷电状态, 光伏功率输出与负荷功率的差值经小波包分解后的低频信号为 P_{low} , 高频信号为 P_{high} ; 当 $0 < P_V \leq P_L$, $SOC_B \leq SOC_{BMIN}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况:当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Eddc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_E = P_{high}$, 此时电网平抑光伏功率的低频波动;当 $SOC_{Eddc} > SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{BMAX}$, $P_E = P_{high} + P_{EMAX}$, 此时电网平抑光伏功率的低频波动,超级电容向蓄电池充电,并且平抑光伏功率高频波动;

当 $0 < P_V \leq P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况:当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Eddc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = P_{low}$, $P_E = P_{high}$;当 $SOC_{Eddc} > SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_E = P_{high} + P_{low}$;

当 $P_V > P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况:当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Eddc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = P_{BMAX}$, $P_E = -P_{high}$;当 $SOC_{Eddc} > SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_E = -P_{high} + P_{low}$;

当 $P_V > P_L$, $SOC_B \leq SOC_{BMIN}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况:当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Eddc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{low}$, $P_E = -P_{high}$;当 $SOC_{Eddc} > SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_E = -P_{high} + P_{EMAX}$;

当 $P_V > P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况:当

$SOC_{EMIN} \leq SOC_{Edic} \leq SOC_{EMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{low}$, $P_F = -P_{high}$; 当 $SOC_{Edic} > SOC_{EMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_F = -P_{high} + P_{EMAX}$;

当 $P_V > P_I$, $SOC_B \geq SOC_{EMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{EMAX} \leq SOC_{Edic} \leq SOC_{EMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_F = -P_{high}$, 此时电网平抑光伏功率低频波动; 当 $SOC_{Edic} > SOC_{EMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_F = -P_{high} + P_0$, 此时, 光伏功率低频部分波动由电网平抑, 高频部分波动由超级电容平抑, 并且超级电容以一定的稳定功率值 P_0 向电网放电;

当 $0 < P_V \leq P_I$, $SOC_{EMIN} < SOC_B < SOC_{EMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{EMIN} \leq SOC_{Edic} \leq SOC_{EMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_F = P_{high}$, 此时电网向微电网输送功率, 不仅平抑光伏低频波动, 而且为蓄电池充电; 当 $SOC_{Edic} > 0.85$ 时, 则 $P_B = -(P_{EMAX} - P_{high})$, $P_F = P_{EMAX}$, 其中 P_{EMAX} 为超级电容器允许最大输出功率, 此时光伏功率的低频功率波动由电网功率平抑;

当 $0 < P_V \leq P_I$, $SOC_B \geq SOC_{EMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{EMIN} \leq SOC_{Edic} \leq SOC_{EMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_F = -P_{high}$, 此时电网向微电网输送功率, 平抑光伏低频波动; 当 $SOC_{Edic} > SOC_{EMAX}$ 时, 则 $P_B = 0$, $P_F = -P_{high}$, 此时光伏功率的低频功率波动由电网功率平抑;

当 $P_V = 0$, $SOC_B \geq SOC_{EMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 检测光伏逆变器是否以光伏最大功率输出, 当光伏逆变器控制输出功率小于当前时刻光伏最大输出功率时, 则控制系统控制光伏逆变器增大光伏功率输出; 当逆变器已经控制光伏功率以当前最大功率输出, 则检测超级电容荷电状态 SOC_{Edic} ,

若 $SOC_{Edic} > 0.2$, 则首先控制超级电容器放电, 使 $P_F = P_I$, $P_B = 0$;

若 $SOC_{Edic} \leq 0.2$, 则控制蓄电池放电, 使 $P_B = P_I$, $P_F = 0$;

(10) 当 $P_V = 0$, $SOC_B \leq SOC_{EMIN}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{Edic} \leq 0.2$, 检测光伏逆变器是否以光伏最大功率输出, 如果光伏逆变器控制输出功率小于当前光伏最大输出功率, 则控制系统控制光伏逆变器增大光伏功率输出, 如果逆变器已经控制光伏功率以当前最大功率输出, 则此时使蓄电池和超级电容都停止放电, 即令 $P_B = 0$, $P_F = 0$, 由电网侧向负荷提供电能。

2. 根据权利要求 1 所述的基于功率预测的多元复合储能系统并网控制方法, 其特征在于: 对于所述蓄电池和超级电容采用外环功率控制、内环电流控制的方法得到蓄电池和超级电容器的实时功率 P , 并使其不断接近最终达到给定有功功率 P_{ref} 的具体步骤如下:

(1) 对于蓄电池:

通过电压互感器和电流互感器采集蓄电池接入交流母线处的电压、电流值, 所述电压、

电流值分别经过派克变换后获得直轴分量 U_d 、 I_d 和交轴分量 U_q 、 I_q ，直轴电压、电流相乘为有功功率 P，交轴电压、电流相乘为无功功率 Q，所述有功功率 P 即实时功率 P，将有功功率 P 和无功功率 Q 分别与其给定有功功率 P_{ref} 、给定无功功率 Q_{ref} （设置为 0）做减法运算，差值分别为 $\Delta P=P-P_{ref}$ 和 $\Delta Q=Q-Q_{ref}$ ，将 ΔP 和 ΔQ 分别输入比例积分环节 PI 后通过派克反变换得到外环输出电流，即内环电流给定值 i_{ref} ；此时所述给定有功功率 P_{ref} 由蓄电池功率 P_B 给定；

蓄电池的直流输出电流经逆变器逆变为交流电流 i，所述交流电流 i 与 i_{ref} 经减法运算得到差值 ΔI ，所述差值 ΔI 依次经过滤波环节、限幅环节后输入到 PWM 发生器，所述 PWM 发生器的输出信号作为逆变器的触发信号输入逆变器，逆变器根据触发信号调节由蓄电池逆变的交流电流 i 的大小，从而完成电流内环的控制；所述由蓄电池逆变的交流电流 i 输入到派克变换的电流输入端，继续重复上述变换控制过程即为外环功率控制部分；

(2) 对于超级电容：

与蓄电池的控制方法类似，不同点在于外环通过电压互感器和电流互感器采集超级电容接入交流母线处的电压、电流值，然后经过与蓄电池控制相同的控制过程，此时所述给定有功功率 P_{ref} 由超级电容器功率 P_x 给定；从而控制超级电容器的功率输出的大小。

一种基于功率预测的多元复合储能系统并网控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于功率预测的多元复合储能系统并网控制方法,属于分布式发电、储能、功率预测、小波分析、光伏发电、微电网及新能源发电技术领域,是适用于多元复合储能系统的控制策略。

背景技术

[0002] 目前微电网的控制策略的发展和应用还不成熟,需要进一步的改进和探索,现阶段为微电网并网提供储能的主要设备为超级电容器和蓄电池;超级电容具有功率密度大、循环使用寿命长、充电时间短、可靠性高、能量密度低的特点,而蓄电池能量密度大,可以大容量储能,但是不适合频繁充放,通过将这两种储能装置优势互补,由于技术原因没有结合应用。

发明内容

[0003] 本发明所要解决的技术问题是提供了一种安全稳定、经济运行,减少蓄电池充放电次数的基于功率预测的多元复合储能系统并网控制方法。

[0004] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案:

本方法的具体步骤如下:

步骤一:根据光伏电池组件的光伏输出功率预测值 P_V 和负荷功率的预测值 P_L ,计算二者差值 $P_{V-L} = P_V - P_L$;

步骤二:利用小波包分解方法,将差值信号 P_{V-L} 映射到m个小波包子空间中,对 P_{V-L} 进行分解,得到不同频率的频率信号;

步骤三:从经小波包分解法后得到频率信号中选出与蓄电池的响应频率相近的频率信号作为低频信号 P_{low} , P_{low} 由蓄电池补偿;剩余的频率信号以及未被电池吸收的频率信号作为高频信号 P_{high} , P_{high} 由超级电容器补偿;

步骤四:并网运行模式下,蓄电池和超级电容器采用双环控制策略,即外环功率控制、内环电流控制的控制方法,利用超级电容器的荷电状态和蓄电池的电流、荷电状态、最大充放电功率,输出蓄电池和超级电容器的实时功率,控制蓄电池和超级电容器的充放电功率,根据具体情况采取如下操作:

设光伏电池输出功率为 P_V ,蓄电池功率为 P_B ,超级电容器功率为 P_E ,并网时电网与微电网的交换功率为 P ,负荷功率为 P_L , SOC_B 为蓄电池荷电状态, i_B 为蓄电池电流, SOC_{BMAX} 为蓄电池荷电状态最大值, SOC_{BMIN} 为蓄电池荷电状态最小值, SOC_{Emin} 为超级电容器荷电状态,光伏功率输出与负荷功率的差值经小波包分解后的低频信号为 P_{low} ,高频信号为 P_{high} 。

[0005] (1) 当 $0 < P_v \leq P_L$, $SOC_B \leq SOC_{BMIN}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Bdc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_x = P_{high}$, 此时电网平抑光伏功率的低频波动; 当 $SOC_{Bdc} > SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_x = P_{high} + P_{EMAX}$, 此时电网平抑光伏功率的低频波动, 超级电容向蓄电池充电, 并且平抑光伏功率高频波动;

(2) 当 $0 < P_v \leq P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Bdc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = P_{low}$, $P_x = P_{high}$; 当 $SOC_{Bdc} > SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_x = P_{high} + P_{low}$;

(3) 当 $P_v > P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Bdc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = P_{EMAX}$, $P_x = -P_{high}$; 当 $SOC_{Bdc} > SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_x = -P_{high} + P_{low}$;

(4) 当 $P_v > P_L$, $SOC_B \leq SOC_{BMIN}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Bdc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{low}$, $P_x = -P_{high}$; 当 $SOC_{Bdc} > SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_x = -P_{high} + P_{EMAX}$;

(5) 当 $P_v > P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Bdc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{low}$, $P_x = -P_{high}$; 当 $SOC_{Bdc} > SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_x = -P_{high} + P_{EMAX}$;

(6) 当 $P_v > P_L$, $SOC_B \geq SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Bdc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_x = -P_{high}$, 此时电网平抑光伏功率低频波动; 当 $SOC_{Bdc} > SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_x = -P_{high} + P_0$, 此时, 光伏功率低频部分波动由电网平抑, 高频部分波动由超级电容平抑, 并且超级电容以一定的稳定功率值 P_0 向电网放电;

(7) 当 $0 < P_v \leq P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Bdc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_x = P_{high}$, 此时电网向微电网输送功率, 不仅平抑光伏低频波动, 而且为蓄电池充电; 当 $SOC_{Bdc} > 0.85$ 时, 则 $P_B = -(P_{EMAX} - P_{high})$, $P_x = P_{EMAX}$, 其中 P_{EMAX} 为超级电容器允许最大输出功率, 此时光伏功率的低频功率波动由电网功率平抑;

(8) 当 $0 < P_v \leq P_L$, $SOC_B \geq SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况: 当 $SOC_{BMIN} \leq SOC_{Bdc} \leq SOC_{BMAX}$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_x = -P_{high}$, 此时电网向微电网

输送功率,平抑光伏低频波动;当 $SOC_{Edu} > SOC_{BMAX}$ 时,则 $P_B = 0$, $P_F = -P_{high}$,此时光伏功率的低频功率波动由电网功率平抑;

(9)当 $P_V = 0$, $SOC_B \geq SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时,检测光伏逆变器是否以光伏最大功率输出,当光伏逆变器控制输出功率小于当前时刻光伏最大输出功率时,则控制系统控制光伏逆变器增大光伏功率输出;当逆变器已经控制光伏功率以当前最大功率输出,则检测超级电容荷电状态 SOC_{Edu} ,

①若 $SOC_{Edu} > SOC_{BMIN}$,则首先控制超级电容器放电,使 $P_F = P_I$, $P_B = 0$;

②若 $SOC_{Edu} \leq SOC_{BMIN}$,则控制蓄电池放电,使 $P_B = P_I$, $P_F = 0$;

(10)当 $P_V = 0$, $SOC_B \leq SOC_{BMIN}$, $i_B \geq 0$ 时,分两种情况:当 $SOC_{Edu} \leq SOC_{BMIN}$,检测光伏逆变器是否以光伏最大功率输出,如果光伏逆变器控制输出功率小于当前光伏最大输出功率,则控制系统控制光伏逆变器增大光伏功率输出,如果逆变器已经控制光伏功率以当前最大功率输出,则此时使蓄电池和超级电容都停止放电,即令 $P_B = 0$, $P_F = 0$,由电网侧向负荷提供电能。

[0006]对于所述蓄电池和超级电容采用外环功率控制、内环电流控制的方法得到蓄电池和超级电容器的实时功率 P,并使其不断接近最终达到给定有功功率 P_{ref} 的具体步骤如下:

(1) 对于蓄电池:

通过电压互感器和电流互感器采集蓄电池接入交流母线处的电压、电流值,所述电压、电流值分别经过派克变换后获得直轴分量 U_d 、 I_d 和交轴分量 U_q 、 I_q ,直轴电压、电流相乘为有功功率 P,交轴电压、电流相乘为无功功率 Q,所述有功功率 P 即实时功率 P,将有功功率 P 和无功功率 Q 分别与其给定有功功率 P_{ref} 、给定无功功率 Q_{ref} (设置为 0) 做减法运算,差值分别为 $\Delta P = P - P_{ref}$ 和 $\Delta Q = Q - Q_{ref}$,将 ΔP 和 ΔQ 分别输入比例积分环节 PI 后通过派克反变换得到外环输出电流,即内环电流给定值 i_{ref} ;此时所述给定有功功率 P_{ref} 由蓄电池功率 P_B 给定;

蓄电池的直流输出电流经逆变器逆变为交流电流 i,所述交流电流 i 与 i_{ref} 经减法运算得到差值 ΔI ,所述差值 ΔI 依次经过滤波环节、限幅环节后输入到 PWM 发生器,所述 PWM 发生器的输出信号作为逆变器的触发信号输入逆变器,逆变器根据触发信号调节由蓄电池逆变的交流电流 i 的大小,从而完成电流内环的控制;所述由蓄电池逆变的交流电流 i 输入到派克变换的电流输入端,继续重复上述变换控制过程即为外环功率控制部分;

(2) 对于超级电容:

与蓄电池的控制方法类似,不同点在于外环通过电压互感器和电流互感器采集超级电容接入交流母线处的电压、电流值,然后经过与蓄电池控制相同的控制过程,此时所述给定有功功率 P_{ref} 由超级电容器功率 P_F 给定;从而控制超级电容器的功率输出的大小。

[0007]本发明所产生的积极效果如下:

(1)本方法将优势互补的两种储能装置相结合,可以满足含有间歇式电源的微电网的控制需求,充分发挥了超级电容器快速充放电的优势,避免了蓄电池频繁充放电,延长了蓄

电池使用寿命,提高了微电网的稳定性、经济性,为大规模推广和发展新能源、分布式发电技术、微电网技术奠定了基础;

(2) 本方法采用 MATLAB/SIMULINK 仿真技术、电力电子技术、储能技术、自动控制技术、电能质量、功率预测技术、负荷预测技术、太阳能发电技术、微电网技术、小波分析技术使微电网控制系统安全稳定、经济运行,减少蓄电池充放电次数;

(3) 本方法通过光伏功率预测及负荷功率预测曲线,可以预测储能装置的出力需求;

(4) 本方法保证储能装置有足够的裕度实现平抑功率波动、稳定电压的控制目标,保证负荷有安全可靠的电能供应;

(5) 本方法能够延长储能装置的使用寿命、充分发挥不同储能装置的特性,避免过充、过放现象;

(6) 采用本方法并网运行时,可以作为大电网电能的有效补充,实现削峰填谷的功能;

(7) 本方法有利于微电网电能质量的提高,促进微电网安全可靠运行。

附图说明

[0008] 图 1 为本发明的方法流程图;

图 2 为本发明的外环功率控制原理图;

图 3 为本发明的内环电流控制原理图;

图 4 为本发明的微电网结构原理图;

图 5 为本发明的实施例中三层小波包分解示意图;

图 6 为本发明的实施例中晴天光伏预测功率与负荷功率曲线示意图;

图 7 为本发明的实施例中多云天气光伏预测功率与负荷功率曲线示意图;

图 8 为本发明的实施例中阴天光伏预测功率与负荷功率曲线示意图。

具体实施方式

[0009] 下面结合附图 1~8 和实施例对本发明进行进一步说明:

微电网控制系统结构原理如图 4 所示,蓄电池、超级电容器和光伏电池组件通过 AC/DC 接入电网母线,负荷直接接入电网母线,控制系统利用数据采集得到如图 2~3 输入的电压值 U、电流值 I,控制系统分别输出控制蓄电池、超级电容器和光伏电池组件所对应的 AC/DC,所述控制系统的输出还控制负荷的变化。

[0010] 由图 1~8 所示的实施例可知,本实施例的主要步骤如下:

步骤一:根据图 6~8 中光伏电池组件的光伏输出功率预测值 P_V 和负荷功率预测值 P_L ,

计算二者差值 $P_{V-L} = P_V - P_L$;

步骤二:利用小波包分解方法,将差值信号 P_{V-L} 映射到 m 个小波包子空间中,根据如下公式(1)~(3)对 P_{V-L} 进行分解,得到不同频率的频率信号;

$$m = 2^j \quad (1)$$

$$d_l(j, 2n) = \sum_k h_{k-2l} d_k(j-l, n) \quad n = 0, 1, \dots, 2^k - 1 \quad (2)$$

$$d_i(j, 2n+1) = \sum_k g_{i-2k}^* d_k(j-1, n) \quad n = 0, 1, \dots, 2^x - 1 \quad (3)$$

其中, j 表示分解层数;

m 表示小波包子空间的个数;

$d_i(j, 2n), d_i(j, 2n+1)$ 分别表示小波包分解系数;

g_{i-2k}^*, h_{i-2k}^* 分别表示小波包分解的低通、高通滤波器组;

如图 5 为三层小波包分解示意图, 其中 S 表示被处理的原始信号, $S_{j,i}$ 为不同频率的信号, 其中 j 为分解层数, i 为小波包空间编号, 本实施例采用 DB9 小波对光伏电池组件的输出功率预测值 P_v 与微电网负荷功率预测值 P_L 的信号差值 P_{v-L} 进行分解, 分解层数为 $j=8$, $m=2^8$ 个小波包空间, 获得不同频率的信号 $S_{8,i}$ ($i=0, 1, 2, 3, \dots, 255$);

步骤三: 本实施例选择的蓄电池响应时间为 2h, 其响应频率为 1.39×10^4 Hz, 与经小波包分解后得到的 $S_{8,1}$ 至 $S_{8,4}$ 次高频信号响应频率相近, 由于储能电池能量密度高、功率密度低、循环使用寿命低, 因此选择电池储能系统平抑 $S_{8,0}$ 至 $S_{8,4}$ 该段频率信号, $S_{8,0}$ 至 $S_{8,4}$ 段频率信号由公式(4)经重构得到为低频信号 P_{low} ; 超级电容器功率密度高、循环寿命高、能量密度低, 剩余的高频信号 $S_{8,5}$ 至 $S_{8,255}$ 及未被电池吸收部分均由超级电容器补偿, 高频信号 $S_{8,5}$ 至 $S_{8,255}$ 由公式(4)经重构得到 P_{high} 。实现平抑光伏功率波动的目的;

由重构算法, 即如下公式(4)对分解后的信号进行重构, 获得低频信号 P_{low} 和高频信号 P_{high} ;

重构算法:

$$d_i(j-1, n) = \sum_k (h_{i-2k}^* d_k(j, 2n) + g_{i-2k}^* d_k(j, 2n+1)) \quad (4)$$

其中, g_{i-2k}^*, h_{i-2k}^* 表示小波包重构的低通、高通滤波器组;

步骤四: 并网运行模式下, 蓄电池和超级电容器采用双环控制策略, 即外环功率控制、内环电流控制的控制方法, 利用超级电容器的荷电状态和蓄电池的电流、荷电状态、最大充放电功率, 输出蓄电池和超级电容器的实时功率, 控制蓄电池和超级电容器的充放电功率, 根据具体情况采取如下操作:

设光伏电池输出功率为 P_v , 蓄电池功率为 P_B , 超级电容器功率为 P_E , 并网时电网与微电网的交换功率为 P_x , 负荷功率为 P_L , SOC_B 为蓄电池荷电状态, i_B 为蓄电池电流, SOC_B^{MAX} 为蓄电池荷电状态最大值, 取 0.85, SOC_B^{MIN} 为蓄电池荷电状态最小值, 取 0.2, SOC_E^{MAX} 为超级电容器荷电状态, 光伏功率输出与负荷功率的差值经小波包分解后的低频信号为 P_{low} , 高频信号为 P_{high} ;

双环控制策略是控制实施的具体方式, 但是双环控制并不能保证电网的安全稳定运行, 由于微电网的运行状态实时变化, 需要用控制策略对不同运行状态下的双环控制中的一些给定参数和微电网的其他部分的投入切除、运行状态等进行调节, 所以需要分如下情

况采取控制方案：

(1) 当 $0 < P_V \leq P_L$, $SOC_B \leq SOC_{BMIN}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况, 当 $0.2 \leq SOC_{Edc} \leq 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = P_{high}$, 此时电网平抑光伏功率的低频波动; 当 $SOC_{Edc} > 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_E = P_{high} + P_{EMAX}$, 此时电网平抑光伏功率的低频波动, 超级电容向蓄电池充电, 并且平抑光伏功率高频波动;

(2) 当 $0 < P_V \leq P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况, 当 $0.2 \leq SOC_{Edc} \leq 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = P_{low}$, $P_E = P_{high}$; 当 $SOC_{Edc} > 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_E = P_{high} + P_{low}$;

(3) 当 $P_V > P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况, 当 $0.2 \leq SOC_{Edc} \leq 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = P_{EMAX}$, $P_E = -P_{high}$; 当 $SOC_{Edc} > 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_E = -P_{high} + P_{low}$;

(4) 当 $P_V > P_L$, $SOC_B \leq SOC_{BMIN}$, 时, 分两种情况, 当 $0.2 \leq SOC_{Edc} \leq 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{low}$, $P_E = -P_{high}$; 当 $SOC_{Edc} > 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_E = -P_{high} + P_{EMAX}$;

(5) 当 $P_V > P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况, 当 $0.2 \leq SOC_{Edc} \leq 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{low}$, $P_E = -P_{high}$; 当 $SOC_{Edc} > 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_E = -P_{high} + P_{EMAX}$;

(6) 当 $P_V > P_L$, $SOC_B \geq SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况, 当 $0.2 \leq SOC_{Edc} \leq 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_E = -P_{high}$, 此时电网平抑光伏功率低频波动; 当 $SOC_{Edc} > 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_E = -P_{high} + P_0$, 此时, 光伏功率低频部分波动由电网平抑, 高频部分波动由超级电容平抑, 并且超级电容以一定的稳定功率值 P_0 向电网放电。

[0011] (7) 当 $0 < P_V \leq P_L$, $SOC_{BMIN} < SOC_B < SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况, 当 $0.2 \leq SOC_{Edc} \leq 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = -P_{EMAX}$, $P_E = P_{high}$, 此时电网向微电网输送功率, 不仅平抑光伏低频波动, 而且为蓄电池充电; 当 $SOC_{Edc} > 0.85$ 时, 则 $P_B = -(P_{EMAX} - P_{high})$, $P_E = P_{EMAX}$, 其中 P_{EMAX} 为超级电容器允许最大输出功率, 此时光伏功率的低频功率波动由电网功率平抑;

(8) 当 $0 < P_V \leq P_L$, $SOC_B \geq SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 分两种情况, 当 $0.2 \leq SOC_{Edc} \leq 0.85$ 时, 则控制系统控制 $P_B = 0$, $P_E = -P_{high}$, 此时电网向微电网输送功率, 平抑光伏低频波动; 当 $SOC_{Edc} > 0.85$ 时, 则 $P_B = 0$, $P_E = -P_{high}$, 此时光伏功率的低频功率波动由电网功率平抑;

(9)当 $P_V = 0$, $SOC_B \geq SOC_{BMAX}$, $i_B \leq 0$ 时, 检测光伏逆变器是否以光伏最大功率输出, 如果光伏逆变器控制输出功率小于当前时刻光伏最大输出功率, 则控制系统控制光伏逆变器增大光伏功率输出, 如果逆变器已经控制光伏功率以当前最大功率输出, 则检测超级电容荷电状态 SOC_{Eddc} ,

①若 $SOC_{Eddc} > 0.2$, 则首先控制超级电容器放电, 使 $P_E = P_I$, $P_B = 0$;

②若 $SOC_{Eddc} \leq 0.2$, 则为了使超级电容留有一定的控制裕度, 选择控制蓄电池放电, 使 $P_B = P_I$, $P_E = 0$;

(10) 当 $P_V = 0$, $SOC_B \leq SOC_{BMIN}$, $i_B \geq 0$ 时, 分两种情况, 当 $SOC_{Eddc} \leq 0.2$, 检测光伏逆变器是否以光伏最大功率输出, 如果光伏逆变器控制输出功率小于当前光伏最大输出功率, 则控制系统控制光伏逆变器增大光伏功率输出, 如果逆变器已经控制光伏功率以当前最大功率输出, 则此时使蓄电池和超级电容都停止放电, 即令 $P_B = 0$, $P_E = 0$, 由电网侧向负荷提供电能。

[0012] 如图 2~3 所示, 对于所述蓄电池和超级电容采用外环功率控制、内环电流控制的方法得到蓄电池和超级电容器的实时功率 P , 并使其不断接近最终达到给定有功功率 P_{ref} 的具体步骤如下:

(1) 对于蓄电池:

通过电压互感器和电流互感器采集蓄电池接入交流母线处的电压、电流值, 所述电压、电流值分别经过派克变换后获得直轴分量 U_d 、 I_d 和交轴分量 U_q 、 I_q , 直轴电压、电流相乘为有功功率 P , 交轴电压、电流相乘为无功功率 Q , 所述有功功率 P 即实时功率 P , 将有功功率 P 和无功功率 Q 分别与其给定有功功率 P_{ref} 、给定无功功率 Q_{ref} (设置为 0) 做减法运算, 差值分别为 $\Delta P = P - P_{ref}$ 和 $\Delta Q = Q - Q_{ref}$, 将 ΔP 和 ΔQ 分别输入比例积分环节 PI 后通过派克反变换得到外环输出电流, 即内环电流给定值 i_{ref} ; 此时所述给定有功功率 P_{ref} 由蓄电池功率 P_B 给定;

蓄电池的直流输出电流经逆变器逆变为交流电流 i , 所述交流电流 i 与 i_{ref} 经减法运算得到差值 ΔI , 所述差值 ΔI 依次经过滤波环节、限幅环节后输入到 PWM 发生器, 所述 PWM 发生器的输出信号作为逆变器的触发信号输入逆变器, 逆变器根据触发信号调节由蓄电池逆变的交流电流 i 的大小, 从而完成电流内环的控制; 所述由蓄电池逆变的交流电流 i 输入到派克变换的电流输入端, 继续重复上述变换控制过程即为外环功率控制部分;

(2) 对于超级电容:

与蓄电池的控制方法类似, 不同点在于外环通过电压互感器和电流互感器采集超级电容接入交流母线处的电压、电流值, 然后经过与蓄电池控制相同的控制过程, 此时所述给定有功功率 P_{ref} 由超级电容器功率 P_E 给定; 从而控制超级电容器的功率输出的大小。

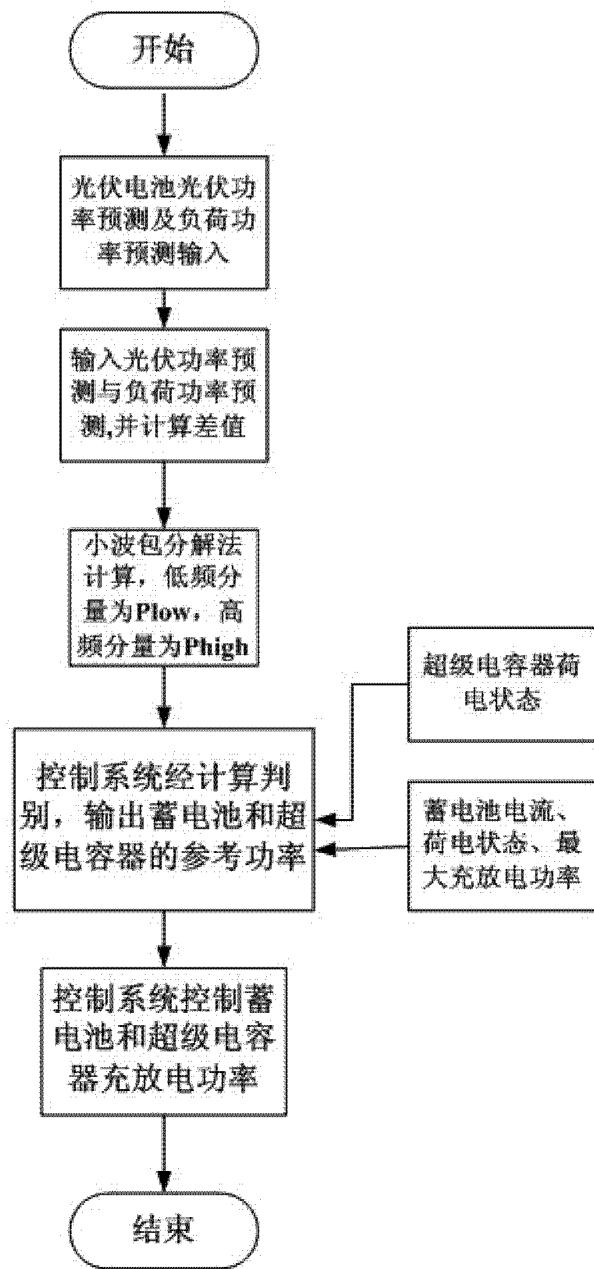


图 1

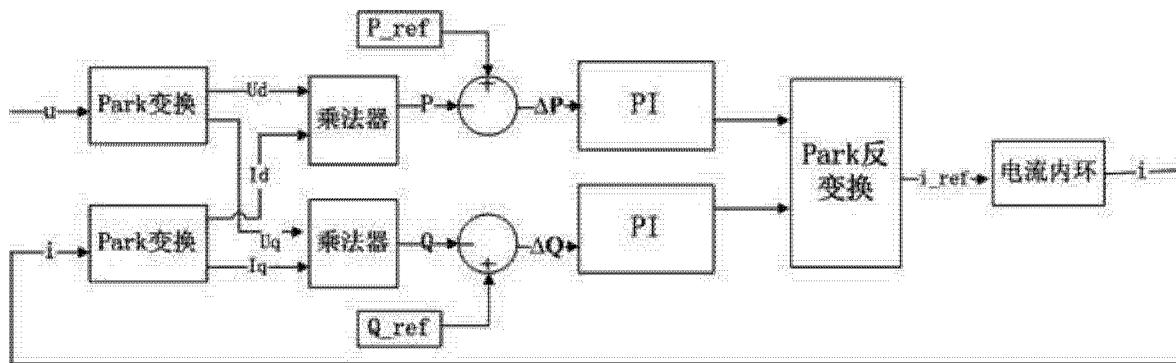


图 2

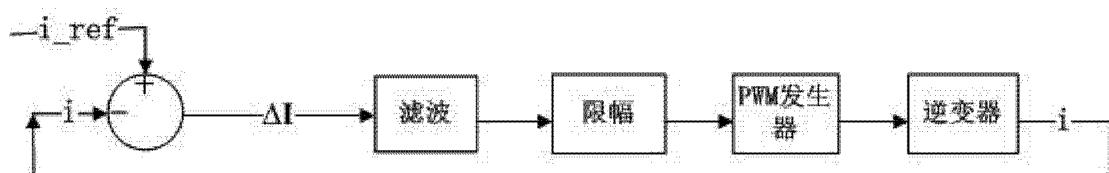


图 3

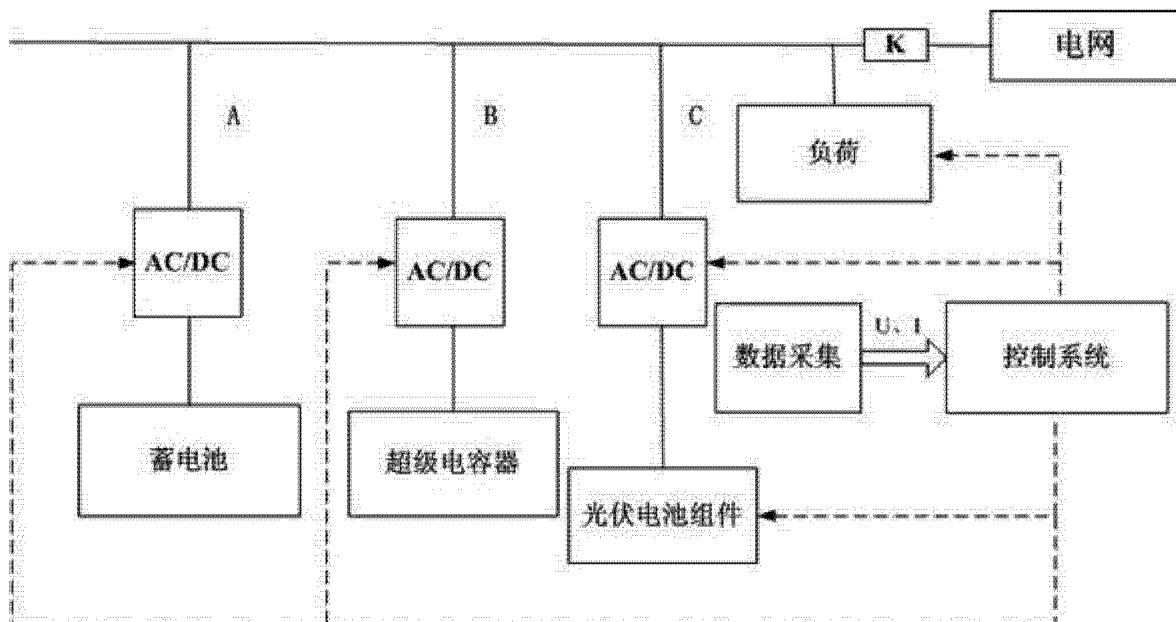


图 4

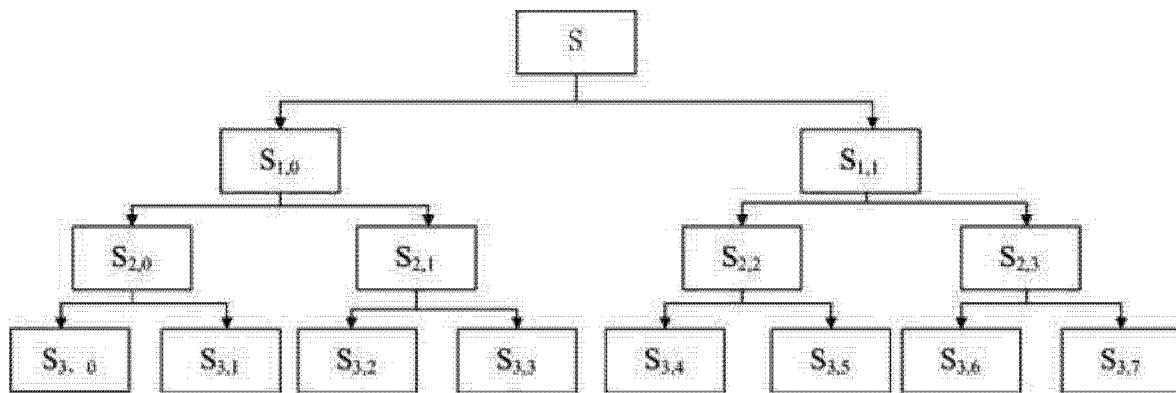


图 5

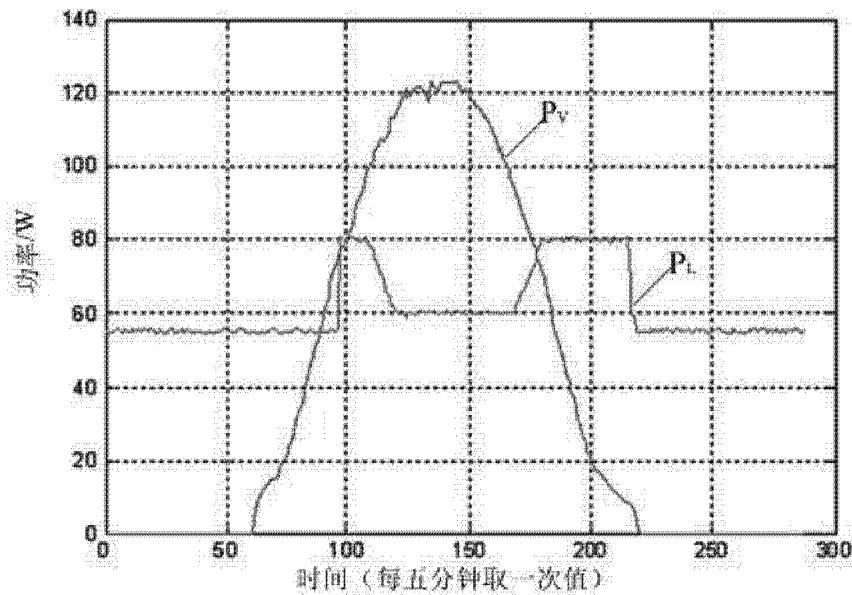


图 6

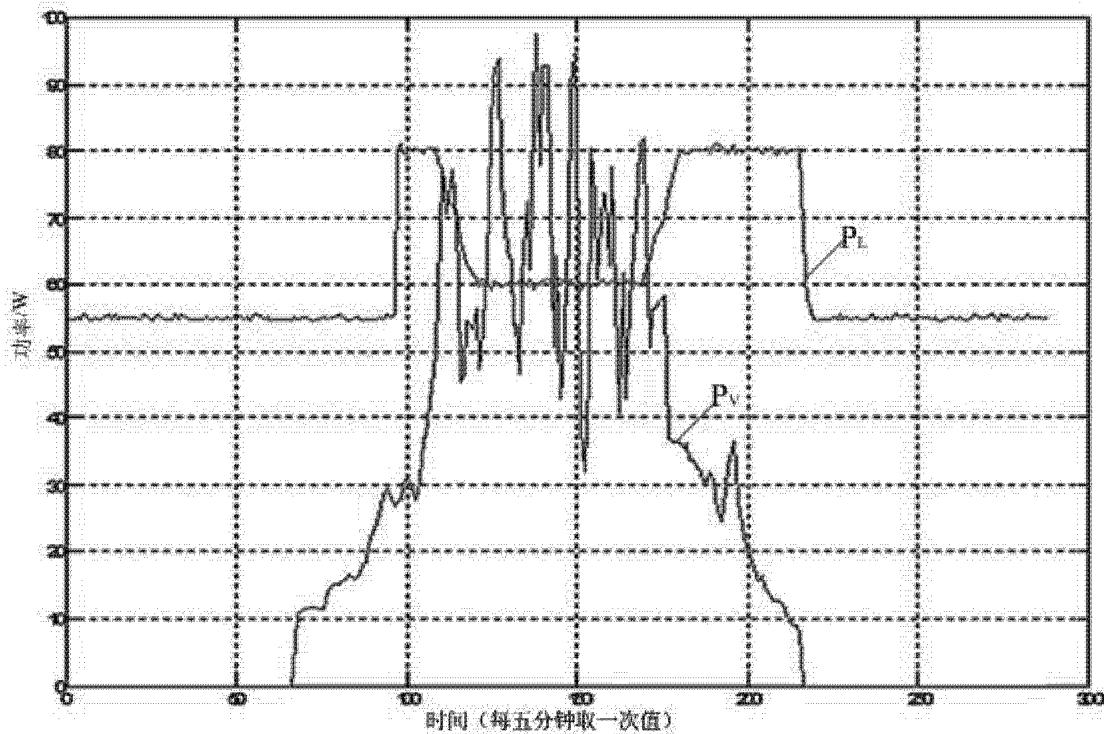


图 7

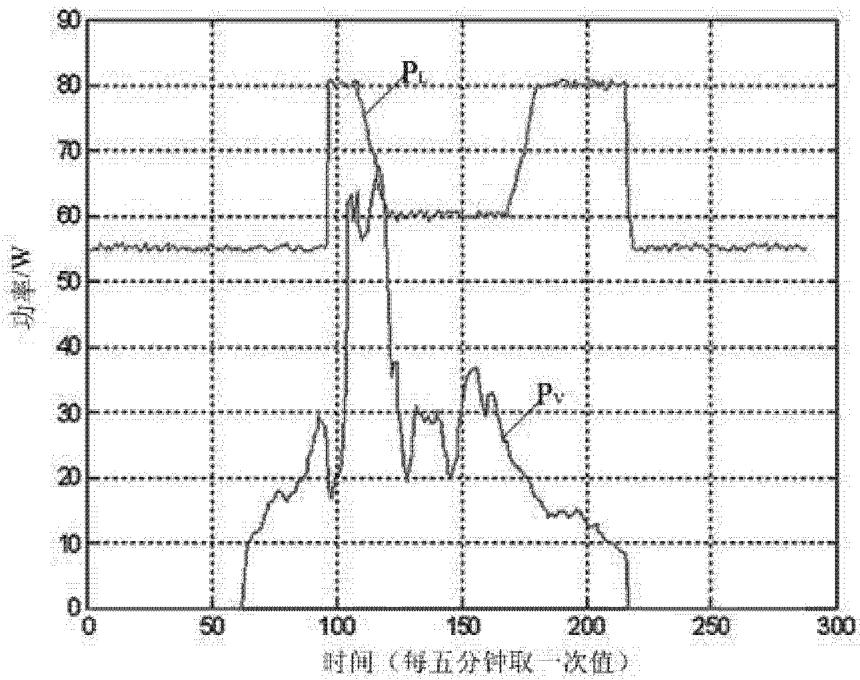


图 8