



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104967112 B

(45)授权公告日 2017.03.01

(21)申请号 201510362480.0

(22)申请日 2015.06.26

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104967112 A

(43)申请公布日 2015.10.07

(73)专利权人 上海电力学院

地址 200090 上海市杨浦区平凉路2103号

(72)发明人 程启明 陈根 褚思远 杨小龙

徐冠雄 刘懿稼

(74)专利代理机构 上海申汇专利代理有限公司

31001

代理人 吴宝根

(51)Int.Cl.

H02J 1/16(2006.01)

H02J 7/35(2006.01)

(56)对比文件

CN 102983563 A, 2013.03.20, 全文.

CN 104092250 A, 2014.10.08, 全文.

US 2011/0016063 A1, 2011.01.20, 全文.

CN 104158169 A, 2014.11.19, 全文.

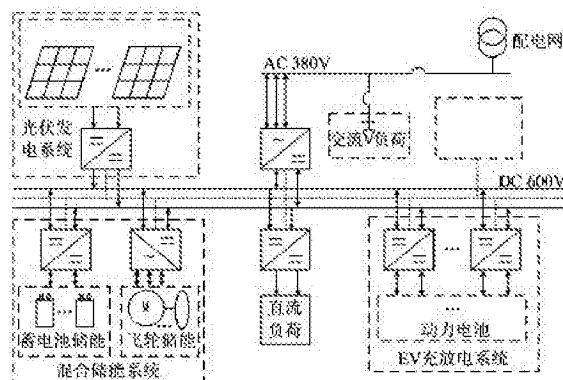
审查员 韩玲

(54)发明名称

光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法

(57)摘要

一种光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法,涉及微电网技术领域,所解决的是维持直流母线电压平滑稳定的技术问题。该方法采用蓄电池及飞轮混合储能,并将直流电压由高至低分为5个层次,对直流母线进行分层协调优化控制,实现充电站直流微电网中光伏发电、电动汽车充放电、负荷功率需求以及网侧变换器充放电的协调优化控制。本发明提供的方法,在充电站微电网孤岛、并网不同运行模式下,均能维持系统功率的平衡,实现直流母线电压的稳定控制。



权利要求书2页 说明书7页 附图7页

1.一种光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法,涉及光储式电动汽车充电站,所述光储式电动汽车充电站中配置有光伏发电系统,及用于电动汽车充放电控制的EV充放电系统,其特征在于:在光储式电动汽车充电站中配置混合储能系统,并在混合储能系统中配置蓄电池储能单元及飞轮储能单元;通过步骤S1的方法分配混合储能系统的功能角色;通过步骤S2的方法进行分层协调优化控制;

步骤S1:分配混合储能系统的功能角色

在混合储能系统作为光储式电动汽车充电站的直流母线电压支撑时,用一个时间常数为T的一阶巴特沃兹低通滤波器分离混合储能系统的充放电功率;

利用飞轮储能单元平滑高频功率波动及低频功率,利用蓄电池储能单元维持直流母线电压平滑稳定;

当混合储能系统处于空闲储备状态时,对飞轮储能单元进行恒定功率充放电,使其达到目标转速后维持不变,对蓄电池储能单元则进行恒定电流充放电,使其达到目标剩余电量值 S_{soc} ;

步骤S2:分层协调优化控制

设定直流母线标准电压 U_{dc_N} 为600V,并设定切换点滞环电压 ΔU 为3V,根据系统功率平衡原则,以直流侧母线标准电压为额定参考阈值,将直流电压由高至低分为5个层次,对直流母线采用其当前电压值所属的直流电压层次的控制方式进行协调优化控制;

直流电压的5个层次以标么值表示,第一直流电压层次为1.06-1.10,第二直流电压层次为1.02-1.06,第三直流电压层次为1.00-1.02,第四直流电压层次为0.98-1.00,第五直流电压层次为0.94-0.98;

第一直流电压层次的控制方式:由光伏发电系统的单向DC/DC变换器进行稳压控制,维持直流母线电压为 $1.06 U_{dc_N} + \Delta U$;

此时对EV充放电系统进行充电控制,对蓄电池储能单元进行最大电流充电并在目标剩余电量值 S_{soc} 达到80%后停止充电,对飞轮储能单元进行维持转速运转并保持存储功率不变,在系统孤岛时对网侧AC/DC变换器采用U/f控制,在系统并网运行时对网侧AC/DC变换器采用PQ控制或以恒定最大电流向交流侧输送功率;

第二直流电压层次的控制方式:由蓄电池储能单元通过双向DC/DC变换器进行电压/电流下垂控制,维持母线电压的稳定;此时由飞轮储能单元平滑蓄电池储能单元的充放电功率,光伏发电系统工作于最大功率点跟踪模式,对EV充放电系统进行充电或放电控制,对网侧AC/DC变换器的控制方式与第一直流电压层次的控制方式相同;

第三、第四直流电压层次的控制方式:系统运行模式为并网运行,由网侧AC/DC变换器进行电压/电流下垂功率控制实现直流母线电压的稳定控制;此时,混合储能系统进入并网备用状态进行充放电待用,蓄电池储能单元的目标剩余电量值 S_{soc} 的目标值设置为70%并采用恒定电流充放电,飞轮储能单元的目标转速设置为80%并采用恒定功率充放电,蓄电池储能单元与飞轮储能单元分别达到目标值后停止充放电,并维持目标状态进行待用,光伏发电系统工作于最大功率点跟踪模式,EV充放电系统也进行自由充放电;

第五直流电压层次的控制方式与第二直流电压层次的控制方式的区别在于:第五直流电压层次的控制方式中,当系统中负荷过载超出了系统的能量供应时实现功率减载控制,

第五直流电压层次的控制方式将系统中的交直流负荷按重要性从高至低分为重要负荷和次要负荷两个等级,在需要进行功率减载时优先切除次要负荷,同时控制EV充放电系统的充放电调度维护直流母线的电压稳定。

光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及微电网技术,特别是涉及一种光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法的技术。

背景技术

[0002] 在直流微网中,能量的平衡控制可归结为直流母线电压的调整和电能质量的管理,直流电压是反映系统内功率平衡的唯一指标。2014年第5期《现代电力》中《光伏直流微网协调直流电压控制策略的研究》一文,以光伏发电系统、储能系统、交直流负荷组成的直流微电网为研究对象,在分析直流微电网运行状态的基础上,提出了直流电压协调控制策略,该策略根据直流母线电压的分层下垂变化,实现各变换器之间的协调控制,是直流微电网的一种简便灵活控制方式。然而,下垂控制无法实现对直流电压的恒定控制,微电网系统无可避免要面对新能源发电波动或者负荷的切换引起的电压波动,难以同时满足功率与能量两方面要求。

发明内容

[0003] 针对上述现有技术中存在的缺陷,本发明所要解决的技术问题是提供一种能维持直流母线电压平滑稳定的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法。

[0004] 为了解决上述技术问题,本发明所提供的一种光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法,涉及光储式电动汽车充电站,所述光储式电动汽车充电站中配置有光伏发电系统,及用于电动汽车充放电控制的EV充放电系统,其特征在于:在光储式电动汽车充电站中配置混合储能系统,并在混合储能系统中配置蓄电池储能单元及飞轮储能单元;通过步骤S1的方法分配混合储能系统的功能角色;通过步骤S2的方法进行分层协调优化控制;

[0005] 步骤S1:分配混合储能系统的功能角色

[0006] 在混合储能系统作为光储式电动汽车充电站的直流母线电压支撑时,用一个时间常数为T的一阶巴特沃兹低通滤波器分离混合储能系统的充放电功率;

[0007] 利用飞轮储能单元平滑高频功率波动及低频功率,利用蓄电池储能单元维持直流母线电压平滑稳定;

[0008] 当混合储能系统处于空闲储备状态时,对飞轮储能单元进行恒定功率充放电,使其达到目标转速后维持不变,对蓄电池储能单元则进行恒定电流充放电,使其达到目标剩余电量值 S_{soc} ;

[0009] 步骤S2:分层协调优化控制

[0010] 设定直流母线标准电压 U_{dc_N} 为600V,并设定切换点滞环电压 ΔU 为3V,根据系统功率平衡原则,以直流侧母线标准电压为额定参考阈值,将直流电压由高至低分为5个层次,对直流母线采用其当前电压值所属的直流电压层次的控制方式进行协调优化控制;

[0011] 直流电压的5个层次以标幺值表示,第一直流电压层次为1.06-1.10,第二直流电压层次为1.02-1.06,第三直流电压层次为1.00-1.02,第四直流电压层次为0.98-1.00,第

五直流电压层次为0.94-0.98;

[0012] 第一直流电压层次的控制方式:由光伏发电系统的单向DC/DC变换器进行稳压控制,维持直流母线电压为 $1.06 U_{dc_N} + \Delta U$;

[0013] 此时对EV充放电系统进行充电控制,对蓄电池储能单元进行最大电流充电并在目标剩余电量值 S_{soc} 达到80%后停止充电,对飞轮储能单元进行维持转速运转并保持存储功率不变,在系统孤岛时对网侧AC/DC变换器采用U/f控制,在系统并网运行时对网侧AC/DC变换器采用PQ控制或以恒定最大电流向交流侧输送功率;

[0014] 第二直流电压层次的控制方式:由蓄电池储能单元通过双向DC/DC变换器进行电压/电流下垂控制,维持母线电压的稳定;此时由飞轮储能单元平滑蓄电池储能单元的充放电功率,光伏发电系统工作于最大功率点跟踪模式,对EV充放电系统进行充电或放电控制,对网侧AC/DC变换器的控制方式与第一直流电压层次的控制方式相同;

[0015] 第三、第四直流电压层次的控制方式:系统运行模式为并网运行,由网侧AC/DC变换器进行电压/电流下垂功率控制实现直流母线电压的稳定控制;此时,混合储能系统进入并网备用状态进行充放电待用,蓄电池储能单元的目标剩余电量值 S_{soc} 的目标值设置为70%并采用恒定电流充放电,飞轮储能单元的目标转数设置为80%并采用恒定功率充放电,蓄电池储能单元与飞轮储能单元分别达到目标值后停止充放电,并维持目标状态进行待用,光伏发电系统工作于最大功率点跟踪模式,EV充放电系统也进行自由充放电;

[0016] 第五直流电压层次的控制方式与第二直流电压层次的控制方式的区别在于:第五直流电压层次的控制方式中,当系统中负荷过载超出了系统的能量供应时实现功率减载控制,第五直流电压层次的控制方式将系统中的交直流负荷按重要性从高至低分为重要负荷和次要负荷两个等级,在需要进行功率减载时优先切除次要负荷,同时控制EV充放电系统的充放电调度维护直流母线的电压稳定。

[0017] 本发明提供的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法,结合飞轮-蓄电池混合储能方式和直流母线电压的分层控制,实现充电站直流微电网中光伏发电、电动汽车充放电、负荷功率需求以及网侧变换器充放电的协调优化控制,在充电站微电网孤岛、并网不同运行模式下,均能维持系统功率的平衡,实现直流母线电压的稳定控制,而且混合储能系统在孤岛运行状态下作为母线电压支撑时,飞轮储能平滑高频功率波动和部分低频功率,蓄电池平衡基准功率则能更好地维持母线电压的平滑稳定。

附图说明

[0018] 图1是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法中的光储式电动汽车充电站的结构示意图;

[0019] 图2是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法中,蓄电池储能单元和飞轮储能单元的传递函数伯德图;

[0020] 图3是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法中的直流母线分层协调优化控制策略图,其中的图3a为网侧AC/DC向交流侧输送的充电功率图,图3b为蓄电池储能单元的充电功率图,图3c为光伏发电、电动汽车充电功率、负荷减载功率对应不同电压层的控制特性图;

[0021] 图4是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法中,网侧AC/DC变换器的PQ控制框图,该图中的 P_{ref} 为有功功率参考信号, Q_{ref} 为无功功率参考信号, U_{gabc} 为交流侧三相电压, U_{gd} 为交流侧d轴电压, i_{Labc} 为交流侧流经滤波电感的三相电流, i_{Ld} 为d轴滤波电感电流, i_{Lq} 为q轴滤波电感电流, U_{od_ref} 为变换器交流侧端口输出d轴参考电压, U_{oq_ref} 为变换器交流侧端口输出q轴参考电压;

[0022] 图5是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法中,网侧AC/DC变换器的U/f控制框图,该图中的 i_{Cd} 为d轴滤波电容电流, i_{Cq} 为q轴滤波电容电流;

[0023] 图6是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法中,网侧AC/DC变换器的电压/电流下垂功率控制框图,该图中的 U_{dc} 为直流侧母线电压, I_{dc} 为AC/DC变换器充电电流, k_{AC} 为电压/电流下垂系数;

[0024] 图7是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法中,蓄电池储能单元双向DC/DC变换器的电压/电流下垂控制框图,该图中的 k_{bat} 为电压/电流下垂系数, I_{dc_bat} 为蓄电池充电电流, $U_N=1.06*600V$ (第一、第二层次)或 $0.96*600V$ (第五层次);

[0025] 图8是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法中,飞轮储能单元的控制框图,该图中的 U_{fd_ref} 为飞轮电机定子d轴电压参考信号, U_{fq_ref} 为飞轮电机定子q轴电压参考信号, i_{fd} 为飞轮电机定子d轴电流, i_{fq} 为飞轮电机定子q轴电流, L_{fd} 为飞轮电机定子d轴电感, L_{fq} 为飞轮电机定子q轴电感, P_f 为飞轮电机的极对数, ω_f 为飞轮的机械角速度;

[0026] 图9是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法中,光伏DC/DC变换器的控制结构框图。

[0027] 图10是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法中,电动汽车阶段式恒流充电控制框图,该图中的 $I_L(s)$ 为电动汽车蓄电池充电电流, U_o 为DC/DC变换器控制电压;

[0028] 图11是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法在孤岛情况下含电池满充的仿真结果图,其中的图11a为光伏发电系统的发电功率波形图,图11b为负荷需要功率波形图,图11c为EV充放电系统的充电功率波形图,图11d为飞轮储能单元的充电功率波形图,图11e为飞轮转速波形图,图11f为蓄电池剩余电量波形图,图11g为蓄电池充电电流波形图,图11h为直流母线电压波形图;

[0029] 图12是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法在孤岛情况下含电池过放的仿真结果图,其中的图12a为光伏发电系统的发电功率波形图,图12b为负荷需要功率波形图,图12c为EV充放电系统的充电功率波形图,图12d为飞轮储能单元的充电功率波形图,图12e为飞轮转速波形图,图12f为蓄电池剩余电量波形图,图12g为蓄电池充电电流波形图,图12h为直流母线电压波形图;

[0030] 图13是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法在并网情况下网侧AC/DC变换器采用PQ控制的仿真结果图,其中的图13a为光伏发电系统的发电功

率波形图,图13b为负荷需要功率波形图,图13c为EV充放电系统的充电功率波形图,图13d为飞轮储能单元的充电功率波形图,图13e为飞轮转速波形图,图13f为蓄电池剩余电量波形图,图13g为蓄电池充电电流波形图,图13h为直流母线电压波形图;

[0031] 图14是本发明实施例的光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制在并网情况下混合储能充电的仿真结果图,其中的图14a为光伏发电系统的发电功率波形图,图14b为负荷需要功率波形图,图14c为EV充放电系统的充电功率波形图,图14d为飞轮储能单元的充电功率波形图,图14e为飞轮转速波形图,图14f为蓄电池剩余电量波形图,图14g为蓄电池充电电流波形图,图14h为交流母线充电功率波形图,图14i为直流母线电压波形图。

具体实施方式

[0032] 以下结合附图说明对本发明的实施例作进一步详细描述,但本实施例并不用于限制本发明,凡是采用本发明的相似结构及其相似变化,均应列入本发明的保护范围,本发明中的顿号均表示和的关系。

[0033] 如图1所示,本发明实施例所提供的一种光储式电动汽车充电站的直流微网协调控制方法,涉及光储式电动汽车充电站,所述光储式电动汽车充电站中配置有光伏发电系统,及用于电动汽车充放电控制的EV充放电系统,其特征在于:在光储式电动汽车充电站中配置混合储能系统,并在混合储能系统中配置蓄电池储能单元及飞轮储能单元;通过步骤S1的方法分配混合储能系统的功能角色;通过步骤S2的方法进行分层协调优化控制;

[0034] 步骤S1:分配混合储能系统的功能角色

[0035] 在混合储能系统作为光储式电动汽车充电站的直流母线电压支撑时,用一个时间常数为T的一阶巴特沃兹低通滤波器分离混合储能系统的充放电功率,即:

$$[0036] \quad P_{bat} = \frac{1}{1+T \times s} P_B$$

$$[0037] \quad P_f = P_B - P_{bat}$$

[0038] 其中, P_{bat} 为蓄电池储能单元的充电功率, P_B 为混合储能系统的充电功率, P_f 为飞轮储能单元的充电功率, s 为拉普拉斯算子;

[0039] 利用飞轮储能单元平滑高频功率波动及低频功率,利用蓄电池储能单元维持直流母线电压平滑稳定;

[0040] 当混合储能系统处于空闲储备状态时,对飞轮储能单元进行恒定功率充放电,使其达到目标转速后维持不变,对蓄电池储能单元则进行恒定电流充放电,使其达到目标剩余电量值 S_{soc} ;

[0041] 图2为蓄电池储能单元和飞轮储能单元的传递函数伯德图,该图中的 ωf 为对应时间常数为T的滤波角频率,从图2可以看出,在混合储能系统作为直流母线电压支撑时,飞轮储能单元可以补偿角频率大于 ωf 的所有高频波动分量,并且分担一部分低频波动,从而使蓄电池储能单元承担直流分量和部分低频分量,输入功率相对稳定平滑,进而维持直流母线电压的平滑稳定;

[0042] 步骤S2:分层协调优化控制(参见图3)

[0043] 设定直流母线标准电压 U_{dc_N} 为600V,并设定切换点滞环电压 ΔU 为3V,根据系统

功率平衡原则,以直流侧母线标准电压为额定参考阈值,将直流电压由高至低分为5个层次,对直流母线采用其当前电压值所属的直流电压层次的控制方式进行协调优化控制;

[0044] 直流电压的5个层次以标么值表示,第一直流电压层次为1.06-1.10,第二直流电压层次为1.02-1.06,第三直流电压层次为1.00-1.02,第四直流电压层次为0.98-1.00,第五直流电压层次为0.94-0.98;

[0045] 第一直流电压层次的控制方式:直流母线的当前电压值属于该层次则表明系统功率过剩,

[0046] 则由光伏发电系统的单向DC/DC变换器进行稳压控制,维持直流母线电压为 $1.06 U_{dc_N} + \Delta U$,其系统功率平衡公式为:

$$[0047] \quad P_{PV} = P_{DL} + P_{AL} + P_{EV} + P_{bat}$$

[0048] 其中, P_{PV} 为光伏发电系统的输出功率, P_{DL} 为光伏发电系统的直流侧负荷需求功率, P_{AL} 为光伏发电系统的交流侧负荷需求功率, P_{EV} 为光伏发电系统向EV充放电系统输出的充电功率, P_{bat} 为蓄电池储能单元的充电功率;

[0049] 此时对EV充放电系统进行充电控制,对蓄电池储能单元进行最大电流充电并在目标剩余电量值 S_{soc} 达到80%后停止充电,对飞轮储能单元进行维持转速运转并保持存储功率不变,在系统孤岛时对网侧AC/DC变换器采用U/f控制(该控制方法为现有技术,参见图5),在系统并网运行时对网侧AC/DC变换器采用PQ控制(该控制方法为现有技术,参见图4)或以恒定最大电流向交流侧输送功率;

[0050] 第二直流电压层次的控制方式:由蓄电池储能单元通过双向DC/DC变换器进行电压/电流下垂控制(该控制方法为现有技术,参见图7),维持母线电压的稳定,其系统功率平衡公式为:

$$[0051] \quad P_{bat} = P_{PV} - P_{DL} - P_{EV} - P_{AC} - P_f$$

[0052] 其中, P_{bat} 为蓄电池储能单元的充电功率, P_{PV} 为光伏发电系统的输出功率, P_{DL} 为光伏发电系统的直流侧负荷需求功率, P_{EV} 为光伏发电系统向EV充放电系统输出的充电功率, P_{AL} 为光伏发电系统的交流侧负荷需求功率, P_{AC} 为直流侧母线经网侧AC/DC向交流侧母线输入的功率, P_f 为飞轮储能单元的充电功率;

[0053] 此时由飞轮储能单元平滑蓄电池储能单元的充放电功率,光伏发电系统工作于最大功率点跟踪模式,对EV充放电系统进行充电或放电控制,对网侧AC/DC变换器的控制方式与第一直流电压层次的控制方式相同;

[0054] 第三、第四直流电压层次的控制方式:系统运行模式为并网运行,由网侧AC/DC变换器进行电压/电流下垂功率控制(该控制方法为现有技术,参见图6)实现直流母线电压的稳定控制,其系统功率平衡公式为:

$$[0055] \quad P_{AC} = P_{PV} - P_{DL} - P_{EV} - P_B$$

[0056] 其中, P_{AC} 为直流侧母线经网侧AC/DC向交流侧母线输入的功率, P_{PV} 为光伏发电系统的输出功率, P_{DL} 为光伏发电系统的直流侧负荷需求功率, P_{EV} 为光伏发电系统向EV充放电系统输出的充电功率, P_B 为混合储能系统的充电功率;

[0057] 此时,混合储能系统进入并网备用状态进行充放电待用,蓄电池储能单元的目标剩余电量值 S_{soc} 的目标值设置为70%并采用恒定电流充放电,飞轮储能单元的目标转数设置为80%并采用恒定功率充放电,蓄电池储能单元与飞轮储能单元分别达到目标值后停止充放电,并维持目标状态进行待用,光伏发电系统工作于最大功率点跟踪模式,EV充放电系统也进行自由充放电;

[0058] 第五直流电压层次的控制方式与第二直流电压层次的控制方式类似,其区别在于:第五直流电压层次的控制方式中,当系统中负荷过载超出了系统的能量供应时实现功率减载控制,第五直流电压层次的控制方式将系统中的交直流负荷按重要性从高至低分为重要负荷和次要负荷两个等级,在需要进行功率减载时优先切除次要负荷,同时控制EV充放电系统的充放电调度维护直流母线的电压稳定。

[0059] 图8是飞轮储能单元的控制原理框图,图9是光伏DC/DC变换器的控制结构框图,图10是电动汽车阶段式恒流充电控制框图。

[0060] 本发明实施例的方法采用Matlab/Simulink进行了仿真实验,实验参数如下:

[0061] 光伏发电系统的额定输出功率为20kW,网侧AC/DC变换器的额定容量为30kW;

[0062] 电动汽车的动力电池采用额定电压为360V的磷酸铁锂电池组,充放电方式采用基于剩余电量的阶段式恒流充放电(该方式为现有技术,参见图10),电流大小分别为15A、10A和5A,电动汽车充电桩设为4台,孤岛运行时,由于系统容量限制,仅开放1台充电站进行充放电;

[0063] 储能蓄电池也采用与电动汽车动力电池规格相同的蓄电池,系统容量为100Ah,额定储放功率为20kW,并网充放电时采用0.15C(即为15A)恒流控制方式;

[0064] 飞轮储能的最大储放功率限制为10kW,最高转速为10000r/min,最低转速为5000r/min,其待用标准转速为8000 r/min;

[0065] 直流侧负荷为电阻型L1,由于直流负荷经DC/DC变换器接入直流母线,其端电压为恒定值,又可视为恒功率型,容量大小为5kW;交流侧负荷为恒功率型交流L2、L3,容量均为5kW;交直流型负荷按L1、L2、L3重要性依次递减。

[0066] 图11是在孤岛情况下含电池满充的仿真结果图,仿真情况为: $t=1.2s$ 时,储能蓄电池的目标剩余电量值 S_{soc} 达到80%,为保护电池停止充电;飞轮电机跟随蓄电池进入维持转速模式;直流母线电压升高进入第一直流电压层次,由光伏变换器稳压控制维持母线电压的平衡; $t=2.2s$ 后,电动汽车充电电流由15A变为10A,母线电压随之略有升高; $t=3.2s$ 后,负荷L3合上,PL变为15kW,母线电压随之降低,仍工作于第一直流电压层次; $t=4.2s$ 后,光伏输入功率减小为10kW,系统存在功率缺额,飞轮迅速启动补充放电,并使直流母线电压 U_{dc} 逐步过渡到第五直流电压层次,由蓄电池放电维持母线电压的稳定。

[0067] 由图11可见,系统直流母线电压在第一直流电压层次的光伏变换器稳压控制效果明显,防止了因光伏输入功率过剩而造成的直流母线电压持续升高。

[0068] 图12是在孤岛情况下含电池过放的仿真结果图,仿真情况为: $t=2.2s$ 后,直流母线电压由第二直流电压层次过渡到第五直流电压层次,进入蓄电池放电模式; $t=5.8s$ 后,储能蓄电池的目标剩余电量值 S_{soc} 下降至40%,为防止蓄电池过放影响寿命,迅速切除L3;此时蓄电池仍在放电,0.05s后(即 $t=5.85s$),继续切除负荷L2,在飞轮的平缓过渡下,直流母线

电压 U_{dc} 穿过第四、第三直流电压层次,进入第二直流电压层次,进入蓄电池充电模式。

[0069] 由图12可知,在系统储能蓄电池过放情况下,系统能有效切除负荷,维持直流母线电压稳定的同时,改善蓄电池充放电环境,进一步延长蓄电池的使用寿命。

[0070] 图13是在并网情况下网侧AC/DC变换器采用PQ控制的仿真结果图,仿真情况为:使网侧AC/DC无功输出功率恒定为5kvar,并只开放一台充电桩工作, $t=0.2s\sim 2.2s$ 时,光伏系统发电功率 $P_{PV}=20kW$,网侧AC/DC向交流侧输送的有功功率 $P_{AC}=10kW$;电动汽车充电电流为15A,有效充电功率为5.4kW;飞轮电机储能功率 P_f 逐渐下降,转速 n 呈减加速度上升,逐步将光伏剩余功率平滑过渡给储能蓄电池;蓄电池充电电流 I_{bat} 逐渐增加,随之直流母线电压 U_{dc} 平滑上升,工作于第二直流电压层; $t=2.2s\sim 4.2s$ 时, P_{PV} 减小为10kW,飞轮电机快速响应补充能量的缺额,由充电模式变为放电模式,并逐步过渡功率缺额给蓄电池;随着蓄电池充电电流的减小,直流母线电压穿越第三、第四直流电压层次,过渡到第五直流电压层次,进入蓄电池放电模式; $t=4.2s\sim 6.2s$ 时,负荷L3合上, P_{AC} 变为15kW,母线电压继续工作在第五直流电压层次并持续下降; $t=6.2s\sim 8.2s$ 时,电动汽车改变充电模式,充电电流变为10A,电动汽车有效充电功率为3.6kW;飞轮由放电模式迅速切换为充电模式,平滑突变的功率;蓄电池继续放电,变化平缓; $t=8.2s\sim 12.2s$ 时, P_{PV} 减小为5kW, P_{AC} 变为10kW,系统产生一定较小的冲击电流,但迅速恢复。

[0071] 由图13可知,在并网模式下,当采用PQ控制时,网侧相当于交流负荷,类似于孤岛运行模式;随着光伏输入功率和系统负荷的变化,以及电动汽车充电工况的改变,混合储能系统中的飞轮电机和蓄电池的功率互补,能很好的维持系统工作于第二、第五直流电压层的电压平衡,过渡平缓,效果明显。

[0072] 图14是在并网情况下混合储能充电的仿真结果图,仿真情况为:负荷L2、L3由大电网供电,只保留直流负荷L1由直流母线供电,且4台充电桩同时开放; $t=0.2\sim 2.2s$ 时,系统并网仿真开始, $P_{PV}=20kW$,负荷需求功率 $P_L=5kW$,电动汽车有效充电功率总计为14.4kW;蓄电池以15A恒电流充电,飞轮电机以5kW恒功率充电; $P_{AC}<0kW$,交流侧向直流侧供电,直流母线电压工作于第四直流电压层次,由双向AC/DC变换器维持直流母线电压 U_{dc} 的稳定; $t=2.2s\sim 4.2s$ 时, P_{PV} 减小为10kW,此时交流侧向直流侧供电增加,直流母线电压略有降落,继续工作在第四直流电压层次; $t=4.2\sim 8.2s$ 时, P_{PV} 继续减小为5kW,电动汽车有效充电功率增加到21.6kW;此时直流母线功率剩余负荷超过双向变换器的供电功率极限,混合储能系统切换为平衡母线功率模式,飞轮开始平滑蓄电池端口的功率变化,由于直流母线电压继续维持在第四直流电压层次,蓄电池电流为0A; $t=8.2s$ 后, P_{PV} 回升为10kW,电动汽车有效充电功率为-21.6kW,转变为放电模式;混合储能系统改变控制策略为继续充电,没过多久蓄电池和飞轮电机依次分别达到目标剩余电量值 S_{soc} 和目标转速 n 值,停止充电,直流母线电压随之略有变化,继续工作在第三、第四直流电压层次。

[0073] 由图14可知,并网模式下混合储能系统能有效进行充电控制,并结合其控制策略的改变与双向AC/DC变换器共同作用,进一步维持直流母线电压的平衡。

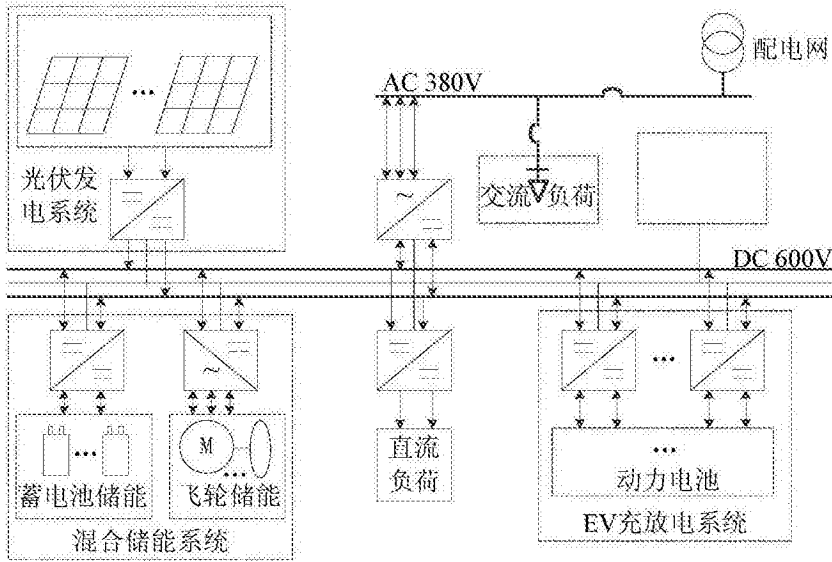


图1

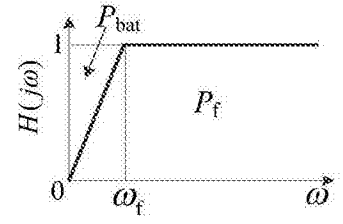


图2

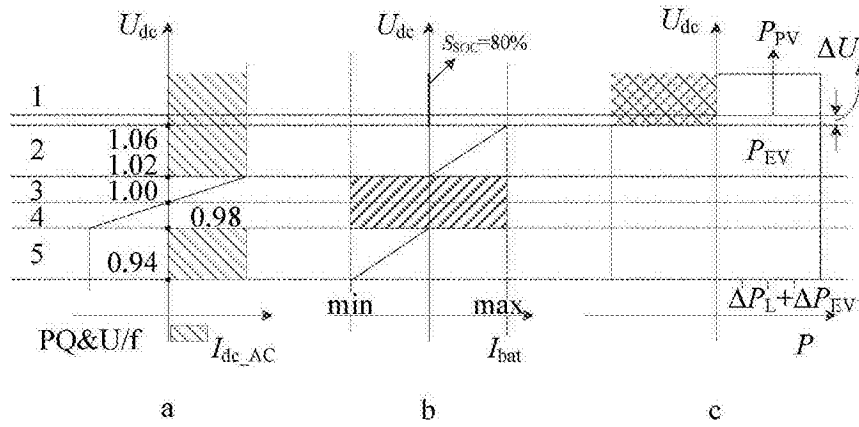


图3

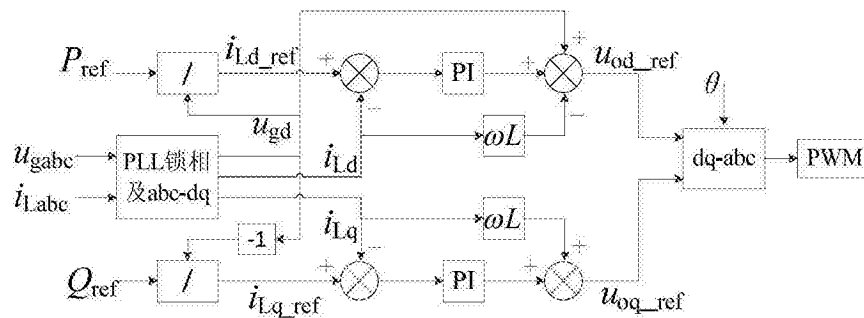


图4

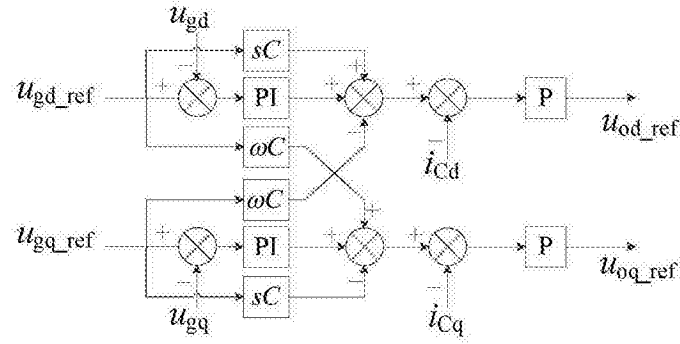


图5

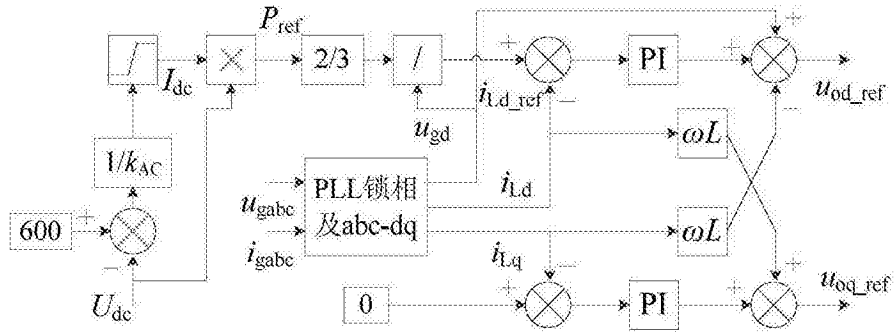


图6



图7

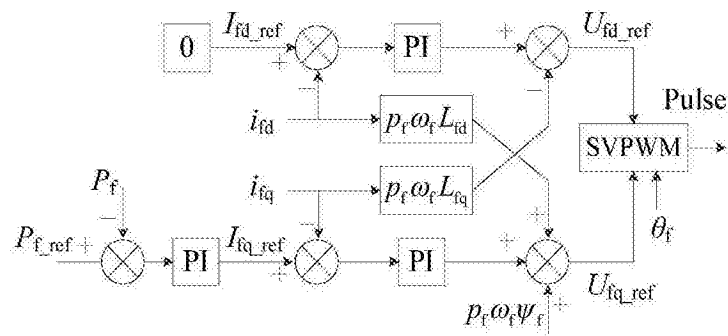


图8

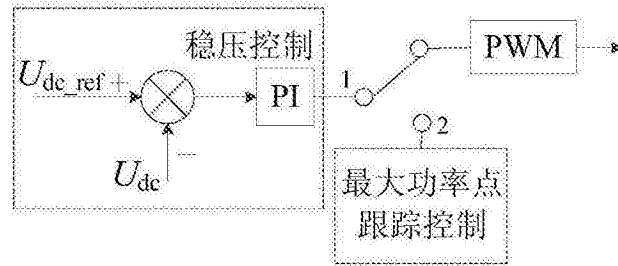


图9

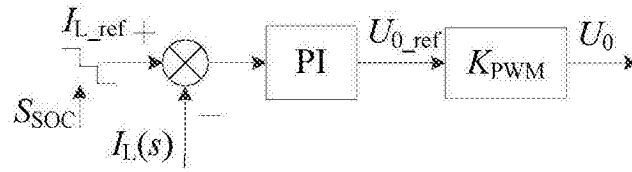


图10

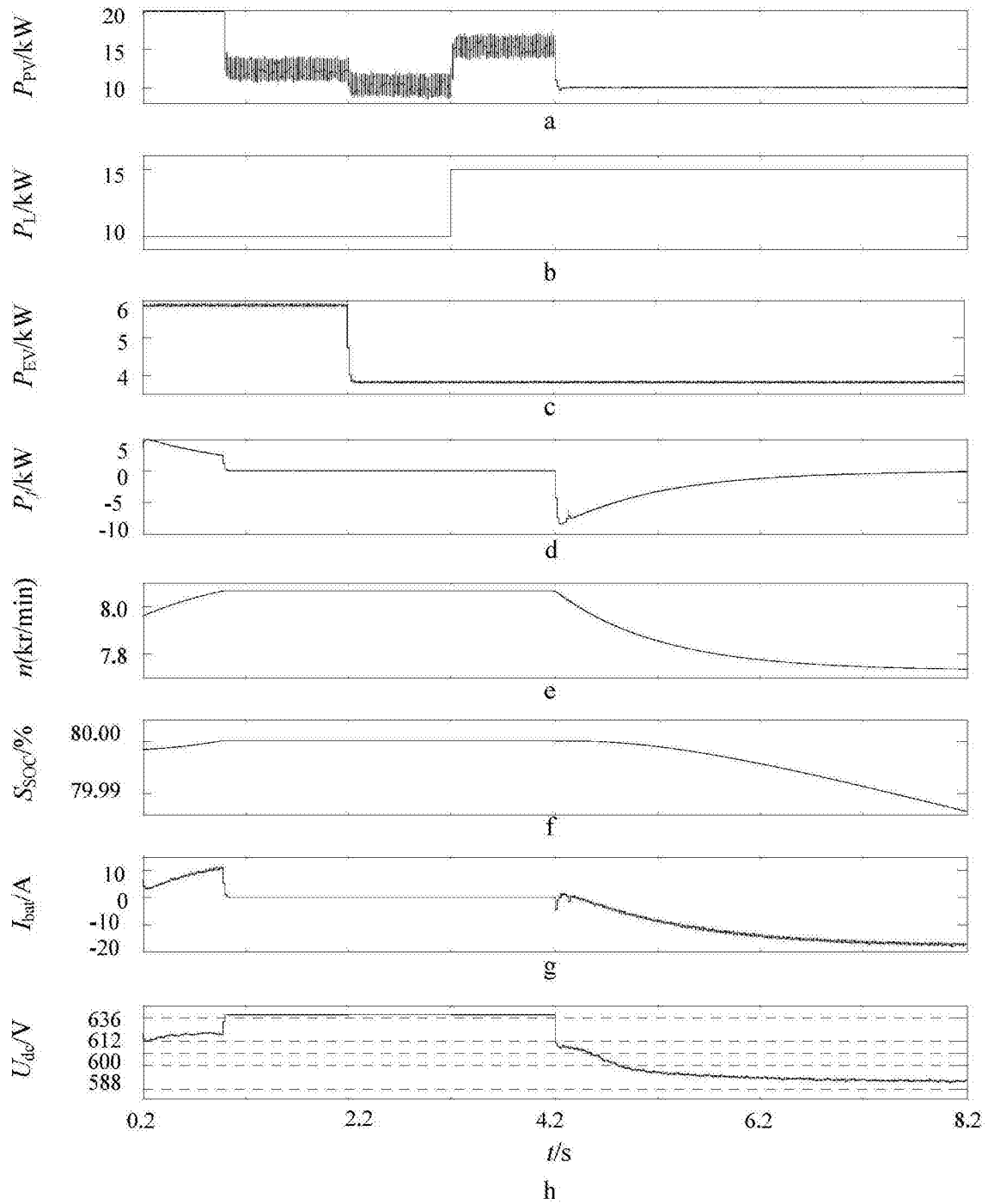


图11

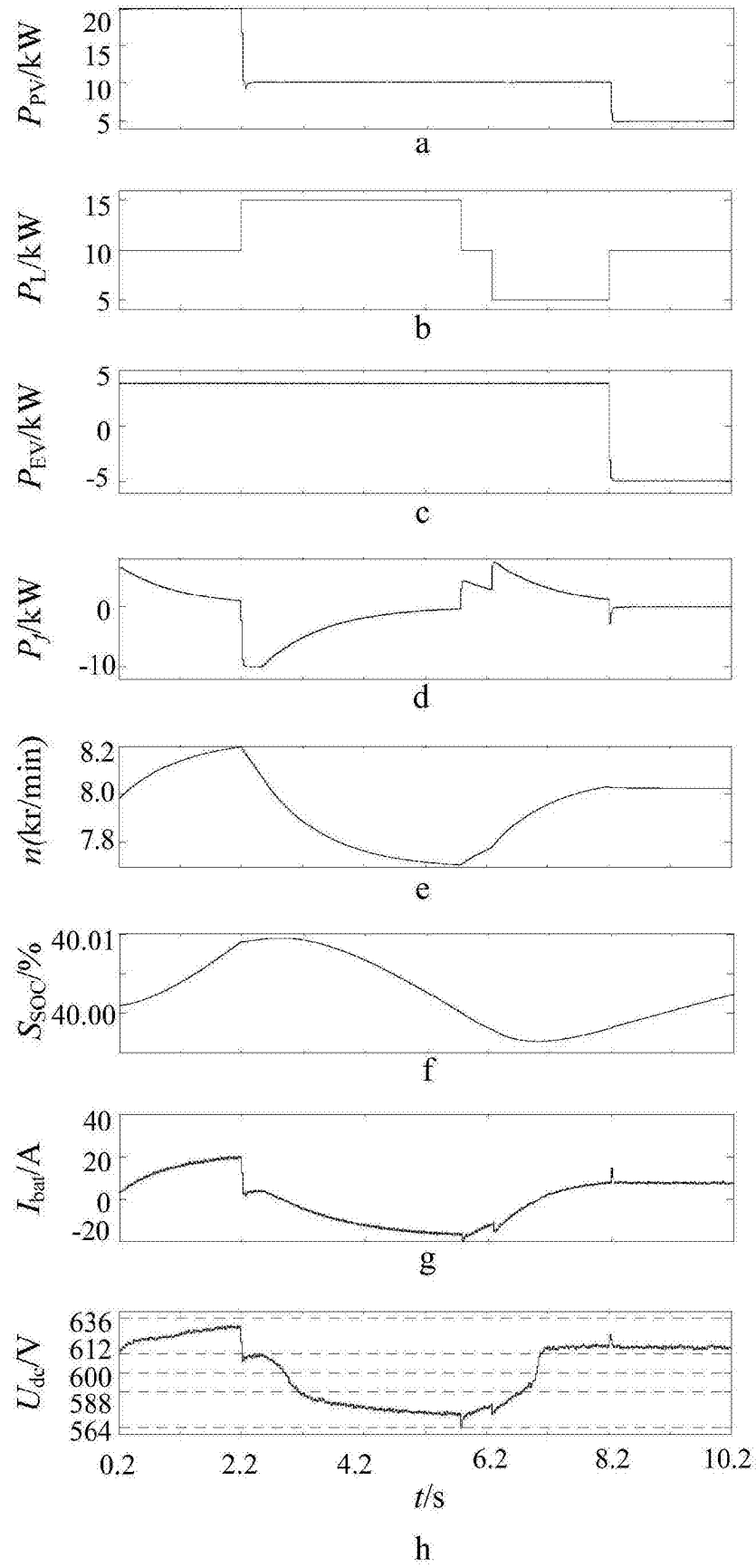


图12

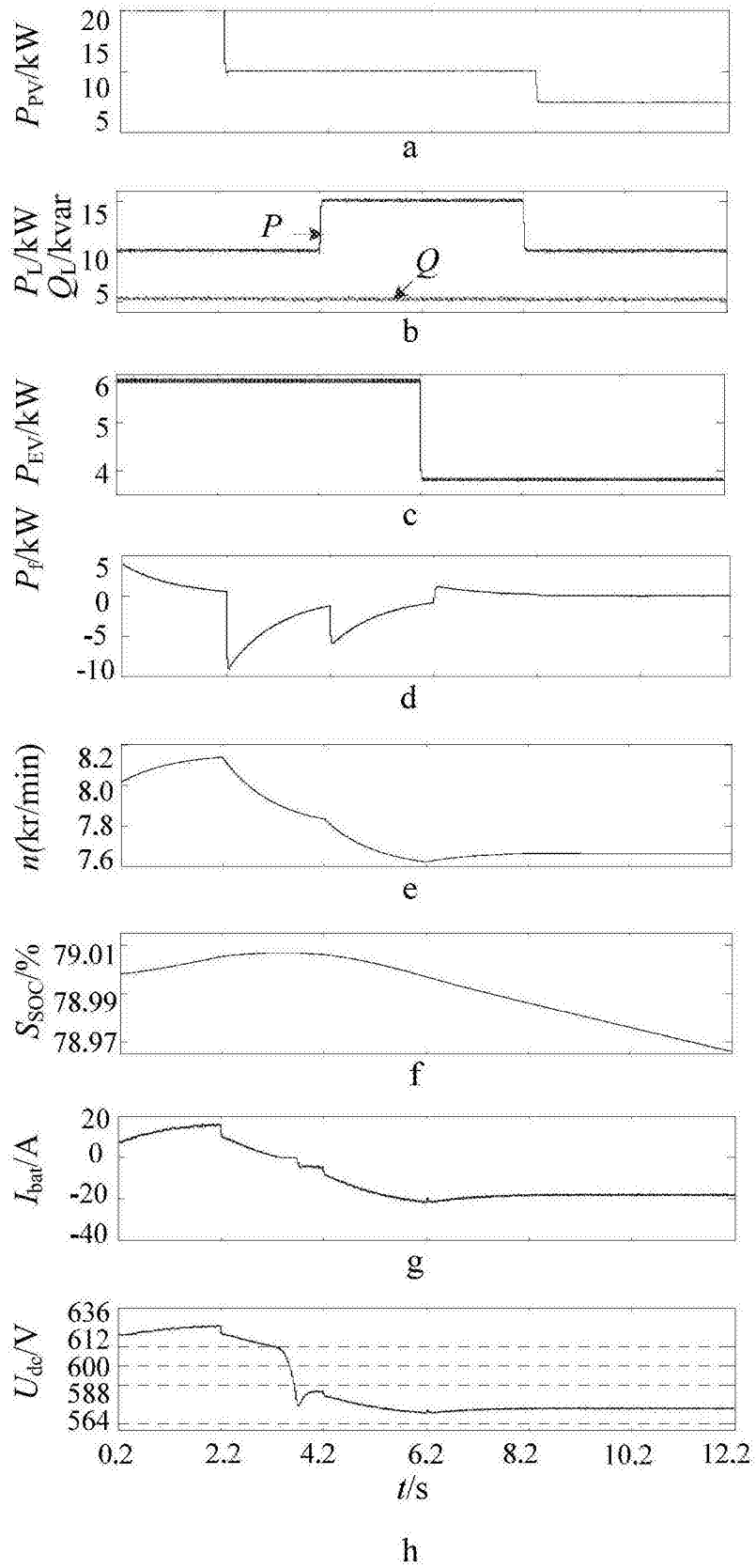


图13

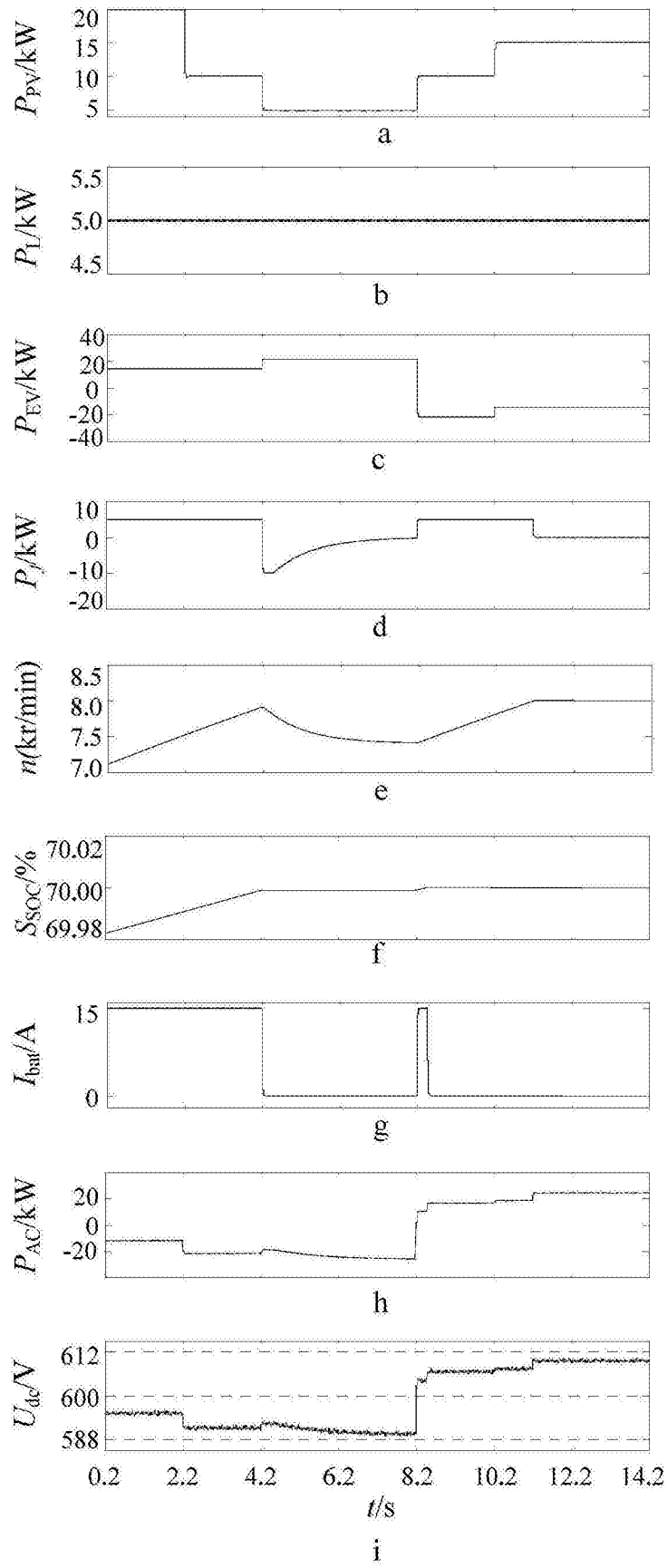


图14