

具有馈电功能的新型并网 UPS 系统 及其分散逻辑控制策略

赵彪¹, 于庆广¹, 王立雯¹, 肖宜²

- (1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084;
2. 湖北省电力公司调度通信中心, 湖北省 武汉市 430077)

Novel Grid-connected UPS System With the Electricity Feedback Function and Its Distributed Logic Control Strategy

ZHAO Biao¹, YU Qingguang¹, WANG Liwen¹, XIAO Yi²

- (1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;
2. Dispatching and Communication Center, Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, Hubei Province, China)

ABSTRACT: With the proposal of the construction of smart grid, the single electricity consuming equipment can no longer satisfy the need of the development of smart grid. "Green", energy saving and grid-connected electrical equipment become the main development trend. The paper proposed a novel grid-connected uninterruptible power supply (UPS) system with the electricity feedback function and its circuit topology. The system can be split into four single-phase bridge converters, which, in turn, are grouped to formed pulse width modulation (PWM) rectifier and feeder module, isolated bidirectional DC-DC module and inverter module, so the system becomes a four-quadrant operation power supply device. On this basis, the operation modes of system were designed, and the control system was split into seven modular sub-controllers. With their combinational logic, the control strategy of each module were implemented, so the control targets of steady state and transient state in different modes were achieved. At last, simulation and experimental results verified the validity and effectiveness of the proposed circuit topology and control strategy.

KEY WORDS: power systems; uninterruptible power supply (UPS); electricity feedback; grid-connected; distributed logic control

摘要: 随着智能电网建设的提出, 单一耗电设备已经无法满足其发展要求, 绿色、节能、并网型用电设备成为发展趋势。提出一种具有馈电功能的新型并网不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)系统及其拓扑结构, 并将该结构拆分为4个单相全桥电路, 依次组成脉宽调制(pulse

width modulation, PWM)整流馈电模块、隔离双向DC/DC模块以及逆变模块, 从而使系统成为一可以四象限运行的电源装置。在此基础上, 设计了系统的工作模式与分层控制体系, 并将核心控制层离散为7个模块化的子控制器, 通过它们的分散逻辑组合实现各部分的控制策略, 从而达到不同工作模式下稳态和暂态运行的控制目标。最后, 搭建了仿真系统和实验样机, 验证了系统拓扑和控制的正确性及有效性。

关键词: 电力系统; 不间断电源; 馈电; 并网; 分散逻辑控制

0 引言

随着信息技术的发展, 用户对电源系统的供电质量、供电效率、供电可靠性等方面提出了更高的要求, 不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)以其优越的性能成为解决上述问题的一个重要途径^[1]。根据结构和工作方式不同可以将UPS系统分为后备式、在线交互式以及双变换式3种, 其中市场上较为主流和先进的是双变换式^[2-3]。

双变换式UPS系统主要由蓄电池单元、整流器、充电器、放电器以及逆变器等组成。当市电正常时, 市电一方面通过整流器、逆变器给负载输出高质量的电能, 另一方面通过充电器给电池充电; 当市电中断或者异常时, 蓄电池通过放电器和逆变器给负载供电; 而当UPS出现故障时, 转换开关将切至旁路, 由市电直接给负载供电。

传统双变换式UPS系统的整流器主要是采用

不控整流+功率因数校正(power factor correction, PFC)或者有源功率因数校正(active power factor correction, APFC)的形式^[4-6], 这种电路结构简单, 成本较低, 并且具有较高的功率因数和较低的谐波含量, 但是通常它的电流总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)会达到 10%左右。传统双变换式 UPS 系统的电池管理环节主要是通过分开的充电器和 DC/DC 放电环节来分别完成蓄电池的充电和放电过程, 就单个电路本身而言管理起来简单, 但是对于整个系统而言, 增加了系统的模块数量和控制难度^[7-8]; 同时, 该方案下电池环节与电网是不隔离的, 这将导致电网出现问题时干扰到电池的通路, 不利于电池系统的安全可靠运行; 另外, 市场上的 UPS 系统都是从电网吸收电能来给负载和蓄电池供电, 无法实现蓄电池到电网的馈电, 这不利于蓄电池的使用, 也会导致资源浪费^[9-11]。

随着智能电网建设的提出^[12], 单一耗电设备已经无法达到其发展要求, 绿色型、节能型、并网型用电设备成为发展趋势^[13], 由此, 传统 UPS 的转型也变得迫切。本文在市场和技术调研的基础上, 提出具有馈电功能的新型并网 UPS 系统设计方案, 使整个 UPS 系统成为一个可以四象限运行的装置。由此, 不仅可以实现 UPS 的基本功能, 还可实现蓄电池与电网的并网, 在需要将多余电能回馈电网, 同时采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)整流控制也使 UPS 成为电网的绿色用户。

1 新型并网 UPS 系统拓扑结构

具有馈电功能的新型并网 UPS 系统结构设计如图 1 所示。它由蓄电池单元、整流馈电模块、隔离双向 DC/DC 模块、逆变模块以及旁路开关 5 部分组成, 其中整流馈电模块、隔离双向 DC/DC 模块以及逆变模块通过直流母线连接进行能量交换。相比传统的双变换式 UPS 系统, 它采用整流馈电模

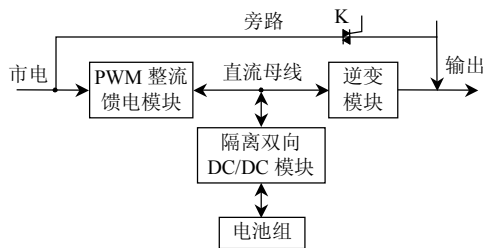


图 1 新型并网 UPS 系统结构框图

Fig. 1 Structure frame of new grid-connected UPS

块代替传统的不控整流或 APFC 电路, 采用隔离双向 DC/DC 变换器代替传统的蓄电池充电器和放电器, 使整个 UPS 系统成为一个可以四象限运行的装置, 为直流环节向电网馈电提供了基础。

图 2 所示是本文设计的新型并网 UPS 系统主电路拓扑结构图。其中: 串联电感 L_S 和单相全桥变换器 H_1 组成整流馈电模块; u_S 为电网电压; u_{DC} 为直流母线电压; u_{AB} 是对 u_{DC} 进行正弦脉宽调制(sine pulse width modulation, SPWM)后产生的电压基波分量, 它的幅值和相位是可控的。这样, 便可以通过控制 u_{AB} 的幅值和相位来控制串联电感 L_S 两端的电压 u_L , 进而控制电网输入电流 i_S 的幅值和相位, 实现功率的双向传输。PWM 整流馈电模块的引入, 也保证了较高的功率因数和较低的输入电流谐波含量^[14-15]。

连接电抗 L_T 、隔离变压器 T 以及 2 个逆变桥 H_3 和 H_4 组成隔离双向 DC/DC 模块。其中: u_B 是蓄电池侧直流电压; u_{TH} 和 u_{TL} 是逆变器 H_3 、 H_4 产生的占空比为 50%的方波电压。通过控制 u_{TH} 和 u_{TL} 间的移相角 ϕ , 便可以在连接电抗 L_T 和隔离变压器 T 上产生近似于梯形波的高频交变电流, 进而可以控制传输功率的大小和方向, 最终达到直流母线电压 u_{DC} 和蓄电池电压 u_B 的电压变换以及功率的双向传输^[16]。隔离变压器的使用使蓄电池与电网是隔离的, 有利于蓄电池系统的安全运行, 提高可靠性; 另外, 变压器的高频化也使得铁心体积减小, 令变换器的设计更趋模块化, 便于系统升级扩容^[17]。

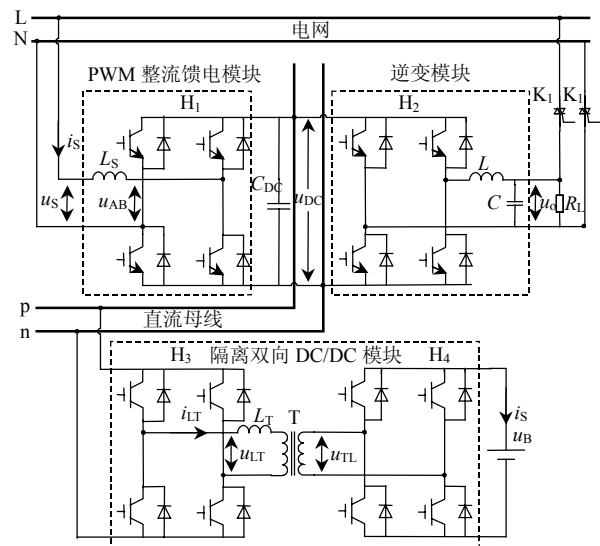


图 2 新型并网 UPS 系统主电路拓扑结构

Fig. 2 Main circuit topology of new grid-connected UPS

单相全桥逆变器 H_2 和 LC 滤波器组成逆变模块。当 UPS 系统处于向负载供电的状态时，逆变模块工作于 SPWM 调制状态，给负载提供高质量的电能。旁路开关采用固态继电器或者双向晶闸管，以提高旁路切换速度，保证切换时负载的供电不间断。

2 新型并网 UPS 系统工作模式

本文设计的新型并网 UPS 系统有旁路供电模式、UPS 供电模式、蓄电池供电模式、蓄电池馈电模式以及扩展发电模式 5 种工作模式。本节对这些工作模式进行介绍。

1) 模式 1：旁路供电模式。

如图 3(a)所示，当市电正常而 UPS 出现故障或手动旁路使能时，转换开关导通，将负载切换至旁路状态，此时整流馈电模块、隔离双向 DC/DC 模块及逆变模块均停止工作，由市电直接给负载供电。

2) 模式 2：UPS 供电模式。

如图 3(b)所示，当市电和 UPS 均正常时，转换开关断开，整流馈电模块工作于 PWM 整流状态，电网通过整流模块、逆变模块给负载供电，同时隔离双向 DC/DC 模块从直流母线上获取电能给蓄电池充电。

3) 模式 3：蓄电池供电模式。

如图 3(c)所示，当市电异常，而 UPS 正常时，

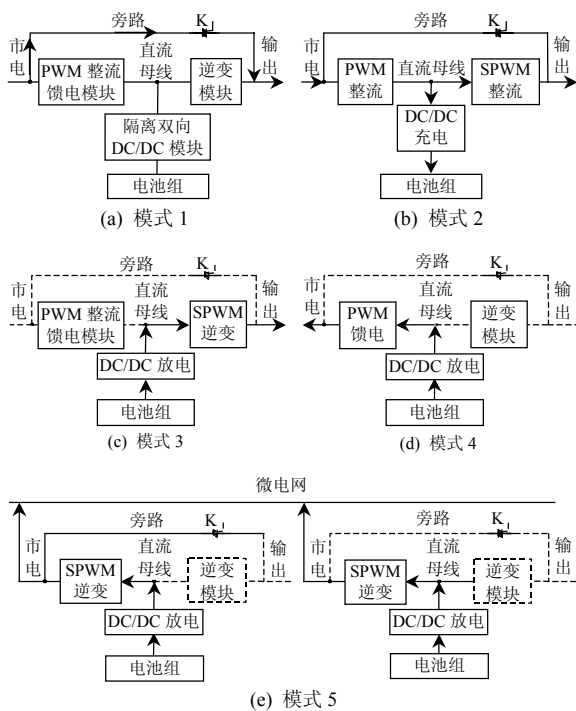


图 3 新型并网 UPS 系统工作模式

Fig. 3 Operation mode of new grid-connected UPS

转换开关断开，整流馈电模块停止工作，蓄电池通过隔离双向 DC/DC 模块、逆变模块给负载供电，以保证供电的不间断性。

4) 模式 4：蓄电池馈电模式。

如图 3(d)所示，当市电和 UPS 均正常且馈电指令使能时，转换开关断开，逆变模块停止工作，整流馈电模块工作于 PWM 馈电状态，蓄电池通过隔离双向 DC/DC 模块、馈电模块给电网馈电。

5) 模式 5：扩展发电模式。

如图 3(e)所示，当市电异常而 UPS 正常，并且发电指令使能时，转换开关断开，逆变模块停止工作，整流馈电模块工作于逆变状态，蓄电池通过隔离双向 DC/DC 模块、整流馈电模块给电网发电，供电网上的其他负荷使用。事实上，在电网停电时，此种模式还可以演变成电网下的多个 UPS 进行并联，组成微电网进行发电。

3 系统分散逻辑控制策略

3.1 系统分层控制体系

根据第 2 节的工作模式分析知道，PWM 整流馈电模块、逆变模块以及隔离双向 DC/DC 模块在不同的模式下工作状态不一样，控制量也不一样，为了使各模式能够正确工作及协调切换，本文设计了新型并网 UPS 分层控制体系结构，如图 4 所示。

图 4 中将控制体系分为 4 层：顶层为系统控制目标制定层，系统工作过程中电网掉电、手动控制指令使能等改变工作模式的因素都将对系统的控制目标产生影响；上层为系统工作模式识别层，根据传感器检测到的电压、电流信号或手动控制指令信号，判别系统应该处于的工作模式，并产生相应的逻辑控制信号；中层为核心控制层，根据上层产生的逻辑控制信号判别各模块所处的运行状态，对控制器进行逻辑组合并使能，使能后的控制器根据参考信号及传感器检测到的实际信号按照特定算法进行计算，并最终产生脉冲调制信号，在此层中，将系统控制器离散为 7 个模块化的子控制器，分别是电网电压控制器、电网电流控制器、直流母线电压控制器 1、直流母线电压控制器 2、电池电压控制器、电池电流控制器及输出电压控制器，通过它们的分散逻辑组合实现各模块的控制策略，从而达到不同工作模式下稳态和暂态运行的控制目标；下层为执行层，根据中层产生的脉冲调制信号，发出

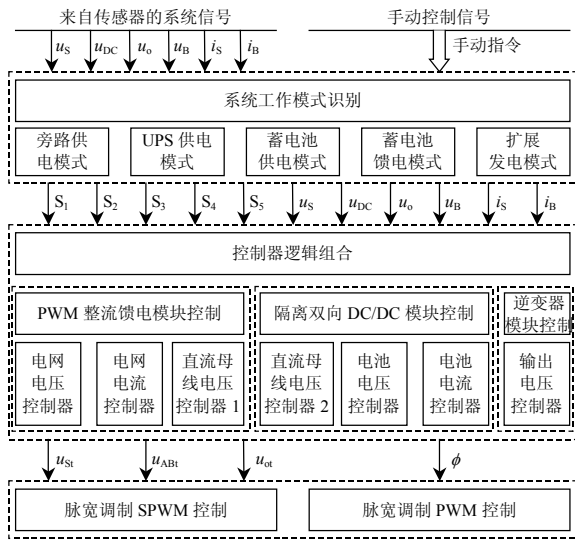


图 4 系统分层控制体系结构图

Fig. 4 Structure frame of control system

相应的开关管驱动脉冲，其中，PWM 整流馈电模块和逆变模块是 SPWM 调制模式，隔离双向 DC/DC 模块是 PWM 调制模式。

3.2 系统分散控制逻辑

根据 3.1 节的分层控制体系分析知道，不同的工作模式下需要对各控制器进行逻辑组合以满足不同状态下的控制目标。以二进制逻辑控制信号 C_1 — C_7 分别代表电网电压控制器、电网电流控制器、直流母线电压控制器 1、直流母线电压控制器 2、电池电压控制器、电池电流控制器及输出电压控制器，当其为 1 时表示对应的模式使能，反之禁止。根据第 2 节的分析，只有在扩展发电模式下，系统才由 PWM 整流馈电模块对电网电压 u_s 进行控制，即有

$$C_1=S_5 \tag{1}$$

在 UPS 供电或蓄电池馈电模式下电网电流 i_s 由 PWM 整流馈电模块控制，即有

$$C_2=S_2 \text{ 或 } S_4 \tag{2}$$

在 UPS 供电或蓄电池馈电模式下直流母线电压 u_{DC} 由 PWM 整流馈电模块控制，即有

$$C_3=SF_2 \text{ 或 } S_4 \tag{3}$$

在蓄电池供电或扩展发电模式下直流母线电压 u_{DC} 由隔离双向 DC/DC 模块控制，即有

$$C_4=S_3 \text{ 或 } S_5 \tag{4}$$

在 UPS 供电模式下电池电压 u_B 由隔离双向 DC/DC 模块控制，即有

$$C_5=S_2 \tag{5}$$

在 UPS 供电或蓄电池馈电模式下电池电流 i_B 由隔离双向 DC/DC 模块控制，即有

$$C_6=S_2 \text{ 或 } S_4 \tag{6}$$

在 UPS 供电或蓄电池供电模式下输出电压 u_o 由逆变模块控制，即有

$$C_7=S_2 \text{ 或 } S_3 \tag{7}$$

根据上述分析可将系统控制逻辑进行归纳，如表 1 所示。

表 1 系统控制逻辑

Tab. 1 Control logic of system

工作模式	控制量		
	整流馈电模块	双向 DC/DC 模块	逆变模块
旁路供电模式	不控	不控	不控
UPS 供电模式	i_s, u_{DC}	i_B, u_B	u_o
蓄电池供电模式	不控	u_{DC}	u_o
蓄电池馈电模式	i_s, u_{DC}	i_B	不控
扩展发电模式	u_s	u_{DC}	不控

事实上，PWM 整流馈电模块、隔离双向 DC/DC 模块以及逆变模块均是通过直流母线进行能量交换的，所以直流母线电压 u_{DC} 的控制逻辑一定要正确设计，否则系统各工作模式将无法正常工作。

4 各模块分散逻辑控制策略的设计

4.1 PWM 整流馈电模块分散逻辑控制策略

根据表 1 的分析，可将系统控制按照 PWM 整流馈电模块、隔离双向 DC/DC 模块以及逆变模块来分别设计。本节中将上述 7 个子控制器全部设计为比例积分(proportion integral, PI)控制器。

PWM 整流馈电模块在 UPS 供电模式下处于可控整流状态，在蓄电池馈电模式下处于馈电状态，均对直流母线电压和电网电流进行控制，在扩展发电模式下处于逆变状态，对电网电压进行控制，控制策略设计如图 5 所示。

图 5 中： u_{DC}^* 是直流母线电压的参考值； i_{sm} 是电网输入电流的幅值参考值； i_s^* 是电网输入电流的参考值； u_s^* 是电网电压的参考值。在 UPS 供电或蓄电池模式下，即 $C_2=C_3=S_2$ 或 $S_4=1$ ，直流母线电压控制器 1 和电网电流控制器被选通；在扩展发电模式下，即 $C_1=S_5=1$ ，电网电压控制器被选通。

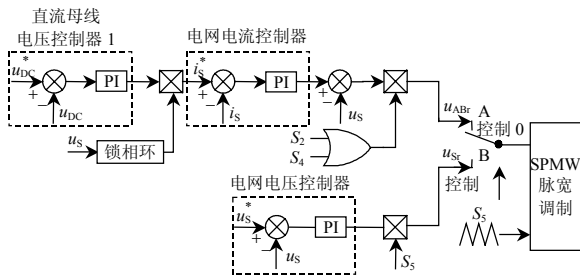


图 5 PWM 整流馈电模块控制策略

Fig. 5 Control strategy of PWM rectifier and feeder module

直流母线电压控制器和电网电流控制器组成双闭环控制，将直流母线电压偏差经过控制器后作为电流幅值参考，电压相位作为电流相位参考，从而得到参考电流，电流偏差经过控制器后得到调制信号 u_{ABr} ，其中在电流控制器后增加相电压前馈控制，即在电流跟踪环节 PI 输出值上叠加相应相电压 u_s ，可抑制系统电压波动对输出电流造成的影响^[18]。通过对调制信号 u_{ABr} 的控制便可以控制串联电感 L_s 两端的电压 u_L ，进而控制电网输入电流 i_s 的幅值和相位，实现功率的双向传输。事实上，本文在控制中，将使其始终工作在单位功率因数整流或者单位功率因数馈电状态，以实现有功功率的双向传输，另外对电网电流 i_s 的控制也使得 UPS 系统相对电网成为一个绿色用户。

在扩展发电模式下，PWM 整流馈电模块工作在逆变状态，由于此时已没有电网电压作为支撑，所以需要系统自生成电压参考信号 u_s^* ，然后进行电压单闭环 SPWM 控制。

4.2 隔离双向 DC/DC 模块分散逻辑控制策略

隔离双向 DC/DC 模块在 UPS 供电模式下处于充电状态，对电池电压和电流进行控制；在蓄电池供电和扩展发电模式下处于被动放电状态，对直流母线电压进行控制；在蓄电池馈电模式下，处于恒流放电状态，对电池电流进行控制。控制策略设计如图 6 所示。

图 6 中： u_B^* 是电池电压的参考值； i_{B1}^* 和 i_{B2}^* 分别是 UPS 供电和蓄电池馈电模式下的电池电流参考值； ϕ_1 和 ϕ_2 是不同模式下的移相角控制值。在蓄电池供电或扩展发电模式下，即 $C_4=S_3$ 或 $S_5=1$ ，直流母线电压控制器 2 被选通；在 UPS 供电模式下，即 $C_5=S_2=1$ ，电池电压控制器被选通；在 UPS 供电或蓄电池馈电模式下，即 $C_6=S_2$ 或 $S_4=1$ ，电池电流控制器被选通。

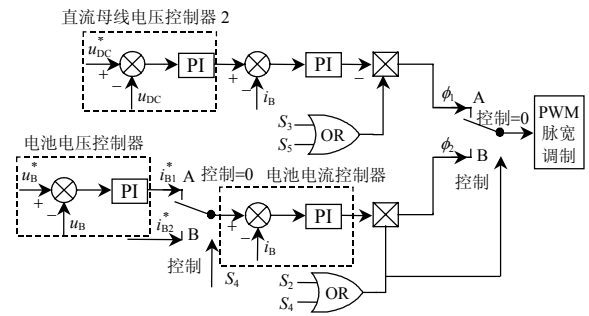


图 6 隔离双向 DC/DC 模块控制策略

Fig. 6 Control strategy of isolated bidirectional DC-DC module

从图 6 中可以看出，隔离双向 DC/DC 也是采用双闭环反馈控制，将直流母线电压或电池电压偏差作为电池电流参考值，可以对电池电流限幅，电流偏差经过控制器后得到移相角控制值，输入 PWM 脉宽调制单元产生驱动脉冲。事实上，通过控制 u_{TH} 和 u_{TL} 间的移相角 ϕ ，便可以在连接电抗 L_T 和隔离变压器 T 上产生近似于梯形波的高频交变电流 i_{LT} ^[18]，设其在一个开关周期内的平均值为 I_{LT} ，则有

$$I_{LT} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi i_{LT} d\theta = \frac{\phi(\pi - |\phi|)u_B}{\pi\omega L_T} \quad (8)$$

式中： ϕ 为 u_{TH} 和 u_{TL} 间的移相角， $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$ ； ω 为开关频率。由式(8)可知，通过控制移相角 ϕ 在 $-\pi/2$ 至 $\pi/2$ 内变化，便可以控制电流 I_{LT} 的大小和正负，即可控制传输功率的大小和方向，最终达到控制直流母线电压、蓄电池电压及电流的目的。

4.3 逆变模块分散逻辑控制策略

逆变模块主要用于向负载提供高质量的电能，当系统处于 UPS 供电或蓄电池供电模式时使能输出电压控制器。逆变模块控制策略如图 7 所示。

图 7 中： u_{orms}^* 是输出电压有效值的参考值； u_{orms} 是输出电压有效值的实测值； u_o^* 是输出电压参考值； u_{or} 是输出电压的调制信号。在 UPS 供电或蓄电池供电模式下，即 $C_7=S_2$ 或 $S_3=1$ ，输出电压控制器被选通。

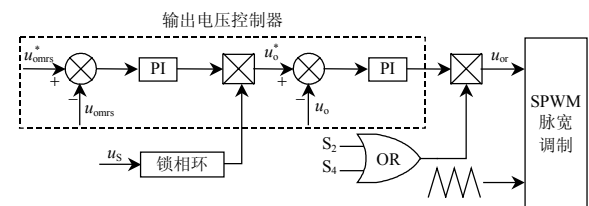


图 7 逆变模块控制策略

Fig. 7 Control strategy of inverter module

逆变模块采用有效值外环和瞬时值内环的双闭环控制策略,电压有效值偏差经过控制器后形成输出电压的幅值参考值,以保证输出电压波形的幅值与参考值一致;电压瞬时值偏差经过控制器后形成输出电压的调制信号,与三角载波进行比较得到开关管的驱动脉冲,瞬时值环用来控制电压波形的正弦度,减小输出电压的波形畸变。

5 仿真与实验分析

5.1 仿真分析

为验证系统拓扑与控制的有效性,本文基于 EMTDC/PSCAD 软件,设计了一套 3kW 仿真系统,主要参数如表 2 所示。

表 2 系统主要参数

Tab. 2 Main parameters of system

参数	数值	参数	数值
电网侧电感 L_S /mH	5	变压器变比	400/200
母线电容 C_{DC} /μF	2 200	电网电压 u_S /V	220
输出侧电感 L /mH	2	蓄电池电压 u_B /V	192
输出侧电容 C /μF	40	开关频率/kHz	10
连接电感 L_T /μH	300	负载电阻 R_o /Ω	18

图 8(a)是 PWM 整流馈电模块在 UPS 供电及蓄电池馈电模式下的工作波形。从图中可以看出,UPS 供电时电网电压与输入电流同相位,在系统由供电状态切换到馈电状态时,输入电流变换为与电压反相位,即系统始终以单位功率因数进行有功功率的双向传输。图 8(b)所示是扩展发电模式下电网侧的电压波形,从图中可以看出,系统经过 0.15 s 后到达稳定状态。

图 9(a)是隔离双向 DC/DC 模块在 UPS 供电及蓄电池供电模式下的工作波形,图 9(b)是控制过程中移相角的变化曲线。从图中可以看出,UPS 供电时蓄电池先恒流后恒压充电,在系统由 UPS 供电状态切换到蓄电池供电状态时,移相角和蓄电池电

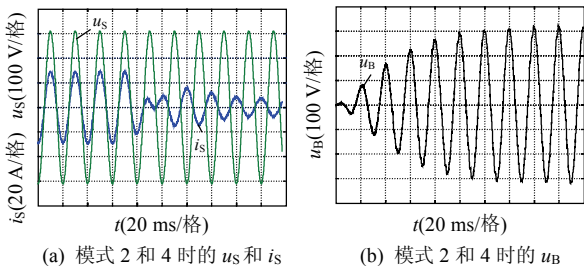


图 8 PWM 整流馈电模块仿真波形
Fig. 8 Simulation waveforms of PWM rectifier and feeder module

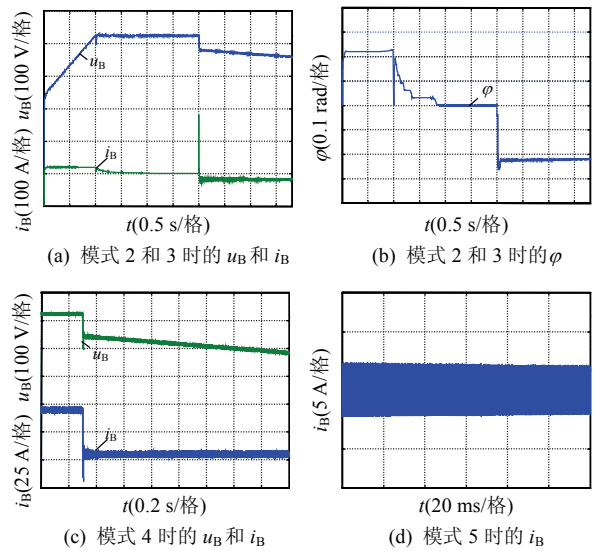


图 9 隔离双向 DC/DC 模块仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of isolated bidirectional DC-DC module

流均迅速由正变负,蓄电池放电电流在 -20 A 左右波动。图 9(c)、(d)是 DC/DC 模块在馈电和扩展发电模式下的工作波形,从图中可以看出:由 UPS 供电向馈电模式转换时,系统迅速达到稳定,蓄电池以 -20 A 恒流放电,电压逐渐下降;扩展发电时由于直流母线电压由 DC/DC 模块控制,而蓄电池电流不控,所以电流存在较大的波动量。

图 10(a)是逆变模块在 UPS 供电和蓄电池供电模式下的工作波形,图 10(b)是输出电压的 THD 分析。由图 10 可知,系统在 2 种模式间切换时输出电压基本保持不变,THD 经过短暂的波动后始终保持在 0.5% 以下,保证了供电质量与供电不间断性。

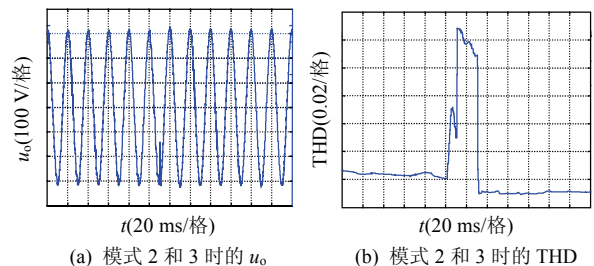


图 10 逆变模块仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of the inverter module

5.2 实验分析

5.2.1 稳态实验分析

本节搭建了一套 3 kW 实验样机对上文分析的新型并网 UPS 及其控制方法进行验证。样机主电路参数见表 2,控制器采用 TMS320F2812,开关管选用三菱公司的 IPM(PM150CL1A120),蓄电池采用

16 节 12 V 锂电池串联成 192 V，直流母线电压设计为 400 V。

图 11 所示是 UPS 供电模式下的系统稳态波形。从图中可以看出：电网电压 u_S 与电网电流 i_S 同相位，功率因数为 1，且 i_S 为标准正弦波；直流母线电压 u_{DC} 由 PWM 整流馈电模块控制，稳定在 400 V；蓄电池以 5 A 进行恒流充电，端电压 u_B 为 220 V；系统输出电压 u_o 有效值为 220 V，THD 为 2.4%。

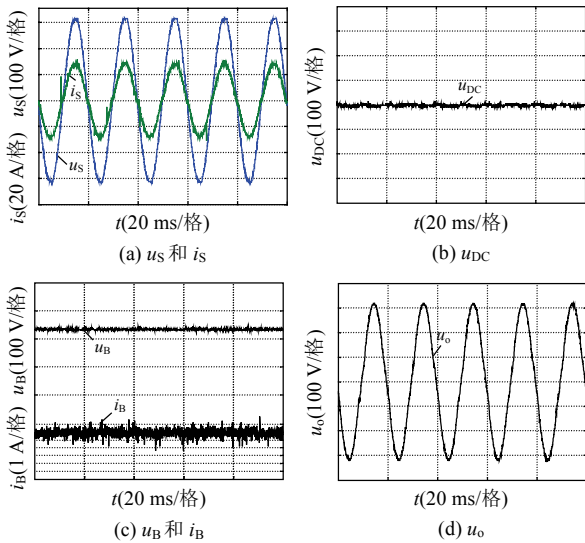


图 11 UPS 供电模式下系统稳态波形

Fig. 11 Steady-state waveforms in UPS-powered model

图 12 所示是蓄电池供电模式下的系统稳态波形。从图 12 可以看出：蓄电池端电压 u_B 为 160 V，比充电时低；由于直流母线电压由 DC/DC 模块控制，而蓄电池电流不控电流，所以电流在 $-30 \sim 20$ A 范围内以工频 50 Hz 的二倍频进行波动；直流母线电压 u_{DC} 仍然稳定在 400 V；系统输出电压 u_o 有效值仍为 220 V，THD 为 1.6%。

图 13 所示是馈电模式下的系统稳态波形。从图 13 可以看出：电网电压 u_S 与电网电流 i_S 相位相反，功率因数为 -1，仅向电网馈送有功功率，且 i_S

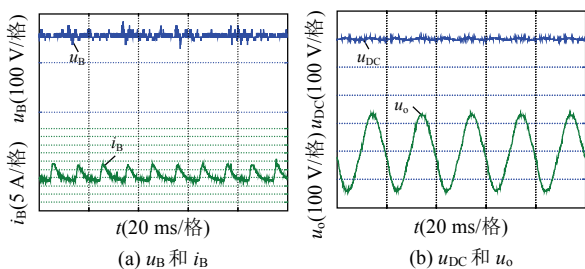


图 12 蓄电池供电模式下系统稳态波形

Fig. 12 Steady-state waveforms in battery-powered model

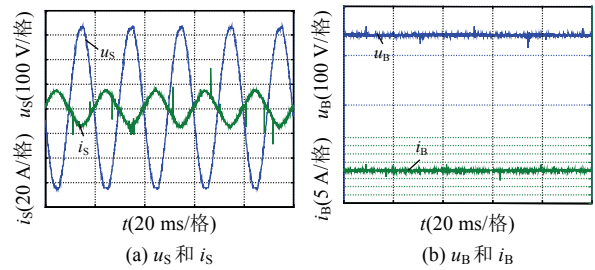


图 13 蓄电池馈电模式下系统稳态波形

Fig. 13 Steady-state waveforms in battery-feed model

为标准正弦波；蓄电池以 -20 A 进行恒流放电，端电压 u_B 为 150 V。直流母线电压 u_{DC} 由 PWM 整流馈电模块控制，波形与图 11(b) 一致，稳定在 400 V。

扩展发电模式下系统稳态波形与蓄电池供电模式下一致，直流母线电压 u_{DC} 由隔离双向 DC/DC 控制，稳定在 400 V；蓄电池电流 i_B 在 $-30 \sim 20$ A 范围内以工频 50 Hz 的二倍频进行波动，端电压 u_B 为 160 V；但此时输出电压变为电网侧电压，以给电网侧其他负载供电。

从上述稳态实验波形中可以得出，系统输出电压 THD 保持在 3% 以内，电网与系统始终以单位功率因数进行有功功率的双向传输，并且电流波形畸变小，其他各项电量稳态值也与上文分析一致。

5.2.2 暂态实验分析

图 14 所示是 UPS 供电向蓄电池供电模式转换时的系统暂态波形。从图中可以看出：蓄电池由充电状态迅速切换到放电状态，电流由 5 A 降低到 -20 A，电压由 200 V 下降到 170 V；直流母线电压和输出电压经过很小的暂态波动后迅速达到稳定状态，保证了供电的不间断性。

图 15 所示是从蓄电池馈电模式启动时的系统暂态波形。从图中可以看出：PWM 整流馈电模块先处于不控整流状态，将直流母线电压 u_{DC} 提高至 320 V 左右，接着处于馈电状态，控制直流母线电

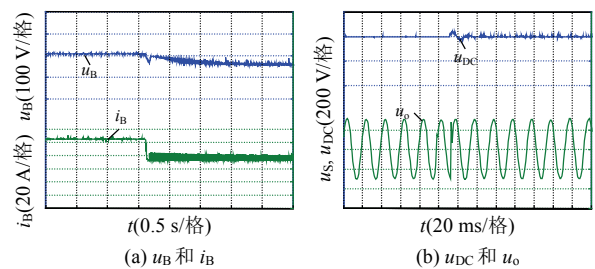


图 14 UPS 供电切换至蓄电池供电模式时系统暂态波形

Fig. 14 Transient waveforms from UPS-powered model to battery-feed model

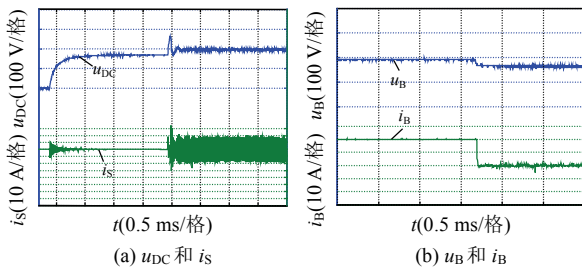


图 15 蓄电池馈电模式启动时系统暂态波形

Fig. 15 Transient waveforms when system startup in battery-feed model

压保持在 400 V, 同时向电网馈送有功电流 i_s ; 蓄电池由空载迅速切换到放电状态, 以 -20 A 进行恒流放电, 电压由 192 V 下降到 170 V。

图 16 所示是从扩展发电模式启动时的系统暂态波形。从图中可以看出, 电网掉电后, 直流母线电压 u_{DC} 和电网电压 u_s 经过 0.5 s 左右的过渡过程后达到稳定状态, 向电网上的其他负载供电。蓄电池由控制切换到放电状态, 电压由 192 V 下降到 180 V, 电流从 0 下降到 -30 A 左右, 并存在较小的波动。

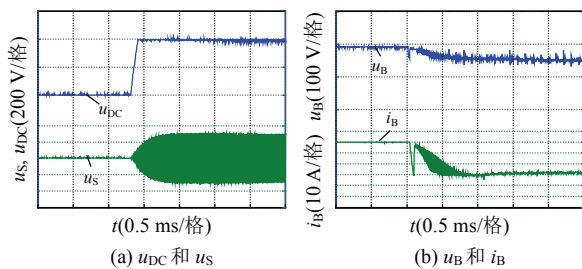


图 16 扩展发电模式启动时系统暂态波形

Fig. 16 Transient waveforms when system startup in expansion generation model

根据上文的仿真和实验结果可知, 系统在稳态和暂态过程下都能正常工作, 且达到了控制要求, 证明了本文设计的拓扑与控制策略的正确性和有效性。

6 结语

随着智能电网建设的提出, 单一耗电设备已经无法达到其发展要求, 绿色、节能、并网型用电设备成为发展趋势。本文提出了一种具有馈电功能的新型并网 UPS 系统及其拓扑结构, 并设计了一种分散逻辑控制策略。从理论分析以及仿真和实验结果, 可以得到如下结论:

1) 本文设计的新型并网 UPS 系统及其控制策

略不仅可以实现传统 UPS 的基本功能, 还可实现蓄电池与电网的并网, 在需要将多余电能回馈电网, 以实现智能电网下的电能最优利用; 另外, 采用 PWM 控制算法也使得 UPS 成为电网的绿色用户。

2) 该系统具有绿色、节能及并网的特性, 便于不同种类不同特性的储能系统接入, 可应用于光伏发电、风力发电等分布式系统, 为智能电网下新型用电设备的开发提供参考。

3) 提出了一种分散逻辑控制策略, 它的设计方法具有一般性, 可为其他电力领域控制器的设计提供参考。

参考文献

- [1] Singh C, Gubbala N, Gubbala N. Reliability analysis of electric supply including standby generators and an uninterruptible power supply system[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1994, 30(5): 1298-1302.
- [2] Josep M G, Juan C V, Jose M, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 726-736.
- [3] 韩微, 李良光, 张运乾. 一种双变换器 UPS 拓扑结构的研究[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 69-72.
Han Wei, Li Lianguang, Zhang Yunqian. Research on topologies configuration of a double converted UPS [J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(1): 69-72(in Chinese).
- [4] Vazquez N, Aguilar C, Arau J, et al. A novel uninterruptible power supply system with active power factor correction[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2002, 17(3): 405-412.
- [5] da Silva S A O, Donoso-Garcia P F, Cortizo P C, et al. A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2002, 38(6): 1581-1590.
- [6] Pai F S, Huang S J. A novel design of line-interactive uninterruptible power supplies without load current sensors[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, 21(1): 202-210.
- [7] 邓春花. UPS 系统中蓄电池充电的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
Deng Chunhua. Study on storage battery's charging in UPS[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008(in Chinese).
- [8] Chia C Y, Madhav D M. A reconfigurable uninterruptible

- power supply system for multiple power quality applications[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2007, 22(4): 1361-1372.
- [9] Tao H, Duarte J L, Hendrix M A M. Line-interactive UPS using a fuel cell as the primary source [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 3012-3021.
- [10] Park J D, Kalev C, Hofmann H F. Control of high-speed solidrotor synchronous reluctance motor/generator for flywheel-based uninterruptible power supplies[J]. IEEE Trans. on Industry Electronics, 2008, 55(8): 3038-3046.
- [11] 李勋, 戴珂, 杨荫福, 等. 双变流器串-并联补偿式 UPS 控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 104-108.
Li Xun, Dai Ke, Yang Yinfu, et al. Study of control strategy for series-parallel compensated UPS with double converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 104-108(in Chinese).
- [12] 胡学浩. 智能电网-未来电网的发展态势[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.
Hu Xuehao. Smart grid-a development trend of future power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 1-5(in Chinese).
- [13] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-6.
Chen Shuyong, Song Shufang, Li Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-6(in Chinese).
- [14] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
Xiao Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4(in Chinese).
- [15] 陈耀军, 钟炎平. 基于合成矢量的电压型 PWM 整流器电流控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 143-148.
Chen Yaojun, Zhong Yanping. Study on the current control for voltage-source PWM rectifier using complex vectors [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 143-148(in Chinese).
- [16] 陈瑶, 董亦斌, 金新民. 基于 PWM 整流器的 SVPWM 谐波分析新算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 76-80.
Chen Yao, Dong Yibin, Jin Xinmin. A novel algorithm of SVPWM harmonic analysis based on PWM rectifier [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 76-80(in Chinese).
- [17] Mi C, Bai H, Wang C, et al. Operation, design and control of dual H-bridge-based isolated bidirectional DC-DC converter[J]. IET Power Electronics, 2008, 1(4): 507-517.
- [18] 金一丁, 宋强, 刘文华. 基于公共直流母线的链式可扩展电池储能系统及控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 66-70.
Jin Yiding, Song Qiang, Liu Wenhua. Control and analysis of extensible cascaded battery energy storage system based on a common dc bus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 66-70(in Chinese).



赵彪

收稿日期: 2011-05-05。

作者简介:

赵彪(1987), 男, 博士研究生, 研究方向为电力变流技术与应用等, zhaobiao112904829@126.com;

于庆广(1966), 男, 博士, 副教授, 研究方向为柔性交流输电技术及应用;

王立雯(1988), 女, 硕士研究生, 研究方向为并网逆变器技术。

(责任编辑 刘浩芳)