

两级式储能逆变器并离网控制技术

吴伟亮^{1,2}, 侯凯^{1,2}, 王小红^{1,2}, 杨合民^{1,2}, 简优宗^{1,2}, 胡静^{1,2}

[1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106]

摘要: 随着新能源的大规模应用, 储能装置作为一种可控电源, 因具有调峰幅度大、响应速度快等优点而在保证微电网正常运行方面具有重要作用。介绍了一种两级式储能逆变器, 一级是三相全控桥构成的网侧变换器, 另一级是 3 个交错并联回路构成的直流变换器。阐述了该储能逆变器在并网和离网工作模式下的控制原理及并离网切换的技术关键点。通过 MATLAB 仿真验证了该储能逆变器采用所提控制策略可以实现并网、离网的正常运行以及并离网切换的顺利过渡, 采用 3 个交错并联回路结构的直流变换器可以提高总输出电流能力, 通过载波移相可以减小总输出电流波动。储能逆变器可靠地实现了微电网的并网和离网运行控制, 有效地改善了可再生能源发电输出功率的连续性, 为新能源领域进一步发展提供了技术保障。

关键词: 微电网; 储能逆变器; 并网; 离网; 交错并联回路; 载波移相

中图分类号: TM 464 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)05-0072-07

doi: 10.12177/emca.2021.009

On-Grid/Off-Grid Control Technology of Two-Stage Energy Storage Inverter

WU Weiliang^{1,2}, HOU Kai^{1,2}, WANG Xiaohong^{1,2}, YANG Hemin^{1,2}, JIAN Youzong^{1,2}, HU Jing^{1,2}

(1. NARI Group Corporation / State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China;

2. State Grid NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In the large-scale application of new energy, energy storage device acts as a kind of controllable power supply. It has the advantages of large amplitude of peak regulation and fast response, so it plays an important role in ensuring the normal operation of microgrid. A two-stage energy storage inverter is introduced: one stage is the grid side converter which is composed of three-phase full control bridge, and the other stage is the DC converter which is composed of three interleaved parallel circuits. Then, the control principles of the energy storage inverter in on-grid/off-grid operation mode and the key points of switching between on-grid/off-grid are introduced. The MATLAB simulations show that the proposed control strategy can realize the normal operation of on-grid/off-grid and the smooth transition of switching between on-grid and off-grid, and the DC converter can improve the total output current capacity by three interleaved parallel circuits and reduce the total output current fluctuation by carrier phase shifting. The energy storage inverter can reliably realize the on-grid/off-grid operation control of microgrid. The continuity of renewable energy power generation output power is effectively improved, and the technical support for the further development of new energy field is provided.

Key words: microgrid; energy storage inverter; on-grid; off-grid; interleaved parallel circuits; carrier phase shifting

收稿日期: 2021-02-03; 收到修改稿日期: 2021-03-02

作者简介: 吴伟亮(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子与电机控制。

0 引言

近年来以光伏发电、风力发电为主的新能源产业发展越来越迅速,但是这些新能源发电的波动性大,可预测性较差,导致新能源的利用率降低^[1-4]。而微电网系统中的储能系统能够解决新能源发电波动性大、稳定性差的问题。储能系统可以将新能源发电中多余的电能储存到电池中,在用电量小时将电池能量释放到电网中,实现“削峰填谷、调剂余缺”^[5-7]的功能,从而提高了电能的利用率。

储能系统的核心部分是储能逆变器,承担着变流任务,本质是双向可逆的交流/直流变换器,既可以将电网输出的电能或新能源发电经过储能逆变器变成直流给电池充电,又可以将电池释放的能量经储能逆变器变成交流回馈给电网或者给负载供电。

文献[8-10]采用的是单级式储能逆变器,虽然结构简单、功率器件较少,但缺点是直流输出电压范围小,必须提高蓄电池额定电压。

本文设计了一种两级式储能逆变器,其中一级是网侧三相全桥变换器,另一级是由3个交错并联回路构成的直流变换器。与单级式储能逆变器相比,不仅扩大了直流输出电压范围,而且提高了总输出电流的能力。采用该储能逆变器可以实

现并网、离网运行。

1 主回路拓扑结构

图1为两级式储能逆变器的主回路结构,包括380 V/50 Hz电网、输入断路器(ICB)、预充电接触器(PSW)、预充电电阻 R_g 、负载、网侧滤波电容 C_g 、网侧滤波电感 L_g 、网侧变换器、直流支撑电容 C_{dc} 、直流变换器、输出滤波电感(L_{o1} 、 L_{o2} 、 L_{o3})、输出滤波电容 C_o 、直流断路器(OCB1、OCB2)、直流预充电电阻 R_b 、蓄电池等部分。该设计可以实现能量从电网流出,经过网侧变换器和直流变换器,转换成直流电,给蓄电池充电;也可以实现能量从蓄电池流出,经过直流变换器和网侧变换器,转换成交流电,给负载供电。直流变换器由3个交错并联的回路组成。图1中 u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 为电网电压, i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为电网电流, u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 为输入储能逆变器电压, i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 为输入储能逆变器电流, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 为输入网侧变换器电流, U_{dc} 为直流母线电压, i_{o1} 、 i_{o2} 、 i_{o3} 为直流变换器各回路输出电流, U_o 为直流变换器输出电压, i_o 为直流变换器总输出电流。图1中m为计算电网输入有功功率点,n为计算输入储能逆变器有功功率点,p为计算输入网侧变换器有功功率点,q为计算输入蓄电池有功功率点。

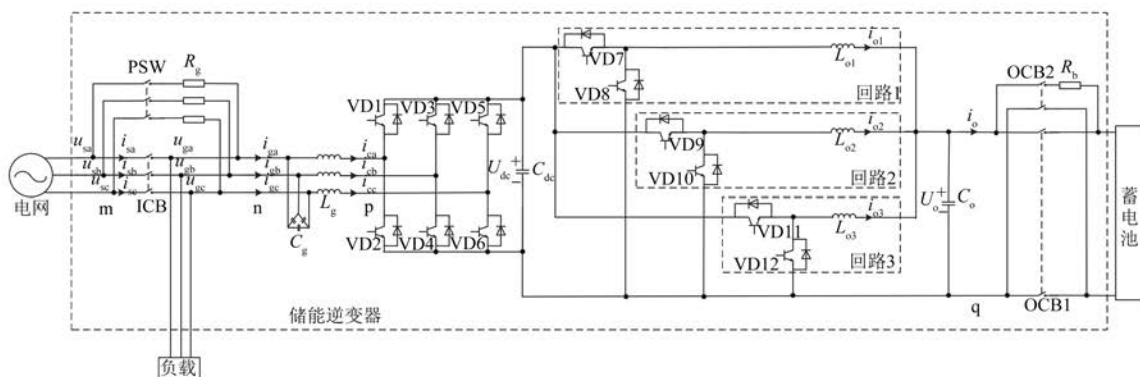


图1 两级式储能逆变器的主回路结构

2 控制原理

两级式储能逆变器有2种工作模式:并网工作模式和离网工作模式。并网工作模式下,电网直接给负载提供能量,同时电网能量流向蓄电池,此过程网侧变换器为整流模式,控制直流母线电

压稳定,直流变换器的3个交错并联回路均工作在降压斩波模式,将直流母线电压降压后给蓄电池充电。离网工作模式下,电网与负载断开连接,能量由蓄电池流向负载,此过程网侧变换器为逆变模式,控制交流电压稳定,从而实现负载供电电源稳定,直流变换器的3个交错并联回路均工作

在升压斩波模式,通过释放蓄电池能量维持直流母线电压稳定。

2.1 并网工作模式

2.1.1 并网工作模式下网侧控制

并网工作模式下,网侧变换器为整流模式,采用直流母线电压外环和交流电流内环双闭环控制策略,来控制直流母线电压和输入功率。根据整流器数学模型推导出实际的控制电压如下:

$$\begin{cases} v_{cd} = -\left(K_{Pi} + \frac{K_{Li}}{S}\right)(i_{cd}^* - i_{cd}) + \omega L_g i_{cq} + u_{gd} \\ v_{cq} = -\left(K_{Pi} + \frac{K_{Li}}{S}\right)(i_{cq}^* - i_{cq}) - \omega L_g i_{cd} + u_{gq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{cd} 、 i_{cq} 为输入网侧变换器电流的 d 、 q 轴分量反馈值; i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 为 d 、 q 分量参考值; u_{gd} 、 u_{gq} 为输入储能逆变器电压的 d 、 q 轴分量反馈值; v_{cd} 、 v_{cq} 为输出控制电压; ω 为314 rad/s; K_{Pi} 为电流内环比例系数; K_{Li} 为积分系数。

并网工作模式下网侧变换器控制策略框图如图2所示。其中, U_{dc}^* 为直流母线电压参考值, θ_g 为输入储能逆变器电压锁相角。直流母线电压经过外环PI调节器后输出 i_{cd}^* ,作为网侧变换器电流 d 轴分量参考值, q 轴分量参考值 i_{cq}^* 设为零。然后 i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 分别与 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 坐标变换得到的 i_{cd} 、 i_{cq} 一同输入到电流内环PI调节器中,内环PI调节器的输出量取反后加上解耦量、输入储能逆变器电压前馈量 u_{gd} 、 u_{gq} 构成控制电压 v_{cd} 、 v_{cq} ,再经过反Park变换和空间矢量脉宽调制(SVPWM)后驱动网侧变换器正常工作。

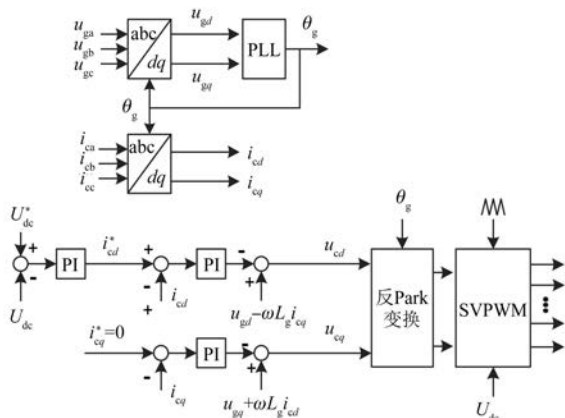


图2 并网工作模式下网侧变换器控制策略

2.1.2 并网工作模式下直流侧控制

并网工作模式下,直流变换器的3个交错并联回路均工作在降压斩波模式,此过程只有VD7、VD9、VD11功率单元中的全控器件工作,而VD8、VD10、VD12功率单元中只有反并联二极管参与续流工作。每个回路采用输出电流单闭环控制策略控制输入到蓄电池的总电流。并网工作模式下直流变换器控制策略框图如图3所示,其中 i_{ref1} 、 i_{ref2} 、 i_{ref3} 分别为直流变换器的回路1、回路2、回路3的输出电流环的参考值,3个参考值可以设置相同或者不同。采用3个回路交错并联的方式,可以提高总输出电流能力,同时控制不同回路的载波之间差为 120° 可以减小总输出电流的波动。

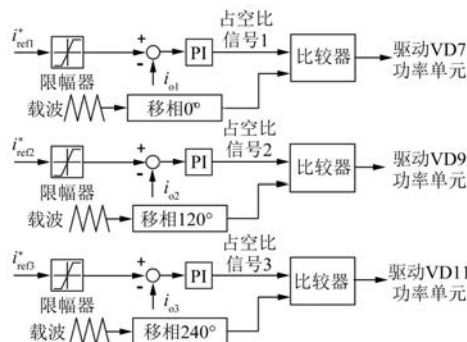


图3 并网工作模式下直流变换器控制策略

2.2 离网工作模式

2.2.1 离网工作模式下网侧控制

离网工作模式下,网侧变换器为逆变模式,采用交流电压外环和交流电流内环双闭环控制策略,控制交流电压稳定,从而实现负载供电电源稳定。根据逆变器数学模型推导出实际的控制电压如下:

$$\begin{cases} v_{cd} = \left(K_{Pi} + \frac{K_{Li}}{S}\right)(i_{cd}^* - i_{cd}) - \omega L_g i_{cq} + u_{gd} \\ v_{cq} = \left(K_{Pi} + \frac{K_{Li}}{S}\right)(i_{cq}^* - i_{cq}) + \omega L_g i_{cd} + u_{gq} \end{cases} \quad (2)$$

离网工作模式下网侧变换器控制策略框图如图4所示。其中, u_{gd}^* 、 u_{gq}^* 为输入储能逆变器电压的 d 、 q 分量参考值, θ_{set} 为频率50 Hz的自生成角度。 u_{gd}^* 和 u_{gq}^* 经过外环PI调节器后输出 i_{cd}^* ,作为输入网侧变换器电流 d 轴分量参考值, u_{gq}^* 和 u_{gd}^* 经过外环PI调节器后输出 i_{cq}^* ,作为输入网侧

变换器电流 q 轴分量参考值。然后 i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 分别与 i_{cd} 、 i_{cq} 一同输入到输入网侧变换器电流内环 PI 调节器中,内环 PI 调节器的输出量加上解耦量、输入储能逆变器电压前馈量 u_{gd} 、 u_{gq} 构成控制电压 v_{cd} 、 v_{cq} ,再经过反 Park 变换和 SVPWM 调制后驱动网侧变换器正常工作。

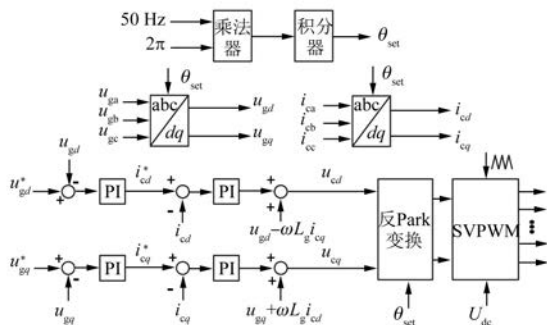


图4 离网工作模式下网侧变换器控制策略

2.2.2 离网工作模式下直流侧控制

离网工作模式下,蓄电池释放能量,经过直流变换器的3个交错并联回路的升压斩波控制,从而控制直流母线电压稳定,此过程只有VD8、VD10、VD12功率单元中的全控器件工作,而VD7、VD9、VD11功率单元中只有反并联二极管参与续流工作。控制策略为3个回路均采用直流母线电压外环和回路输出电流内环双闭环控制,电流内环PI的输出作为占空比信号,控制不同回路的载波之间差为 120° 减小总输出电流的波动。离网工作模式下直流变换器控制策略框图如图5所示。其中, $0 < k_1 < 1$ 、 $0 < k_2 < 1$ 、 $0 < k_3 < 1$,且 $k_1 + k_2 + k_3 = 1$ 。

2.3 并离网切换过程

2.3.1 并网切换至离网工作模式

当电网出现故障或者需要检修时,储能逆变器在接收到并网分闸指令后,储能逆变器连续保存ICB分闸前的输入电网电压相位,在接收到了ICB的分闸反馈信号后,储能逆变器立即由并网工作模式切换至离网工作模式,从而保证微电网供电的连续性。

为了保证储能逆变器并网切换至离网工作模式的平滑性,需要将切换前电网电压相位作为逆变器产生交流电压的初始相位,同时按照设定的交流电压幅值和频率控制逆变器产生的交流

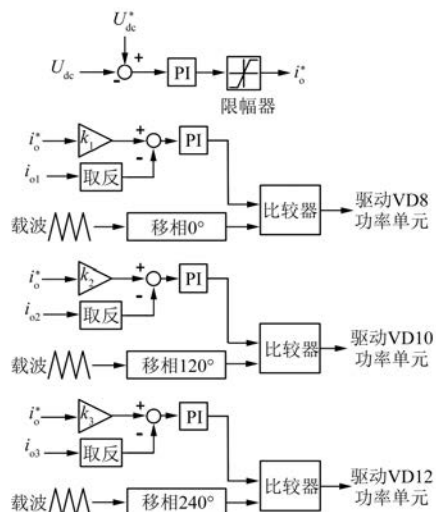


图5 离网工作模式下直流变换器控制策略

电压。

此过程中网侧变换器控制策略由直流母线电压外环和交流电流内环双闭环控制切换至交流电压外环和交流电流内环双闭环控制,直流变换器侧控制策略由输出电流单闭环控制切换至直流母线电压外环和输出电流内环双闭环控制。

2.3.2 离网切换至并网工作模式

当电网恢复正常,而储能逆变器工作在离网工作模式下,储能逆变器在接收到并网合闸指令后,储能逆变器通过交流电压环控制、锁相环(PLL)频率和相位跟踪调整输入储能逆变器电压 u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 的幅值、频率、相位值,使其分别与电网电压的 u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 的幅值、频率、相位值基本一致。然后储能逆变器合闸输入断路器,同时由离网工作模式切换至并网工作模式,从而保证微电网供电的连续性。

为了减小离网切并网操作对微电网产生的电压和电流冲击,在该过程中,逐渐增加或减小逆变器输出电压的幅值跟踪电网电压的幅值,调整逆变器输出电压的相位和频率跟踪电网电压锁相环的相位和频率,保证输入储能逆变器电压与电网电压的幅值、频率、相位值基本一致。

此过程中网侧变换器控制策略由交流电压外环和交流电流内环双闭环控制切换至直流母线电压外环和交流电流内环双闭环控制,直流变换器侧控制策略由直流母线电压外环和输出电流内环双闭环控制切换至输出电流单闭环控制。

3 仿真结果与分析

在 MATLAB 环境中搭建了两级式储能逆变器并、离网控制仿真模型,通过仿真结果验证并网、离网、并网切离网、离网切并网等工作模式下所采用控制策略的有效性。其中交流电网为 380 V/50 Hz,储能逆变器仿真主要参数如表 1 所示。

表 1 储能逆变器主要参数

参数名称	参数值
网侧滤波电容/ μF	55.7
网侧滤波电感/ μH	500
直流支撑电容/ μF	5 000
直流输出滤波电感/ μH	2 200
直流输出滤波电容/ μF	900
直流母线电压目标值/V	850

镍金属氢化物蓄电池参数如表 2 所示。

表 2 镍金属氢化物蓄电池主要参数

参数名称	参数值
额定电压/V	750
关断电压/V	525
最大放电电流/A	130
最大容量/(A·h)	1 050
额定容量/(A·h)	1 000
初始充电状态 SOC/%	85

图 6 为储能逆变器运行在并网工作模式,控制直流变换器 3 个交错并联回路的输出电流均从 0 增长到 30 A 的仿真结果。电流变化率为 30 A/s,最终总输出电流达到 90 A 左右。由图 6 可知,储能逆变器工作在并网模式下直流变换器采用输出电流单闭环控制能够正常工作。对比图 6(a)和图 6(b)可知采用不同回路的载波之间差 120°的调制方式,虽然各回路的电流有较小的偏差,但是能够减小总输出电流的波动。

图 7 为储能逆变器运行在并网工作模式,控制直流变换器的 3 个交错并联回路的输出电流分别从 0 增长到 10、20、30 A 的仿真结果。电流变化率为 30 A/s,总输出电流达到 60 A 左右。控制直流变换器的不同回路的载波之间差 120°。

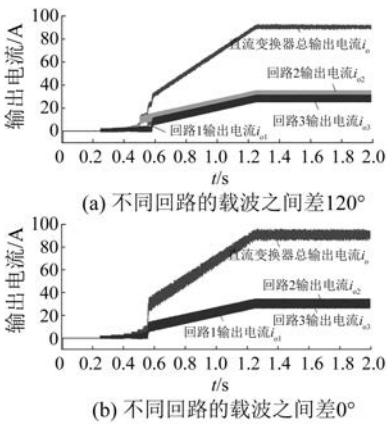


图 6 并网模式下控制直流变换器的回路 1、回路 2、回路 3 输出电流均为 30 A

由图 6 和图 7 可知,并网模式下 3 个回路的输出电流环的参考值可以相同也可以不同,可以根据不同运行场合灵活设定。

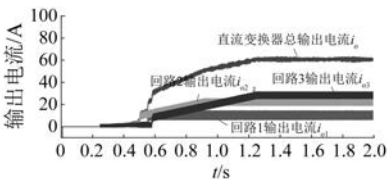


图 7 并网模式下控制直流变换器的回路 1 输出电流 10 A、回路 2 输出电流 20 A、回路 3 输出电流 30 A

图 8 为储能逆变器运行在离网工作模式时直流变换器 3 个回路的输出电流和总输出电流。其中, $k_1=k_2=k_3=\frac{1}{3}$ 。由图 8 可知,储能逆变器工作在离网模式下直流变换器采用直流母线电压外环和输出电流内环双闭环控制能够正常工作。对比图 8(a)和图 8(b)可知,采用不同回路的载波之间差 120°的调制方式,虽然各回路的电流有较小的偏差,但是能够减小总输出电流的波动。

图 9 为储能逆变器运行在离网模式下,控制直流变换器 3 个回路输出不同电流工况下的波形,其中 k_1 设置为 $\frac{1}{2}$ 、 k_2 设置为 $\frac{1}{3}$ 、 k_3 设置为 $\frac{1}{6}$ 。直流变换器控制不同回路的载波之间差 120°。

由图 8 和图 9 可知,离网模式下 3 个回路的输出电流环的参考值可以相同也可以不同,可以根据不同运行场合灵活设定。

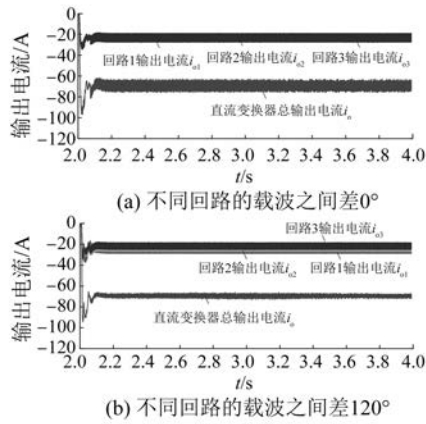


图8 离网模式下直流变换器的回路1、回路2、回路3输出电流和总输出电流

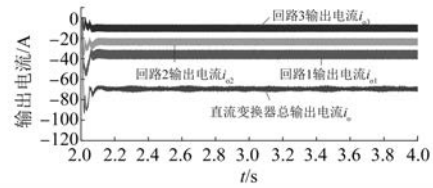


图9 离网模式下控制直流变换器的3个回路电流不同的回路输出电流和总输出电流

图10为储能逆变器运行在并网、并网切离网、离网、离网切并网整个过程的仿真波形。0~0.25 s 储能逆变器未工作, 电网只给 50 kW 负载供电。0.25~2 s 储能逆变器运行在并网工作模式, 此模式下电网不仅给 50 kW 的负载提供能量, 而且通过储能逆变器给蓄电池充电, 其中网侧

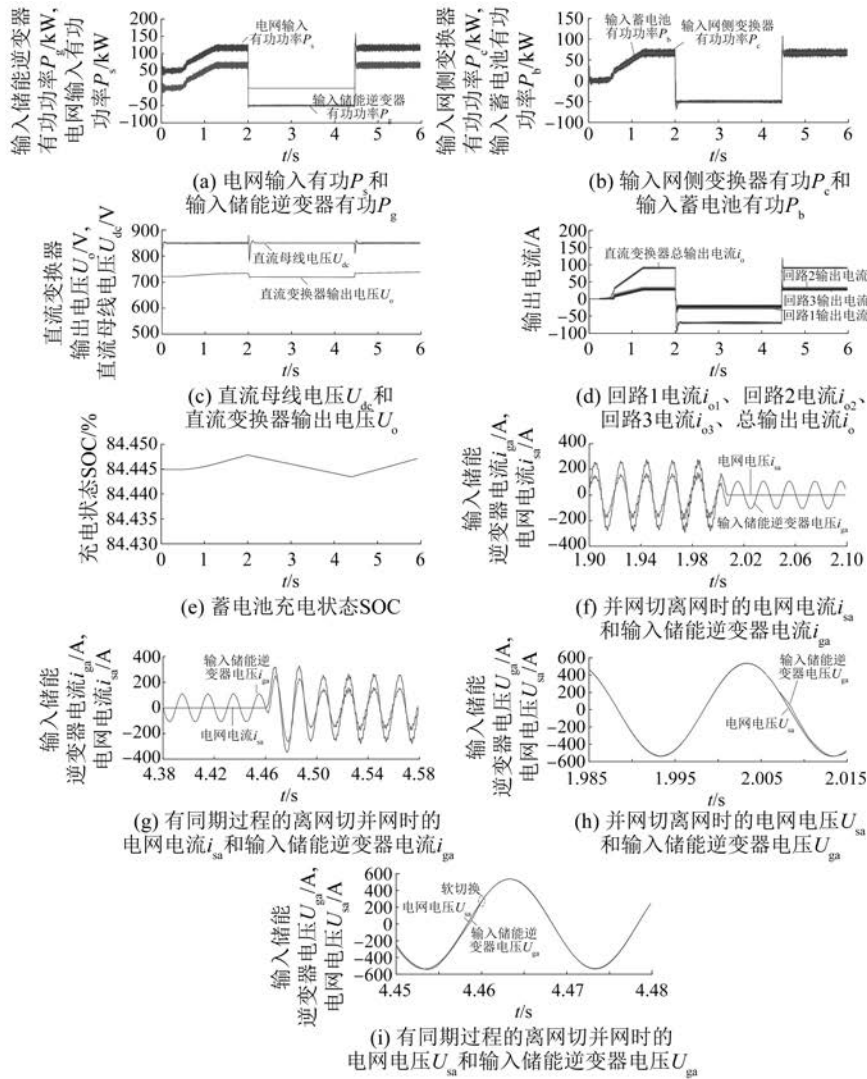


图10 储能逆变器工作在并网、并网切离网、离网、离网切并网各模式下的波形

变换器控制直流母线电压在 850 V 左右,直流变换器的 3 个交错并联回路均控制输出电流 30 A。2~4.46 s 储能逆变器运行在离网工作模式,此模式下蓄电池放电,通过直流变换器升压和网侧变换器逆变产生交流电压,给 50 kW 负载供电。4.46~6 s 储能逆变器运行在并网工作模式。

由图 10 可知采用文中提出的不同工作模式下网侧变换器和直流变换器组合控制策略,能够使储能逆变器在并网、并网切离网、离网、离网切并网各过程中正常运行。由图 10(a)和图 10(b)可知:并网模式下,电网不仅给 50 kW 的负载提供能量,而且通过储能逆变器给蓄电池充电;离网模式下,蓄电池放电,通过直流变换器升压和网侧变换器逆变产生交流电压,给 50 kW 负载供电,从而保证不同模式下负载供电的连续性。

对比图 10(g)、图 10(i)和图 11(a)、图 11(b)可知,离网切并网过程中,如果直接切换到并网,会有电压幅值、相位、频率的突变,导致电网电流和输入储能逆变器电流冲击增大,因此调整逆变器输出电压的幅值来跟踪电网电压的幅值,调整逆变器输出电压的相位、频率来跟踪电网电压锁相环的相位、频率,保证输入储能逆变器电压与电网电压的幅值、频率、相位值基本一致,然后才合闸输入断路器。

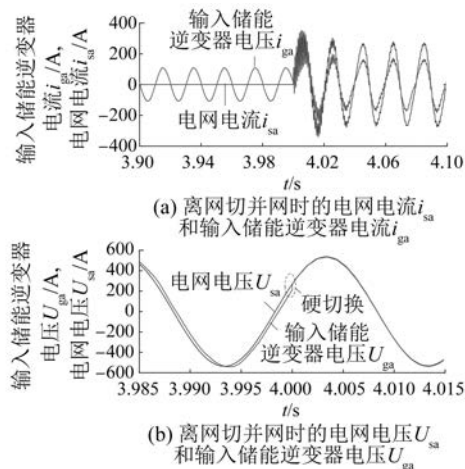


图 11 储能逆变器无同期过程进行离网切并网的电压、电流波形

4 结 语

本文介绍了一种两级式储能逆变器的主回路结构,主要包括网侧变换器和直流变换器,然后介

绍了该储能逆变器在并、离网工作模式下网侧变换器和直流变换器的控制原理,以及并网切离网、离网切并网这些中间过程的技术关键点。通过仿真验证了不同工作模式下采用文中提出的组合控制策略的有效性。直流变换器采用多个交错并联回路可以提高总输出电流能力。采用不同回路的载波偏差 120° 的调制方式,可以明显地减小总输出电流的波动;还可以灵活配置不同回路输出电流环的参考值;离网切并网时可以有效地调整输入储能逆变器电压与电网电压的幅值、频率、相位值基本一致,从而减小了电网电流和输入储能逆变器电流的冲击。储能逆变器能够可靠地实现微电网的并、离网运行控制,有效地改善了可再生能源发电输出功率的连续性,为新能源领域进一步发展提供技术保障。

【参 考 文 献】

- [1] 陈梦恺,付保川,吴征天,等. 微电网中博弈问题及其发展动向[J]. 电器与能效管理技术, 2021(1): 1.
- [2] 赵升,徐小舒,吴征天,等. 区块链技术在分布式能源交易领域的创新应用[J]. 电器与能效管理技术, 2020(11): 1.
- [3] 栾德利,张宇献. 计及可靠性的风光储混合系统优化配置策略[J]. 电器与能效管理技术, 2020(11): 95.
- [4] 于彪,王德强. 单级 T 型三电平大容量储能转换系统设计[J]. 电气传动, 2020, 50(6): 103.
- [5] 王瑜瑜,杨婵娟. 储能逆变器在逆变状态下控制策略的仿真研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(7): 35.
- [6] 刘少军,王瑜瑜. PI 控制策略在储能逆变器中的仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(7): 19.
- [7] 张帅,刘文红,李锋,等. 含储能单元的分布式发电系统仿真研究[J]. 电气自动化, 2015, 37(2): 51.
- [8] 计杭辉,朱永强,唐冀. 基于储能的双模式逆变器并网/离网无缝切换[J]. 电力电子技术, 2016, 50(10): 45.
- [9] 张文波,邵宜祥,田炜,等. 应用于微电网的双模式储能逆变器的研制[J]. 电力电子技术, 2017, 51(1): 56.
- [10] 胡青青,田炜,孙祖勇. 单级型储能逆变器并离网控制和切换研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(11): 68.