

光伏并网逆变器低电压穿越技术研究

王 南, 陈艺峰, 吴恒亮

(南车电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 分析了目前常用的光伏并网逆变器低电压穿越方案, 提出了一种不平衡条件下简易而快速的软件锁相技术, 并基于该锁相技术及相关控制策略设计了一款光伏并网逆变器。仿真和实验结果验证了该技术方案的的有效性。该光伏并网逆变器目前已通过了国家电网公司的低电压穿越认证。

关键词: 低电压穿越; 光伏发电; 并网逆变器; 软件锁相环; 三相不平衡

中图分类号: TM464; TM615

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)01-0038-05

Research on the Technology of Low Voltage Ride-through for Grid-connected Photovoltaic Inverter

WANG Nan, CHEN Yi-feng, WU Heng-liang

(CSR Research of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It analyzes the current commonly used LVRT (low voltage ride-through) solutions, presents a new LVRT SPLP (software phase locked loop) technique which is simpler and faster, and designs a grid-connected PV (photovoltaic) inverter based on the SPLP technique and relative control strategy. Simulation and experiment results show the validity of this technical strategy. The PV grid-connected inverter has passed LVRT certification of the State Grid Corporation.

Key words: LVRT; PV; grid-connected inverter; SPLP; three phase unbalance

0 引言

随着我国光伏设备装机容量在区域电网中所占的比重越来越高, 光伏设备对电网安全稳定运行的影响日益显现。当电网故障或扰动引起发电场并网点的电压波动时, 光伏发电设备的应对措施若不当, 将加剧电网波动, 甚至导致电网大面积瘫痪, 带来无法估量的损失^[1-2]。文献[3]和[4]具体分析了大中型光伏电站实现低电压穿越功能的重要性和必要性。光伏发电技术领先的欧美国家针对光伏发电并网已制定了一系列的标准或提出了具体的技术要求, 其关键技术主要包括低电压穿越(LVRT)及无功和有功调节等。为确保在电网故障时光伏逆变器能保持并网运行, 避免因光伏电站的

突然脱网而影响电网的稳定运行, 本文提出了一种不平衡条件下的软件锁相低电压穿越技术。

1 光伏发电 LVRT

1.1 简介

光伏发电领域LVRT是指在光伏并网点电压短时跌落时, 光伏并网发电设备不脱网, 保持向电网输出功率, 必要时能向电网提供无功功率以支持电网恢复, 直到电网恢复正常。电网电压跌落会使并网发电设备出现过电压及过电流等一系列暂态过程, 冲击光伏设备, 严重时会造成设备损坏并影响其控制系统的安全运行。对于电网侧的电压跌落, 大中型光伏电站一般主要采取两方面措施: 一是采用动态无功补偿装置, 为电网提供无功补偿以抑制并网点电压的波动, 目前常用的补偿装置有静态无功补偿装置(SVC)和动态无功补偿装置(SVG)等; 另外一种措施就是, 要求光伏并网逆变器具

收稿日期: 2012-09-20

作者简介: 王南(1977-), 男, 工程师, 主要从事新能源并网发电系统控制技术研究。

备低电压穿越能力。

虽然我国目前暂未制定关于光伏电站低电压穿越的国家标准,但国家电网公司在其接入电网技术规定^[7]中对大中型电站提出了必须具备一定的低电压穿越能力的明确要求。作为国内光伏权威认证机构,北京鉴衡认证中心在其技术规范文件^[8]中也明确指出,用于国内大型光伏电站的光伏并网逆变器必须具备耐受异常电压的能力,以防止在电网电压异常时脱离电网,引起电网运行的不稳定,具体要求如图1所示。图中, U_{L0} 和 U_{L1} 分别为低电压穿越的电压值上、下限值,此范围属于低电压穿越工作区(高于上限,进入正常工作区;低于下限,则进入故障保护区); T_1 为电网电压跌落到 U_{L1} 时需要继续向电网输出功率并保持不脱网的时间, T_2 为电压跌落到 U_{L0} 时需要继续向电网输出功率并保持不脱网的时间。

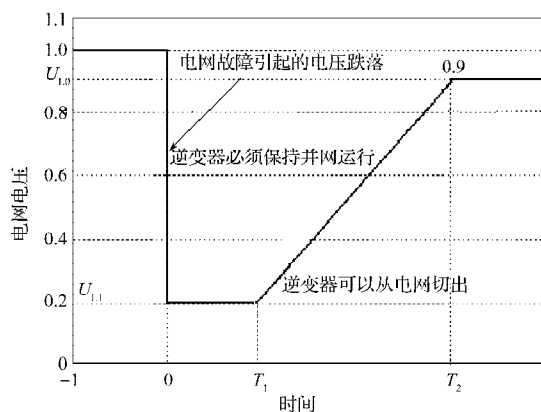


图1 低电压穿越要求

Fig.1 LVRT requirements

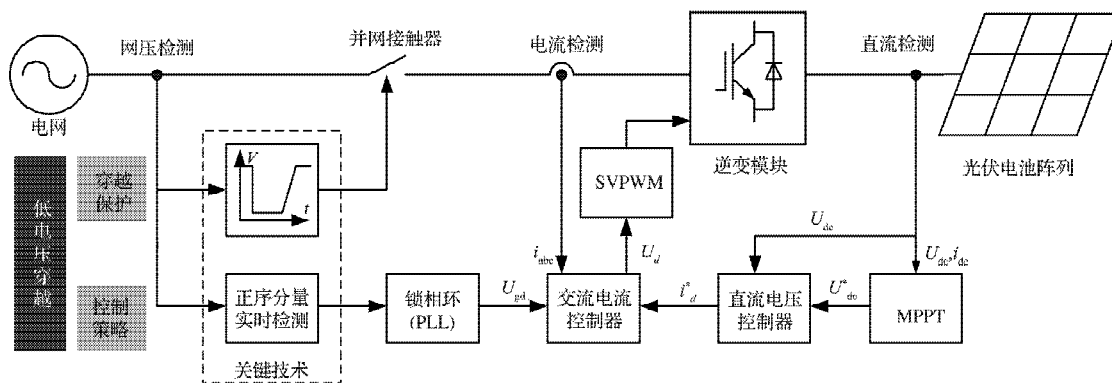


图2 光伏并网逆变器控制框图

Fig.2 Block diagram of the control for PV grid-connected inverter

逆变器通过采样得到直流侧电压 U_{dc} ,利用最大功率点追踪算法(MPPT)算出直流电压参考值 U_{dc}^* ,将 U_{dc} 与 U_{dc}^* 之间的差值作为直流电压控制器的输入,经PI调节得到电流内环的电流参考值 i_d^* ,逆变器输出三相电流进入交流电流控制器后经 dq 变换后得出电流 i_d , i_d^* 与 i_d 之间的误差信号经交流电流控制器的PI调节并加上电网电压前馈信号 U_{gd} 后再经过 dq 反变换得到逆变器输

时间。 U_{L0} 、 U_{L1} 、 T_1 及 T_2 参数的设置需结合电站系统继电保护设备的保护和重合闸实际动作时间,可根据电站具体情况在现场通过人机界面进行修改。通常, U_{L0} 取值为额定电压的90%, U_{L1} 取值为额定电压的20%, T_1 设置为1s, T_2 设置为3s。

现阶段,我国光伏发电行业相关规定和标准还未明确提出对无功电流补偿能力的具体要求,因此光伏逆变器低电压穿越方面目前主要研究的是电网电压跌落时如何保持并网运行的问题。

1.2 原理

电网故障发生时往往会引起电压波形的畸变,突变瞬间会产生过电流,交流侧网压的瞬间跌落还会造成直流侧电压的波动,这都不利于光伏并网逆变器的控制,可能导致锁相的紊乱及输出电流失控等情况。引起电网短路和跌落的原因主要是系统元件故障或线路故障、雷电、大功率设备的启动等,而实际发生的故障大多都是不对称故障。当系统发生不对称短路或者较大幅度的电压跌落时,三相电压将出现较大比重的负序和零序分量。因此,如何在三相电压不平衡情况下迅速准确地完成对电网电压的锁相,以及在电网电压畸变情况下稳定输出电流,是实现低电压穿越功能的关键所在。本文设计的光伏并网逆变器采用双环控制策略(直流电压外环+交流电流内环),其控制系统主要包括PLL、MPPT、直流电压控制器及交流电流控制器等(图2)。

出电压 U_d ,其经过空间矢量调制(SVPWM)后输出至逆变模块。

2 LVRT 控制策略

本文主要从并网电流控制和软件锁相环这两个方面介绍了所设计的光伏逆变器低电压穿越控制策略。

2.1 并网电流控制

电网故障发生时往往会引起电压波形的畸变和电压波动,为消除电网扰动带来的影响,在交流电流环中引入了电网电压前馈(图3)。电压前馈的引入不仅可以消除因电网扰动给并网电流带来的扰动,同时可以减轻反馈控制负担,使PI调节器比例参数可以取得小一些,增强系统稳定性^[7-8]。

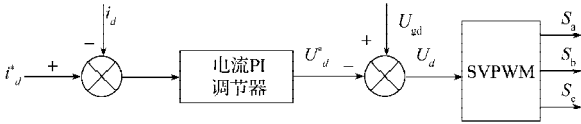


图3 交流电流控制器框图

Fig.3 Block diagram of AC current controller

与风电场不同,光伏电站因为没有叶轮机,不存在转动惯量,在电网故障导致电压跌落的过程中光伏逆变器直流母线电压不会升高很多,最大电压即为光伏电池阵列的开路电压 U_{oc} 。电网电压跌落瞬间,控制器若响应不及时,输出电流会迅速增加,可能造成过流保护甚至损坏器件,因此电压跌落期间的输出电流控制策略是关键。

电压跌落期间,逆变器输出电流以有功分量为主,为保证逆变器不被损坏,主要控制有功输出电流 i_d (通常是额定电流的1.2倍)(图3);若还考虑期间逆变器的无功补偿能力,则需考虑无功电流 i_q 的影响。光伏逆变器并网电流控制策略有两种:一是电压跌落期间电流内环给定值不由电压外环提供,而是直接按预设值进行控制(预设值可小于额定值),从而降低有功功率输出,保证有足够裕度提供无功电流支撑;另一种是以逆变器正常运行时的 i_d 作为限幅值,通过限幅环节限制 i_d^* 的最大值,从而限制 i_d 的增加。本文所设计的光伏逆变器在前者基础上引入了电网电压跌落幅度以及输出功率作为参考,电压跌落幅度不同,预设的限流值也不同,从而保证在电压跌落过程中尽可能多地输出功率并提供网压支撑,协助电网电压的恢复。

2.2 锁相控制

早期的锁相环一般由硬件电路完成,锁相通常采用过零比较方式,电路主要包括鉴相器(PD)、环路滤波器(LPF)及压控振荡器(VCO)三部分。随着数字信号处理器(DSP)的快速发展,目前锁相环主要通过软件实现。软件锁相环因为成本低、动态特性好及抗干扰能力强等优点,已广泛应用于电力电子领域。其主要原理是通过将三相电网电压经坐标变换转到两相同步旋转的 dq 坐标系下,从而将电网电压矢量分解为直流分量 U_d 和 U_q 进行分析处理^[9]。

软件锁相环的基本结构如图4所示。在三相电压平衡工况下,软件锁相环可以很好地完成锁相任务;但因未考虑负序分量的影响,因此三相若不平衡,就无法很好地实现锁相。

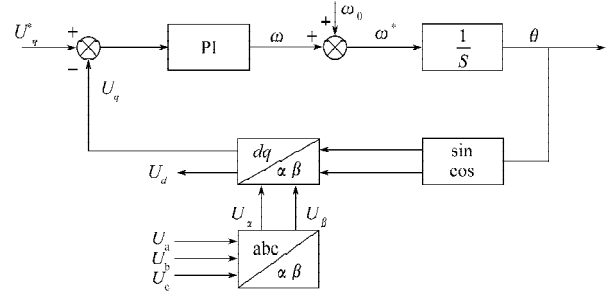


图4 软件锁相环框图

Fig.4 Block diagram of SPLL

由文献[10-11]可知,当系统三相电压不平衡时,负序电压经 dq 变换后表现为2倍频的交流分量。为消除三相不平衡电压带来的影响,一般会在传统锁相环基础上增加一个100 Hz的陷波器^[12]用以滤除2次谐波(图5)。但陷波器本身无法实现无差分离,不仅会增加控制系统的阶数,对控制系统的动态和稳态性能有一定影响,使系统PI参数难以确定,而且使用陷波器的软件锁相环本身响应速度较慢,需要几个周期才能完成锁相,因此在实际应用中仍显不足。

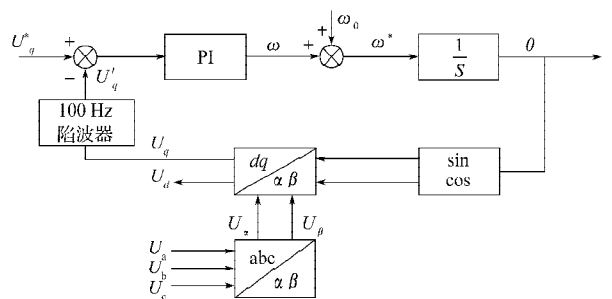


图5 带陷波器的软件锁相环框图

Fig.5 Block diagram of SPLL with notch filter

为此,有人提出了基于瞬时无功理论的正负序分离的方法来实现锁相(图6),其中较典型的方案是针对正序和负序分量的特点通过 $T/4$ 延时计算法^[13-14]得到正负序分量:

$$\begin{cases} U_{\alpha}(t) = U^{+} \cos(\omega t + \theta^{+}) + U^{-} \cos(-\omega t + \theta^{-}) \\ U_{\beta}(t) = U^{+} \sin(\omega t + \theta^{+}) + U^{-} \sin(-\omega t + \theta^{-}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_{\alpha}(t)$ ——当前时刻 α 轴上的幅值; $U_{\beta}(t)$ ——当前时刻 β 轴上的幅值; U^{+} ——正序分量的幅值; U^{-} ——负序分量的幅值; θ^{+} ——正序分量相位; θ^{-} ——负序分量相位。

利用式(1)可得到 $(t-T/4)$ 时刻的正序和负序分量 $U_{\alpha}(t-T/4)$ 及 $U_{\beta}(t-T/4)$:

$$\left. \begin{aligned} U_{\alpha}(t-T/4) &= U^{+} \sin(\omega t + \theta^{+}) - U^{-} \sin(-\omega t + \theta^{-}) \\ U_{\beta}(t-T/4) &= -U^{+} \cos(\omega t + \theta^{+}) + U^{-} \cos(-\omega t + \theta^{-}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将式(2)再代入式(1), 化简后可得正序分量的表达式:

$$\left. \begin{aligned} U_{\alpha}^{+}(t) &= U^{+} \cos(\omega t + \theta^{+}) = \frac{1}{2}(U_{\alpha}(t) - U_{\beta}(t-T/4)) \\ U_{\beta}^{+}(t) &= U^{+} \sin(\omega t + \theta^{+}) = \frac{1}{2}(U_{\alpha}(t-T/4) + U_{\beta}(t)) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

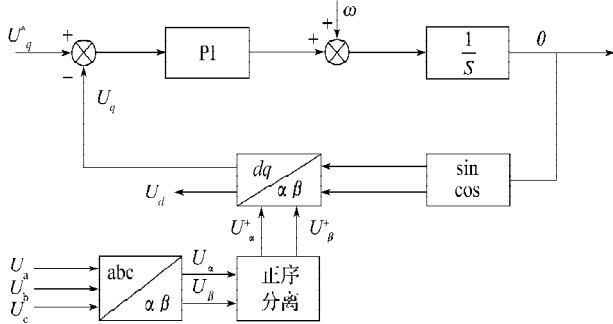


图6 正序分离的软件锁相环框图

Fig.6 Block diagram of positive sequence separated SPLL

由式(3)可知, 采用 $T/4$ 延时算法不仅能够无差地将正负序分量分离, 而且因仅通过算术运算来实现而未增加系统阶数, 所以基本不影响控制系统的稳定性。由文献[15]可知, 采用 $T/4$ 延时算法后, 大大提高了锁相环响应速度, 使锁相任务基本在电网基波的半个周期内完成, 但因要用到 $T/4$ 时刻前的数据, 需设计一个数据缓冲区来保存至少 $T/4$ 个周期的数据, 因此实现起来较复杂。

本文针对 $T/4$ 延时算法的弊端提出了一种新型正序分离算法, 其核心思想是首先将电网三相电压经过Clarke变换后得到静止两相坐标系下的电压 U_{α} 和 U_{β} , 将 U_{α} 和 U_{β} 经一阶低通滤波后得到 U'_{α} 和 U'_{β} , 接着对 U_{α} 、 U_{β} 、 U'_{α} 及 U'_{β} 经过一系列四则运算即可实现正负序分量的分离, 分别得到 U_{α}^{+} 和 U_{β}^{+} (图7)。

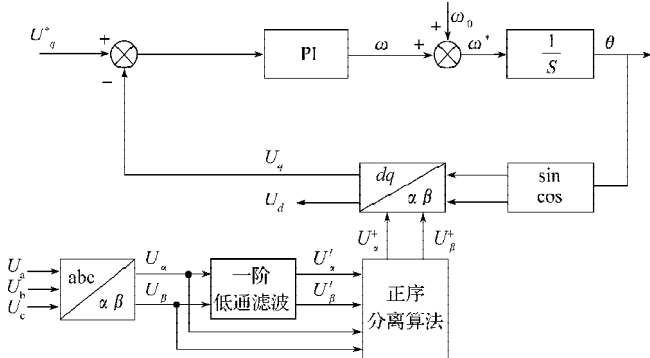


图7 带低通滤波的正序分离软件锁相环框图

Fig.7 Block diagram of positive sequence separated SPLL with low-pass filtering

图7中一阶低通滤波算法公式如下:

$$Y_n = aX_n + (1-a)Y_{n-1} \quad (4)$$

式中: a ——滤波系数, $a=T_s/\tau$ (T_s 为采样周期, τ 为滤波时间常数, $f_c=1/(2\pi \times \tau)$, f_c 为滤波器截止频率); X_n ——本次采样值; Y_{n-1} ——上次滤波输出值; Y_n ——本次滤波输出值。

与 $T/4$ 延时算法相比, 该正序分离算法不仅节省了 $1/4$ 周期的大量数据缓冲, 而且正负序分量的检测时间只由一阶低通滤波器的时间常数 τ 决定(τ 的取值可以根据仿真和实验情况决定), 方便实用。

3 仿真及实验

3.1 仿真

为验证文中所提正序分量分离算法的有效性, 在理论分析的基础上建立了仿真模型(图8)。仿真时, 电网电压由三相可编程电源模块提供, 在 $0.05s$ 时刻三相电网电压幅值出现跳变(跌落约20%), 在 $0.1s$ 时刻三相电压出现不平衡。

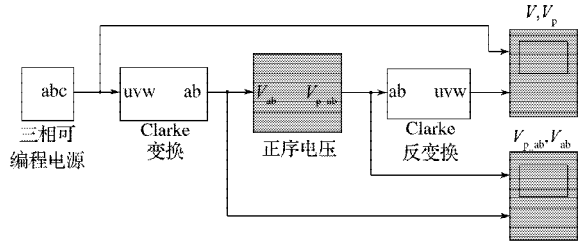


图8 正序分离算法仿真模型

Fig.8 Simulation model of positive sequence separated algorithm

电网电压首先经Clarke变换得到 U_{α} 和 U_{β} , 利用所设计的正序分离算法($\tau=1\text{ms}$)求出正序分量, 最后再经Clarke反变换后输出。仿真结果如图9所示, 图中 u_{abc} 为电网电压, u_{pabc} 为分离后的正序电网电压。

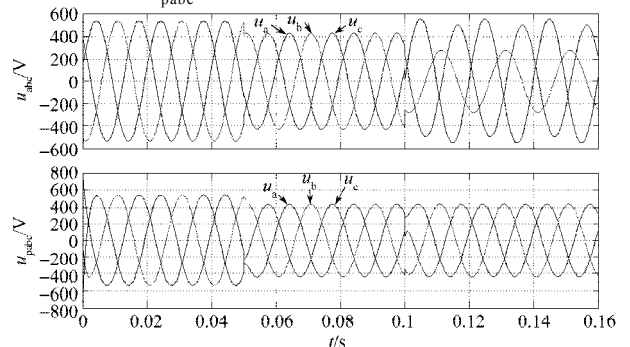


图9 正序分离算法仿真结果

Fig.9 Simulation results of positive sequence separated algorithm

由图9可以看出, $0.05s$ 时刻电网电压 u_{abc} 突然跌落约20%, 正序分离算法得出的网压能迅速跟踪电网变化; $0.1s$ 时刻电网出现三相不平衡, 由正序分离算法计算得出的网压正序分量 u_{pabc} 经短暂过渡后立即得出三相平衡的网压输出, 即在不平衡情况下能迅速完成锁相。

通过理论分析和算法仿真可知,采用本文所述的正序分离算法,可以迅速、有效地完成三相不平衡情况下对正序分量的跟踪,且跟踪速度主要取决于所选取的滤波时间常数,灵活且便捷,同时该算法仅采用三相电压瞬时值通过简单的四则运算便可实现,便于编程实现。

3.2 实验

采用该算法的三相光伏并网逆变器已通过了国网电科院太阳能研发实验中心组织实施的低电压穿越认证测试。图10~图13示出部分测试输出波形。

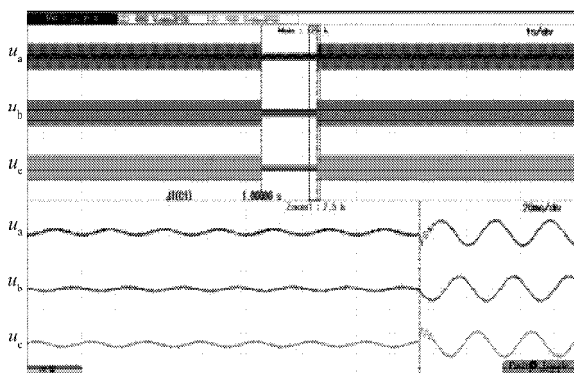


图 10 三相网压跌落至 20% 额定值时输出电压波形

Fig.10 Output voltage waveforms as three-phase grid voltage dropping to 20% rated value

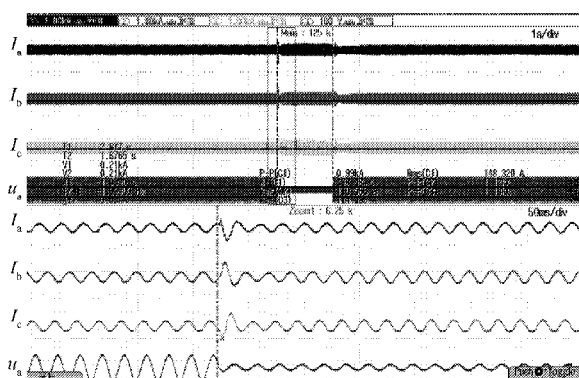


图 11 三相网压跌落至 20% 额定值时输出电流波形

Fig.11 Output current waveforms as three-phase grid voltage dropping to 20% rated value

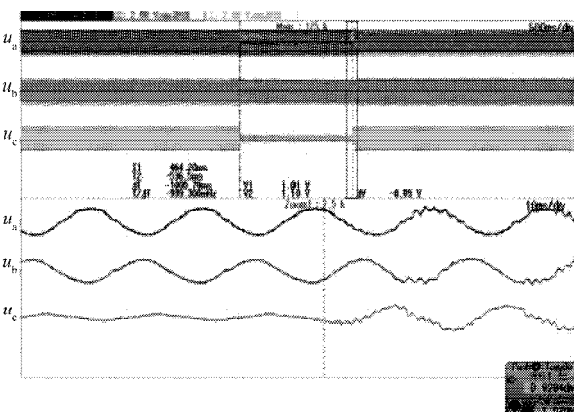


图 12 单相网压跌落至 20% 额定值时输出电压波形

Fig.12 Output voltage waveforms as single-phase voltage dropping to 20% rated value

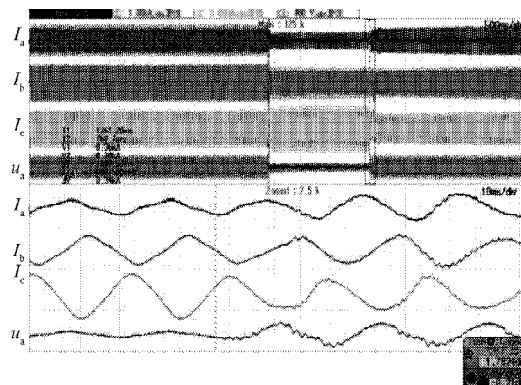


图 13 单相网压跌落至 20% 额定值时输出电流波形

Fig.13 Output current waveforms as single-phase voltage dropping to 20% rated value

由实验数据可知,采用本文所述的低电压穿越技术的光伏并网逆变器在电网电压三相和单相跌落过程中能保持稳定的并网输出,当电网电压恢复后能很快恢复额定输出功率,体现了较好的稳定性;而且在电网电压突变时逆变器输出能迅速锁定电压相位,保持同步输出,体现了较好的动态性能。

4 结语

本文提出一种新的正序分离算法,实现了三相不平衡条件下光伏并网逆变器的快速锁相;同时通过在并网逆变器交流输出电流环中加入电网电压前馈的方法消除电网扰动带来的影响;并且通过采用多种方法对输出电流进行限幅,从而保证电网电压跌落期间输出电流的稳定输出。采用以上几点控制方法的三相光伏并网逆变器运行稳定可靠,低电压穿越方法切实有效,已通过国家电网电科院的相关低电压穿越试验室认证以及青海等省的光伏电站现场的低电压穿越实验。

参考文献:

- [1] 雷一, 赵争鸣. 大容量光伏发电关键技术与并网影响综述[J]. 电力电子, 2010(3): 16-22.
- [2] Morren J, de Haan Sjoer W H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[C]//IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2).
- [3] 王利平, 杨德洲, 张军. 大型光伏发电系统控制原理与并网特性研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6): 61-63.
- [4] 党锁刚, 高富春, 汉鹏武, 等. 太阳能发电技术特性研究[J]. 华电技术, 2010, 32(6): 76-80.
- [5] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规定[S]. Q/GDW 617-2011.
- [6] 北京鉴衡认证中心. 并网光伏发电专用逆变器技术要求和试验方法[S]. CNCA/CTS0004: 2011.
- [7] 林少华, 许洪华. 基于电网电压前馈的光伏并网逆变器的仿真与实现[J]. 可再生能源, 2008, 26(4): 10-12.
- [8] 张彦, 赵义术, 余蜜, 等. 光伏并网逆变器电流控制技术研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(5): 29-31.

(下转第 60 页)

