

一种改进的 LCL 并网逆变器控制方法的研究*

杨旭红, 王闾姝

(上海电力学院 自动化工程学院 上海市电站自动化重点实验室, 上海 200090)

摘要: LCL 型滤波器相对于 L 型滤波器对交流侧电流中的高频谐波有更强的抑制能力, 因此也越来越多地被用于逆变器中。研究了在独立工作模式和并网逆变模式间的切换过程中如何做到无扰动切换。在独立和并网逆变两种模式下分别对空载电压和并网电流直接控制。在对比传统电压电流控制情况下, 对电压电流控制进行改进。通过 MATLAB/Simulink 仿真平台, 建立了 LCL 型滤波的逆变器并网模型, 仿真分析证明了可行性。

关键词: 并网逆变器; LCL 滤波器; 双闭环控制; 有源阻尼法

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)09-0067-04

Research on Improved Control Method of LCL Grid Connected Inverter*

YANG Xuhong, WANG Tianshu

(Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Institute of Automatic Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: LCL type filter has better filter with respect to high-frequency harmonics in the AC current in the inhibition ability, so it is more and more used in the inverter. The switching process in independent mode and grid connected inverter mode between the switch without disturbance was researched. So in the inverter and grid independence under the two modes respectively. On load voltage and grid current direct control. In contrast to the traditional control of voltage and current conditions, the voltage and current control was improved. Through the simulation platform of MATLAB/Simulink, a model of grid connected inverter type LCL filter, simulation analysis proved the feasibility.

Key words: grid-connected inverter; LCL filter; dual loop control; active damping method

0 引言

化石能源是人类现代化文明的基石, 历经两百多年的开发利用, 化石能源已趋于枯竭, 为了应对, 人类在积极寻找新型清洁能源。电力电子变换器是 RE-DPGS 的重要组成部分, 其中并网逆变器用来将直流电能转化为高质量的交流电能并馈入电网^[1-6]。作为可再生能源发电单元与电网之

间的能量变换接口, 并网逆变器具有十分重要的作用。本文研究主要包括 3 个部分: (1) 逆变器输出电压控制技术以及逆变器入网电流的跟踪技术; (2) 逆变器工作过程中的同步锁相技术; (3) 独立和并网运行的无缝切换。由于逆变器工作时会产生大量的谐波, 因此在逆变器和并网之间加入滤波器。LCL 滤波器一般具有三阶的低通滤波特性。因此, 对于同样谐波标准和较低的开关频

* 基金项目: 国家自然科学基金(61203224); 上海市电站自动化技术重点实验室开放课题(13DZ2273800); 上海市科技创新行动技术高新技术领域重点项目(14511101200); 上海市重点科技攻关计划(上海市科委地方院校能力建设项目)(14110500700); 上海自然科学基金(13ZR1417800)

作者简介: 杨旭红(1969—), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智能电网控制技术、新能源发电及储能技术、火电和核电机组的仿真建模及控制技术。

王闾姝(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网逆变器控制技术。

率,可以采用相对较小的滤波电感设计,可以有效减少系统的体积并降低损耗。但是,LCL型滤波器的三阶特性即在谐振频率处增益会无穷大,同时相位发生 180° 跳变,会导致系统发生振荡甚至不稳定^[6]。因此,对LCL滤波器的参数选择和固有谐振的抑制十分重要。

对于谐振的抑制,方法之一是有源阻尼法中的以电容电流为反馈变量陷波器校正法^[7-8]。该方法只需在反馈通道配置一个比例环节,且不受系统参数影响,易实现基于陷波器校正的LCL并网逆变器的有源阻尼控制^[9]。对于并网的控制,有文献提出,对现有的无扰动切换控制策略进行了概述,提出了一种基于多环控制的无扰动切换控制策略,即在两种工作模式下分别对并网电流和电压直接进行控制^[3]。也有其他文献提出,以重复控制为基础,通过检测并网电感两端的电压谐波,调制到指令信号中,从而达到抑制谐波电流的目的^[2]。

但文献[3]在无扰动技术切换中对滤波电容并联了负载,其相当于是LC滤波器而非LCL滤波器,而文献[2]增加了重复控制,即增加了控制结构的复杂性。本文在此基础上提出一种新的电压电流控制,通过理论和仿真分析,验证了该策略的可行性与正确性。

1 逆变器的数学模型

LCL型滤波器的单相逆变器并网的主电路如图1所示。

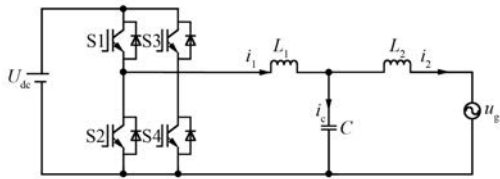


图1 LCL型滤波器单相逆变器并网

图1中, U_{dc} 是直流源电压。 L_1 、 L_2 和 C 分别是逆变侧滤波电感、网侧滤波电感和滤波电容,与之相应的 i_1 、 i_2 和 i_c 分别为逆变侧的电感电流、并网(网侧)电流和电容电流。

本文的控制策略主要是在独立运行时采用电压控制,并网时采用电流控制模式。在切换过程中,可能会出现较大的电压、电流冲击,为减少冲

击,当电压控制下空载电压与电网电压接近时,从电压控制模式切换到电流控制模式。

2 独立模式下的控制方法

当逆变器独立工作时,本文采用电压型控制,其控制目标是使逆变器的输出电压满足电网电压的要求,根据电网电压的幅值和相位、输出滤波器模型以及并网功率指令值,计算得到逆变桥输出电压的幅值和相位来进行控制的^[1]。传统的电压型控制是依据逆变器正弦稳态模型进行控制,其控制结构较为简单,系统的动态性能较差。本文是利用电容电压对输出电压的控制,再加上电容电流反馈,可发现这样控制使输出电压比较稳定,谐波含量少,反应快,系统抗干扰能力更强,更具有优越性。

输入信号是由锁相环模块锁得的相角和输出的并网电压幅值共同合成。图2为改进后LCL独立模式下逆变器的控制结构。

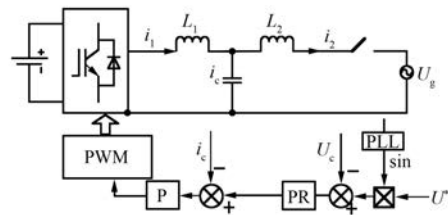


图2 改进后LCL型独立模式下逆变器控制结构图

3 并网模式下的控制方法

逆变器工作在并网模式下,电网电压可视为无穷大容量系统,此时逆变电源的输出频率和电压幅值则由电网电压决定^[4]。图3为传统模式下并网的控制策略,图4为改进之后的策略。

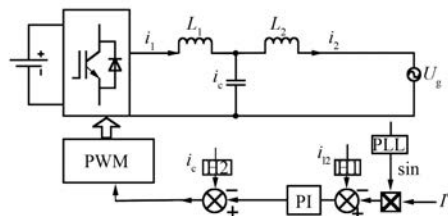


图3 传统LCL型并网模式下逆变器控制结构图

对并网逆变器而言,其首要目标是控制并网电流 i_2 ,使其与电网电压 u_g 同步,并使其幅值跟踪给定值 I^* 。通常 u_g 的相位可通过锁相环测得。

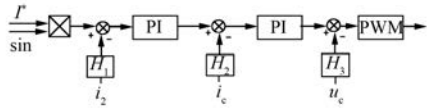


图 4 改进 LCL 型并网模式下逆变器控制结构图

并网电流是由锁相环模块锁得的相角和输出的并网电流幅值共同合成。

通过仿真可知传统的并网电流谐波已经满足一般需求,其控制是通过反馈电容电流 i_c 实现滤波器谐振尖峰的有源阻尼。图 4 中, H_1 、 H_2 分别为 i_2 和 i_c 的采样系数^[1]。但通过仿真发现系统仍存在一定振荡,本文对电流控制进行了一定的改进,增加了反馈电容电压(采样系数为 H_3),经验证其谐波分量更小。

4 独立模式切换到并网模式

并网过程可以归结如下:

- (1) 检测电网电压是否满足并网要求;
- (2) 独立模式下,调节输入信号,使逆变器输出电压幅值、频率、相位与电网电压在合理误差范围内保持基本同步;
- (3) 在(2)的前提条件下,合上网侧开关,以及将控制模式由电压型控制切换为电流型模式。

其控制模型可简化成图 5。

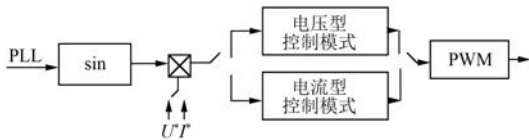


图 5 两种模式下的控制结构图

5 仿真与分析

为了验证理论分析的正确性,进行了相关的仿真分析。在 MATLAB/Simulink 平台上搭建了单相 LCL 逆变器并网控制模型。仿真模型基本参数如表 1 所示。

表 1 模型基本参数

参数名称	值
电网电压有效值 U_g/V	311
直流电压 U_{dc}/V	500
电网频率 f/Hz	50
逆变侧电感 L_1/mH	3
网侧电感 L_2/mH	1
滤波电容 $C/\mu F$	10

在独立运行模式下,采用 PR 控制器,可以提高基波增益,从而有效减小输出电压的稳态误差。

在并网模式下,采用 PI 调节器,可以有效消除并网电流中由电网电压产生的扰动分量。

本文在独立模式下和并网模式下,分别采用电压控制和电流控制,仿真图如图 6~图 10 所示。通过图 6 可看出加入电容电流反馈可使输出电压更容易控制,且畸变较小。图 7 是将输出电压与电网电压相比,通过对比可发现在 0.14 s 时,输出电压与电网电压基本同步,通过开关控制,逆变器实现并网。图 8 与图 10 是在并网条件下的网侧电流图,图 9 与图 11 通过 THD 分析,显然改进后的网侧电流畸变更小。

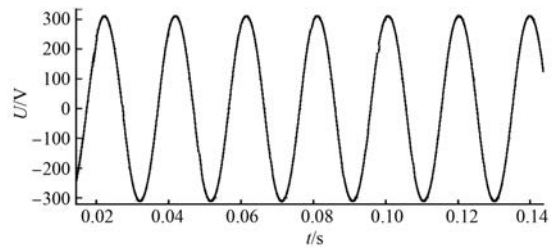


图 6 独立模式下逆变器输出电压波形图

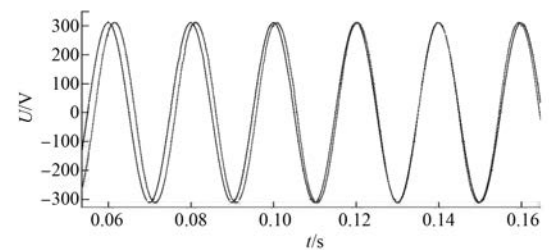


图 7 独立模式下输出电压波形与电网电压波形图

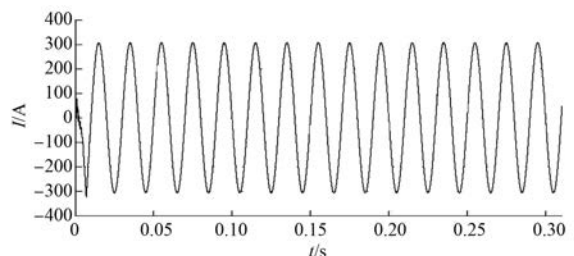


图 8 传统模式下并网电流波形图

6 结语

LCL 型滤波器的逆变器并网控制策略已经很成熟,本文提出了一种改进的电压电流控制方案。

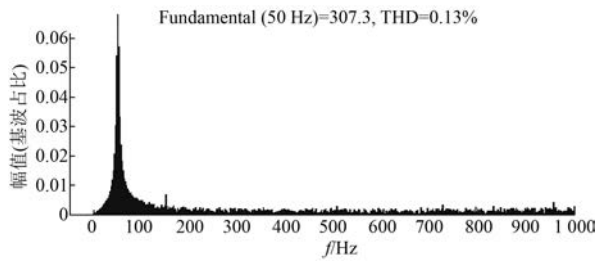


图9 传统并网电流 THD 分析图

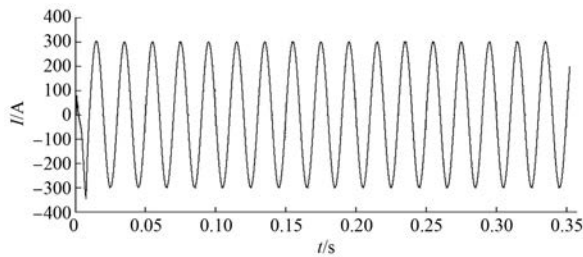


图10 改进并网电流波形图

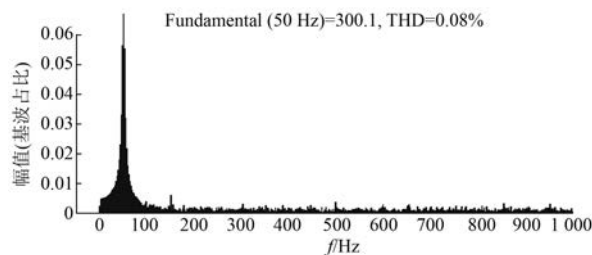


图11 改进并网电流 THD 分析图

在传统独立模式中,在电压控制下,加入了电容电流反馈,从而达到抑制谐波电压,提高输出电压质量的目的。在传统并网模式中,在电流控制下,在

原有基础上加入了电容电压反馈,对 THD 进行比较,可发现改进模式下 THD 更小。本文通过理论分析和仿真分析验证了上述结论,表明该策略的可行性和正确性。

【参考文献】

[1] 阮新波,王学华,潘冬华,等.LCL 型并网逆变器的控制技术[M].北京:科学出版社,2015.

[2] 吴浩伟,段善旭,徐正喜.一种新颖的电压控制型逆变器并网控制方案[J].中国电机工程学报,2008, 28(33): 19-24.

[3] 丁杰.电网不平衡条件下 LCL-VSR 控制策略研究 [D].合肥:合肥工业大学,2011.4.

[4] 陈潼,赵荣祥.并网逆变器间接电流解耦控制策略的研究[J].电力电子技术,2006,40(3): 8-10.

[5] 刘飞,查晓明,段善旭.三相并网逆变器 LCL 滤波器的参数设计与研究[J].电工技术学报,2010,25 (3): 110-116.

[6] 潘冬华,阮新波,王学华,等.增强 LCL 型并网逆变器对电网阻抗鲁棒性的控制参数设计[J].中国电机工程学报,2015,35(10): 2558-2566.

[7] 黄挚雄,徐保友,沈玲菲,等.LCL 并网逆变器新型电流双闭环控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2012(17): 1-5.

[8] 韩刚,蔡旭.LCL 并网变流器反馈阻尼控制方法的研究[J].电力系统保护与控制,2014(17): 72-78.

[9] 鲍陈磊,阮新波,王学华,等.基于 PI 调节器和电容电流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计[J].中国电机工程学报,2012,32(25): 133-142.

收稿日期: 2016 -11 -21

[主要栏目]

- 综述
- 研究与设计
- 变频与调速
- 控制与应用技术
- 应用
- 运行与保护
- 新产品介绍
- 新能源与风力发电
- 电机系统节能
- 测试技术与检测设备
- 行业信息

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

反映行业最新动态