

基于三相并网逆变器锁相技术的研究

Study on phase-locked technology of the three-phase grid-connected inverter

张小平¹, 曹太强², 周玉荣¹ZHANG Xiao-ping¹, CAO Tai-qiang², ZHOU Yu-rong¹

(1. 攀枝花学院 电气信息工程学院, 攀枝花 617000; 2. 西南交通大学 电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 针对传统三相逆变器与并网三相逆变器的不同特点, 并网前三相逆变器的输出电压与电网的电压同频和同相, 并网后控制其输出的电流与电网电压同相并控制其大小, 确保单位功率因素。为此, 本文用锁相环技术对电网电压的频率跟踪锁定控制, 使三相逆变器的调制波频率始终与电网的频率一致。通过对并网三相逆变器的理论和仿真分析, 该方法使并网逆变器输出的三相电压对称, 满足并网的要求。同时提出了通过对逆变器输出的电流与参考电流的误差进行PI控制, 控制其输出的电流的大小并确保其稳定、可靠的向电网输送功率。最后用3kVA的三相逆变器验证了该方法的可行性。

关键词: 三相逆变器; 并网; 锁相; LCL 滤波器**中图分类号:** TM464**文献标识码:** A**文章编号:** 1009-0134(2010)02-0161-04

0 引言

在并网发电(光伏并网、风力并网和燃料电池并网等)系统中, 逆变器的拓扑电路结构及其控制方法与传统的逆变器有相似和不同之处。并网发电输出的电压的频率要与电网的频率绝对保持一致, 与传统逆变器输出电压的频率控制方法不一样, 传统逆变器主要改变其输出电压的频率, 其频率根据负载的需要从几赫兹到上千赫兹的变化, 而并网逆变器的频率只能跟随电网频率50赫兹左右变化。并网逆变器已成为影响并网发电系统经济可靠运行的关键因素, 研究其结构与控制方法对于提高系统并网发电效率, 快速而准确的并网和降低成本和减少并网故障具有极其重要的意义^[1]。为此, 本文将针对电网频率变化的原因, 并网逆变器对电网频率的跟踪方法以及三相逆变器输出电压和电流的控制方法进行分析和研究, 最后通过实验验证该方法的正确性。

1 并网逆变器频率跟踪控制

1.1 并网逆变器频率跟踪的原因

为了分析并网逆变器频率的跟踪, 我们先分析电力网频率扰动的原因。电力网系统的电能大部分

是由水力发电或火力发电的同步电机提供的, 而发电机组的一次调频功能对维持电网频率的稳定至关重要。一次调频是指当电网频率偏离额定值时, 发电机组调节控制系统自动控制机组有功功率的增加(频率下降时)或减少(频率升高时), 以使电网频率迅速回到额定值范围, 在电力系统运行中, 系统频率不可能一直维持在额定频率, 每秒都在变化。由于电网的频率一般在 $50\text{Hz} \pm 0.5$ 左右变化, 如图1所示, 发电机组以额定频率 f_a 运行时, 其输出功率为 P_{Ga} ; 当系统负荷增加而使频率下降到 f_b 时, 发电机组由于调速系统的作用, 使输出功率增加到 P_{Gb} 。如果原动机的调节汽门(或导水翼)的开度已达到最大位置(相当于图中的c点), 则即使频率再下降, 发电机组的输出功率也不会增加。由于市电网的负载随时在发生变化, 从图1中可以看出, 市电网的频率是在一定范围内波动。因此, 在并网发电系统中的电能要输送电力网, 其频率时刻要与电力网的频率保持同步^[2]。

1.2 并网逆变器频率跟踪方法

从图1中可以看出, 市电网频率随时都在改变。逆变器与市电并联运行前要锁定市电力网频率, 并网后控制三相逆变器的电流。市电力系统可视为容

收稿日期: 2009-11-18

作者简介: 张小平(1956-), 男, 副教授, 研究方向为电机理论及电力系统控制。

量无穷大的交流电压源，如果并网逆变器的输出采用电压控制，则实际上就是一个电压源与电压源并联运行的系统，为了确保并网逆变器输出的交流电压的频率与电网的频率保持一致，我们采用如图2方法进行锁相控制，然后通过调整逆变器输出电压的大小及相移以控制系统的并网逆变器的有功输出和无功输出。

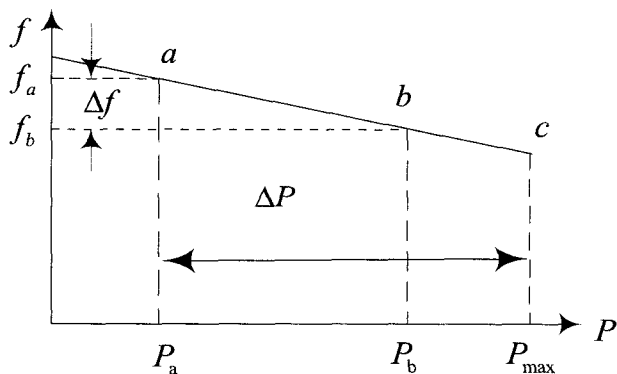


图1 发电机组的功率-频率特性

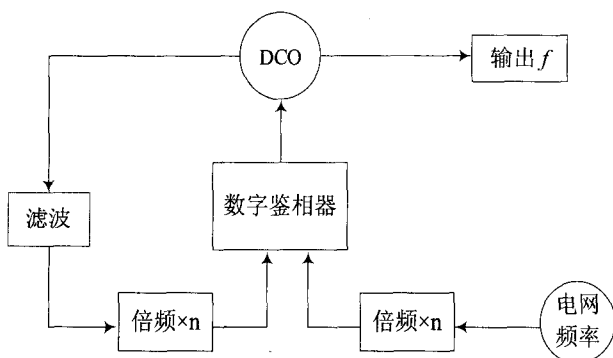


图2 光伏发电数字锁相环框图

锁相环是一个能够自动追踪输入信号频率和相位的闭环控制系统，在并网系统中用锁相环控制能够使光伏发电系统输出的交流电的频率与电

网的频率保持一致，如图2所示，通过对电网频率采样后，再倍频并与压控振荡器的频率进行比较，由数字鉴相器鉴频鉴相得误差电压，经过数字压控振荡器 DCO 后得高精度的电网频率 f 并跟踪锁定电网频率。

市电网的频率锁定后，该频率 f 作为逆变器调制波的频率，如图3所示，调制波与三角波比较后得到开关管的触发脉冲，通过控制系统使开关管按一定的顺序导通，这样经过逆变器出来的脉冲序列波经过 LC 滤波后的交流电压与市电网的频率和相位相等^[3]。

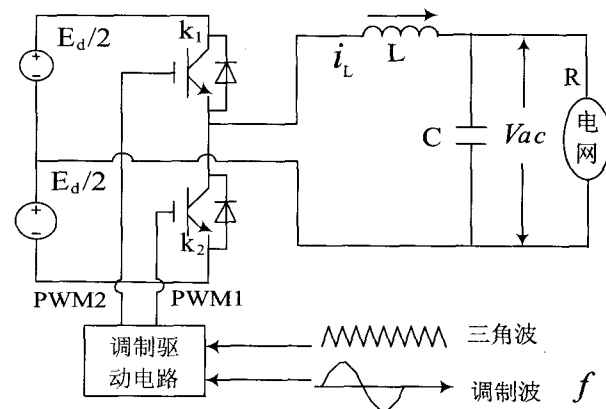


图3 单相并网逆变交流电压频率控制电路图

2 并网逆变器控制原理

在并网发电系统中，由于电网电压是恒定的，所以可控量只有并网电流。锁相技术应用于并网逆变器中对电网的频率和相位的跟踪，响应速度快，稳定性好。如图4所示，由PLL检测得到同步信号与并网电流幅度给定一起送给正弦波发生器，生成与电网电压同频和同相的参考电流信号 i_{ref} ，再与并网电抗器的电流比较，比较后的误差经过PI调节再与三角波相乘得到开关管的触发信号^[4]。

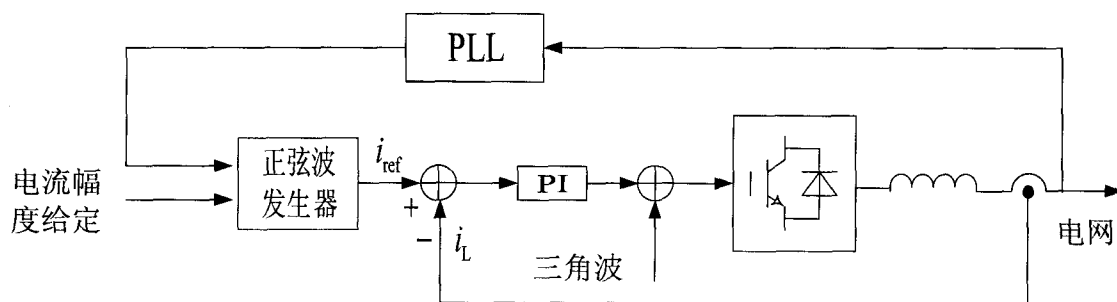


图4 并网系统控制原理图

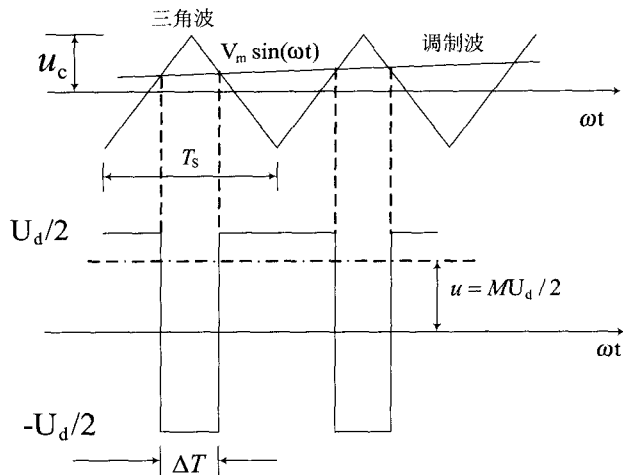


图5 SPWM 生成原理

3 并网逆变器 SPWM 的形成

SPWM(正弦脉宽调制)控制技术分为双极性调制和单极性调制方式。三相逆变电路通常选用双极性调制方式。首先我们对单相逆变器的主电路拓扑结构分析,如图5所示。

E_d 是直流母线电压, L 是输出滤波器电感, C 是输出滤波器电容, K_1 和 K_2 的触发PWM由SPWM生成,其原理如图5所示。

在图5中, T_s 为采样周期、 ΔT 为脉宽时间、 u_c 为三角载波幅值、 $V_m \sin \omega t$ 为调制波,其幅值为 V_m 。当SPWM是线性调制时,输出脉宽与参考正弦波幅

值成正比。

由三角形相似有:

$$\frac{\Delta T/2}{T_s/2} = \frac{V_c - V_m \sin \omega t}{2V_c} \quad (1)$$

令

$$M = \frac{V_m}{V_c} \quad (2)$$

根据平均等效原理有:

$$U \times T_s = \frac{E_d}{2} \times (T_s - \Delta T) - \frac{E_d}{2} \times \Delta T \quad (3)$$

把(1)和(2)带入(3)有:

$$U = \frac{E_d}{2} M \sin \omega t \quad (4)$$

以上我们分析的是单相逆变器,由于并网逆变器是三相,三相逆变器的控制方式与单相逆变器一样,我们用PSIM对三相逆变器并网锁相跟踪进行仿真分析,其仿真波形如图6所示,输入幅值调制比 M 设为0.8。输出负载上的三相线电压 U_{ca} 、 U_{bc} 、 U_{ab} 。从波形图中可以看出其三相波形对称,幅度相等,达到并网的要求^[4]。

4 实验

为了验证以上控制方法,我们设计了一个3kVA的单相样机,选用IPM(型号:PS21869-p)作

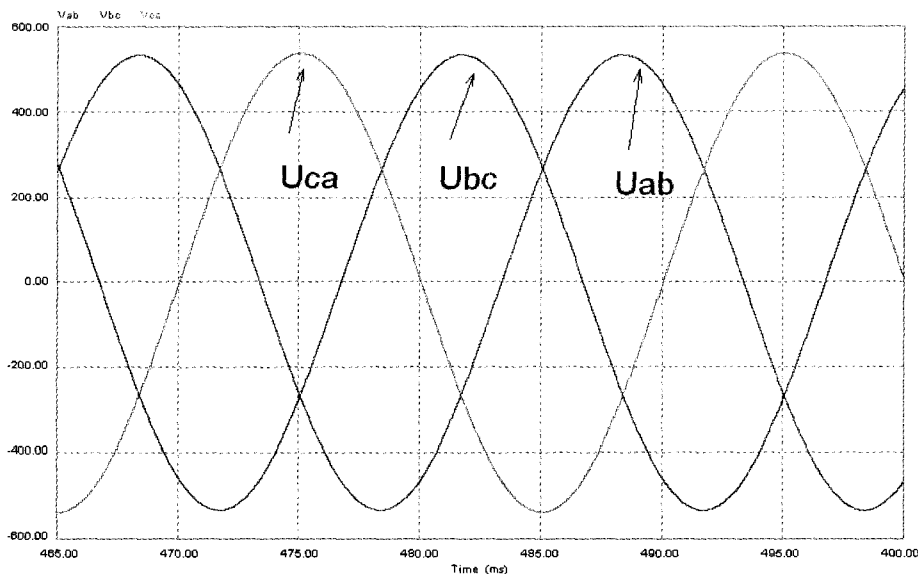


图6 三相并网逆变器仿真波形

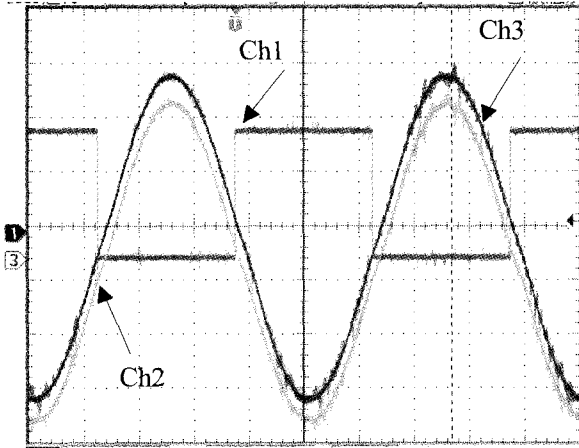


图7 锁相并网测试波形

为三相逆变器的开关管、DSP(型号: TMS320F2812PGFA)、电感(1.1mH ± 5%)、电容(12μF)、变压器3KVA、负载为10Ω ± 5%, 1500W。如图7为并网逆变器锁相控制测试波形, CH1为电网频率锁定信号, 该信号作为逆变器正弦调制波的频率。CH3为电网电压波形, CH4为逆变器输出的交流电压波形, 从图中可以看出, 并网逆变器的输出电压能跟踪电网电压的频率、幅度和相位。逆变器并网不仅要跟踪电网电压的同频、同相和同幅度的电压波形, 其本质是向电网输送电流, 并网逆变器输出的电流理论上应与电网的电压同相, 达到功率因

数为1。除了对电压和电流要满足电网电压和电流的指标外, 按照国际的标准要向电网输送谐波成分低于5%的正弦波。图8是谐波测试波形, 其谐波含量不超过2%, 达到电能质量的标准^[5]。

5 结论

本文分析了并网逆变器用锁相技术跟踪电网电压的频率, 并用PI调节控制并网逆变器的输出电流与电网电流同频同相, 达到高功率因数, 仿真和实验验证了该方法的可行性。同时, 该控制方法物理意义清晰, 结构简单, 易于控制。

参考文献:

- [1] Kjaer S-B, Pedersen J-K, Blaabjerg-F. A review of Single-Phase Grid-Connected inverters for photovoltaic modules[J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 2005, 41(5):1292-1306.
- [2] 邬基烈. 电机学[M]. 水利电力出版社, 1994.
- [3] 曹太强, 许建平, 吴昊. 基于DSP数字调速直流电机系统设计[J]. 电力电子技术, 2008, 2(24):73-77.
- [4] 曹太强, 许建平, 徐顺刚. 一种新型单相光伏发电系统并网技术的实现[J]. 电力电子技术, 2008, 8(42):33-34.
- [5] 孔雪娟, 王荆江. 基于内模原理的三相电压型逆变电源的波形控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7):67-70.
- [6] 姚志垒, 工赞, 肖岚. 一种新的逆变器并网控制策略的研究[J]. 国电机工程学报, 2006, 26(18):61-64.

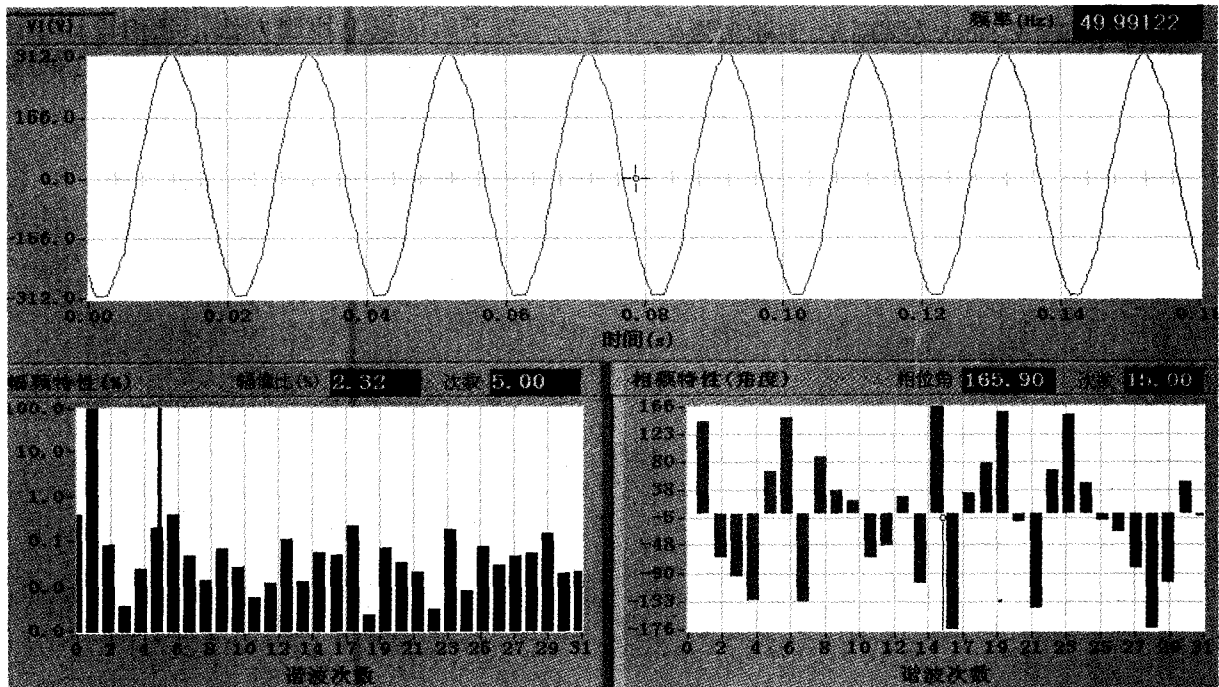


图8 A相输出电压波形及其各次谐波波形