

基于 TMS320LF2407A 的软件锁相环的设计与实现

安小丹, 梁晖

(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要:按照锁相环的原理,研究了一种利用 DSP TMS320LF2407A 实现的软件锁相环用于风力发电并网逆变器,以产生与电网同频、同相的交流电,使并网逆变器的功率因数接近于 1,减少对电网的污染。就本种软件锁相环实现方案的提出给予了具体的阐述,结合程序流程图对此方案的实现展开了说明,并在实验室条件下展开了实验。实验结果验证了该方案具有一定的可行性和有效性。

关键词:风力发电;并网逆变器;软件锁相环

中图分类号:TM614

文献标识码:A

Design and Realization of Software Phase Locked Loop Based on TMS320LF2407A

AN Xiao-dan, LIANG Hui

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: According to the theory of PLL, a new method of software phase locked loop used for grid-connected inverter of wind power generation was designed to produce current whose frequency and phase are the same as the grid. And meanwhile the PLL can make the power factor close to 1 which can decrease the pollution to the grid. It elaborated how does this idea brought out and described how to realize it compared with necessary process flow charts and proper experiments. And finally the experimental results prove that this method is feasible and effectual.

Key words: wind power generation; grid-connected inverter; software phase locked loop (SPLL)

1 引言

大规模集成电路及微处理器的广泛应用,使得一些复杂的、灵敏的信号处理方法能在数字领域付诸实施。人们在发展模拟锁相环(APLL)的同时,也致力于发展数字锁相环(DPLL),逐步发展为将相位鉴定器、预定标器、可编程计数器、压控振荡器集于一个单片 IC 以组成新一代的混合锁相环(HPLL)模块。但 APLL, DPLL, HPLL 都是以硬件方式实现锁相功能的,有着较为复杂的硬件电路,还遇到一些硬件难以克服的难题,如直流零点漂移、器件饱和、必须初始校准等。基于以上原因,软件锁相技术(SPLL)越来越受到重视。SPLL 与硬件实现的锁相环相比,更容易与整体控制方法结合,有更高的精度和收敛速度,随着微处理器速度的不断提高, SPLL 的实现成为可能。本文采用电机控制专用数字信号处理器

TMS320LF2407A, 依靠其强大的运算功能,可以实现风力发电并网用 SPLL。

本文是在风力发电的背景下进行研究的,其变流系统主电路图如图 1 所示。对于变流控制系统

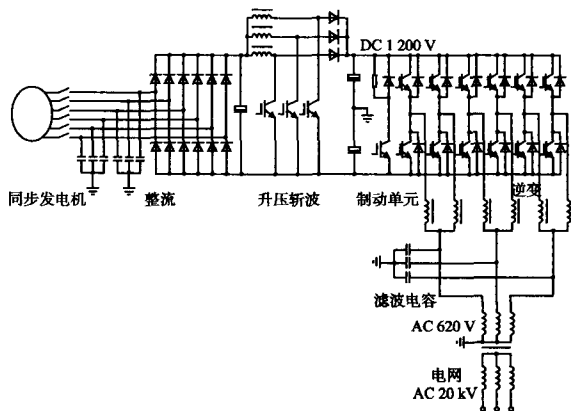


图 1 风力发电变流系统主电路图

Fig. 1 Configuration of direct-drive wind power generating system

统的主电路由以下几部分组成:6 相整流电路,三重升压斩波电路,制动单元,两重并网逆变电路,滤波电路。

2 软件锁相环设计思想

对于整个变流控制系统,锁相环的输入是逆变器输出电能频率、逆变器输出电流与参考“电网电压”的相位差,输出是变流器参考正弦阶梯波。结构框图如图 2 所示。

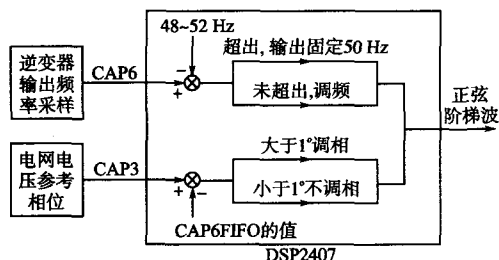


图 2 结构框图

Fig. 2 Configuration diagram

图 2 中,捕获单元 CAP6 和 CAP3 对应的定时器 1 和定时器 3 是同步启动的,这样捕捉各自上升沿的时刻差即为采样和参考值的相差。

本文采用了调频、调相分开进行的方法,软件生成变流器参考正弦波的关键在于每一调制周期角度增量的确定,在一定 PWM 调制周期下,对应某一参考正弦波给定周期,在每一调制周期的正弦角度增量相等,设其为 $d\text{Arg}$,则有

$$d\text{Arg} = \frac{T_{\text{PWM}}}{T_{\text{ref}}} \times 2\pi \quad (1)$$

式中: T_{PWM} 为逆变器调制周期; T_{ref} 为参考正弦波周期。

软件生成的参考波形是一个等角度变化的阶梯状正弦波,在每一次执行 PWM 中断服务程序时,对参考正弦值 V_{ref} 的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{Arg}(k+1) &= \text{Arg}(k) + d\text{Arg}(k) \\ V_{\text{ref}}(k) &= A \times \sin[\text{Arg}(k)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: A 为参考正弦波幅值; $d\text{Arg}(k)$ 在一个参考正弦波周期内不发生变化。

本文的锁相环思想为:当检测到输入频率高于(低于)正常规定范围时,按照一定步长逐渐增大(减小)PWM 周期计时器值,直到输出频率在允许范围内。调节相位同理,当发现相位超前则调整查表顺序,使输出滞后一定相位,反之使输出超前一定相位,这种方法可以计算出最大的锁相

时间,所以就可以根据所要求的参数来确定最小相位调节幅度。并且最终锁相的稳态误差就是一个相位的基本调节单位。这种实现方法简单、直观,实现方便,稳态误差较小且可以控制。

图 3 给出了 SPLL 程序流程图。从图 3 中可以看到,第 1 步首先判断频率是否超限,如果超限则输出稳定的 50 Hz 正弦波;第 2 步根据所得到的误差大小,采取相应的措施调整下一个 PWM 周期计数器值($T_{1\text{PR}}$);当频率满足要求以后,第 3 步就可以进行调相,在本文软件设计中,基准是一个正弦表格,因此调相只需要改变读表指针即可(本文中 M_a 为基准指针变量)。如果发现捕获到逆变器的输出电流波形超前于市电,那么只需要把 M_a 值减小一定值就相当于把基准往后移相了。目前采用的正弦表是 360 个点代表 360° ,每次中断移动一次,本程序是每次移动 1° ,由于正弦表的数据多少限制正弦表的精度,因此周期值的偏差在小于 1° 以内是不调节的,同样输出电流波形落后于市电,那么只需要把 M_a 值增大一定值就相当于把基准往前移相了,这样最终就可以实现锁相。

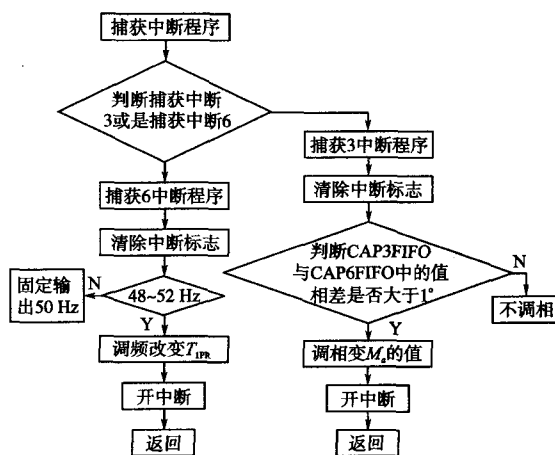


图 3 SPLL 程序流程图

Fig. 3 Flow chart of SPLL

对于频率调节,电网电压的频率变化范围一般在 48~52 Hz 之间,事先可以设定并网电流的频率为 50 Hz。SPWM 载波频率为 20 kHz,改变该载波频率将导致并网输出电流频率的改变,所以不断调整 SPWM 载波频率(即调整 SPWM 波载波周期寄存器 $T_{1\text{PR}}$ 的值)可以实现输出电流频率和电网电压频率一致。

3 软件实现依赖的两个中断

本软件是依赖两个中断完成的:一个是 SP-

WM 载波周期定时器中断;另一个是捕获中断。前者不断地从一个正弦数据表格中依次循环读出表格数据,每次中断读出一个表格数据 D_1 ,而在后者的每次捕获中断中检查当前由 SPWM 载波周期定时器中断读出的表格数据所对应的电角度,本文按如下条件设定:

1) 第一次捕获中断产生时,启动 SPWM 载波周期定时器中断,并且从正弦表格的第 1 个数据,即零电角度的数据 D_{ATA} 开始读取;

2) 捕获中断仅响应上升沿触发,即只在电网电压由负变正的过零点产生中断。在第 2 次捕获中断产生时,可能出现以下 3 种情况,如图 4 所示。

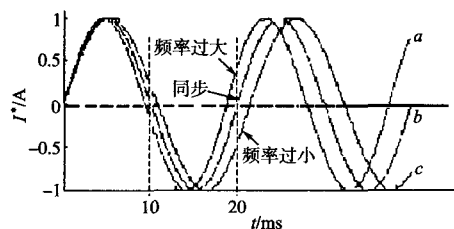


图 4 不同频率输出信号示意图

Fig. 4 Output signals in different frequencies

设定电网电压的周期为 T , SPWM 载波周期为 T_{1PR} ,则有可能出现:

1) T_{1PR} 符合同步要求,对应于图 4 中的曲线 b ,此时 T_{1PR} 不变;

2) T_{1PR} 过小,对应于图 4 中的曲线 a ,即频率过高,此时需加大 T_{1PR} ;

3) T_{1PR} 过大,对应于图 4 中的曲线 c ,即频率过低,此时需减小 T_{1PR} 。

调频子程序的动作流程如图 5 所示。图 5 中, D_1 为本次捕获中断中 SPWM 载波定时器 T_1

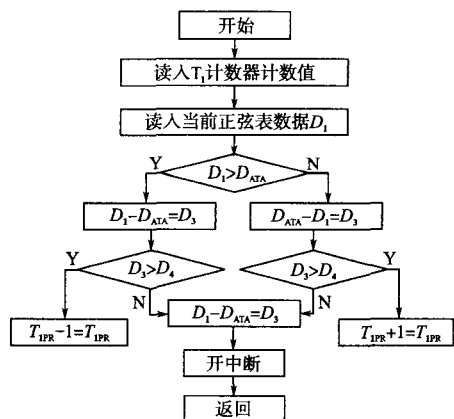


图 5 调频子程序流程图

Fig. 5 Flow chart of frequency modulation

的周期定时中断所读出的正弦表格数据。 D_{ATA} 为正弦表格中的第 1 个数据,对应的电角度为 0° 。 D_3 为本次捕获中断中 D_{ATA} 与 D_1 的差值。 D_4 为上次捕获中断中 D_{ATA} 与 D_1 的差值。 T_{1PR} 为 SPWM 载波定时器的周期值。

4 实验与结论

在实际实验中,采用信号发生器模拟电网电压;对于逆变器的输出为阶梯正弦波脉冲,为了实现对此输出频率、相位的捕获采样,应该加适当的调理电路将其滤波成正弦,再转换成方波,方便于检测上升沿;同时,由于此调理电路的引入引起了一定的时延相位误差,为了保证同等的误差引入而相对消除,实验中对信号发生器输出的标准参考值也经过一个同等参数的 RC 滤波而后使用。

如图 6 所示,虚线左侧为正弦阶梯脉冲经调理电路和 RC 滤波电路,在 A 点得到正弦波;虚线右侧将所得正弦经过过零比较器得到方波,而后经调理和电平转换将信号转换成 2407 的管脚可以接受不超过 3.3 V 的电平送给捕获口 CAP3。

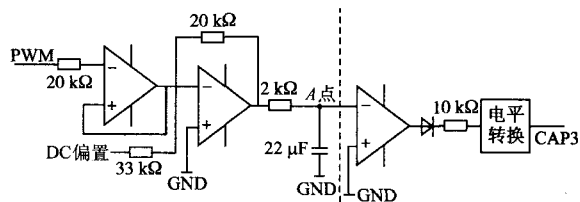


图 6 PWM 滤波和过零检测电路

Fig. 6 Circuit for filter and zero-cross detecting

实验过程中,为了说明本方案好的调节、跟随性,函数信号发生器的输出是变化的,包括 48 ~ 52 Hz 之内的“正常”调节和超范围的非正常调节。本文中,给出实验所得的有代表性的波形,并给予适当的说明和分析。

图 7 是在标准市电频率 50 Hz 下的输入输出

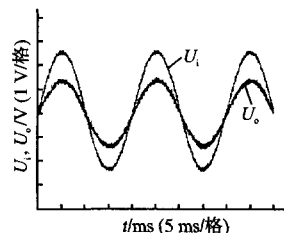


图 7 频率为 50 Hz 时的输入输出跟随波形

Fig. 7 Waveforms of input voltage and output tracking voltage in grid frequency

跟随波形。图 7 中,当前频率为 50.339 2 Hz(周期为市电 20 ms);幅值较大的为输入信号,幅值较小的为输出信号。

图 8 是与图 7 对应的 PWM 脉冲波形,并且在正弦信号的过零点处应该满足脉冲的占空比 50%。此时的正弦输入是未经滤波的,是真正的实验输入,其中载波频率符合软件的设定 18 kHz。

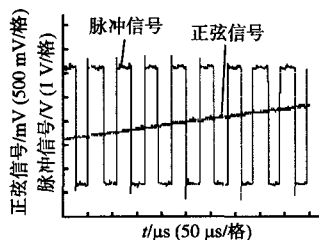


图 8 频率为 50 Hz 时 PWM 脉冲波形

Fig. 8 Waveforms of PWM pulses at 50 Hz

图 9、图 10 是在不同频率下的输入与输出的跟随波形,说明此锁相环在一定的频率范围内能够较好的锁相、跟踪。其中,幅值较大的是输入信号,幅值较小的是输出反馈信号。

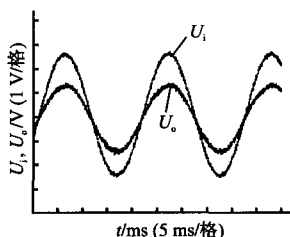


图 9 频率为 48.4 Hz 时输入与输出的跟随波形

Fig. 9 Waveforms of input voltage and output tracking voltage at 48.4 Hz

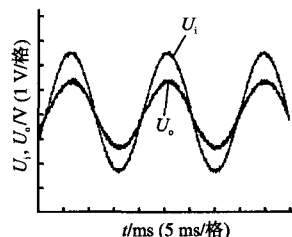


图 10 频率为 52 Hz 时输入与输出的跟随波形

Fig. 10 Waveforms of input voltage and output tracking voltage at 52 Hz

以上是本实验的实验结果波形分析。从波形上可看出 DSP 能成功产生满足要求的 DSP 内部正弦信号,使得输出与输入在一定的频率范围内在相位和频率上有较好的锁相。

参考文献

- [1] 王福昌,鲁昆生. 锁相技术[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1997.
- [2] 刘和平,严利平,张学锋,等. TMS320LF240x DSP 结构、原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [3] 韩安太,刘峙飞,黄海. DSP 控制器原理及其在运动控制系统中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [4] 皮大能,马学军,南光群. 基于 DSP 的高精度锁相技术[J]. 电力电子技术,2005,39(10):109-111.
- [5] 王照峰,王仕成,苏得伦. 锁相环电路的基本概念及应用研究[J]. 电气应用,2005,24(8):46-48.
- [6] 李金刚,陈建洪,钟彦儒. 基于 DSP 感应加热电源频率跟踪控制的实现[J]. 电力电子技术,2003,37(4):31-33.

收稿日期:2008-02-27

修改稿日期:2008-08-11

中国工程院化工、冶金与材料工程学部第七届学术会议

中国工程院化工、冶金与材料工程学部研究决定第七届学术会议将于 2009 年 9 月 15 日-18 日在天津滨海新区召开。会议主题为“现代化工、冶金与材料技术前沿”。

此次学术会议活动的论文征集工作已经开始,欢迎化工、冶金与材料及相关领域的院士、专家、学者积极参加此次学术会议,并踊跃投稿。所收论文将由组委会送交会议学术委员会审阅,并报请学部常委会批准,论文被录用后将收入《中国工程院化工、冶金与材料工程学部第七届学术会议论文集》,由化学工业出版社正式出版。

论文截稿日期为 2009 年 4 月 30 日,请于截稿前将稿件的电子版发送至组委会信箱:luntan@linkinfo.com.cn 或登陆 <http://www.hgyjcl2009.com.cn> 在网上提交,同时请仔细阅读网上的论文基本要求!

此次会议将为企业搭建展示企业形象、技术、产品的平台,会前将就企业的技术难题进行搜集、整理、汇总并印刷成册,发放给与会院士,让院士和企业可以在会议期间进行交流、座谈、开展深入合作。您可登陆 <http://www.hgyjcl2009.com.cn> 下载企业需求表,并将该表的电子版发送至组委会信箱:luntan@linkinfo.com.cn 或在网上直接提交企业需求表。

联系人:靳强(13752351868) 马静(13512088482) 电话:022-23519125;022-23330582

传真:022-23330582 电子信箱:luntan@linkinfo.com.cn 网址:www.hgyjcl2009.com.cn

天津市科学技术信息研究所 天津市科技期刊编辑学会 供稿