

Application Note

使用 PLECS® 仿真实现具有数字控制功能的单相离网逆变器



Yishan Chen

摘要

仿真是研究系统（包括转换器和控制算法）的可行性和性能的有效方法。在仿真工具中使用代码来实现数字控制可能更灵活，与使用 C2000™ 控制类似。本应用手册介绍如何在仿真工具中实现具有全数字控制功能的单相离网逆变器，并提供了 PMP23338 TI 参考设计中离网控制的验证方法。控制算法中使用了具有 PI 补偿器的电压和电流环路。真 RMS 计算块在电压环路中被配置为输入采样信号。图腾柱调制用于提高基于 GaN 的逆变器或功率因数校正 (PFC) 电路（如 PMP23338）的效率。本应用手册中包含每个块的详细实现和代码，仿真结果用于验证代码和仿真模型的正确性。

内容

1 简介.....	2
2 逆变器模型概述.....	3
2.1 功率级.....	3
2.2 控制和调制方法.....	4
3 使用 C-Script 块实现数字控制.....	6
3.1 工程结构概述.....	6
3.2 交流电压采样和真 RMS 值计算.....	7
3.3 多环路控制.....	8
4 仿真结果.....	12
5 总结.....	14
6 参考资料.....	14

插图清单

图 2-1. 逆变器模型概览.....	3
图 2-2. 控制方法方框图.....	4
图 2-3. 图腾柱调制.....	4
图 2-4. 每种状态下的运行模式.....	5
图 3-1. 工程结构图.....	6
图 3-2. C-Script 设置.....	7
图 3-3. 输入信号定义.....	7
图 3-4. 在启动函数代码中初始化的变量.....	7
图 3-5. 更新函数中的交流电压采样代码.....	7
图 3-6. 输出函数中的声明.....	7
图 3-7. 交流电压采样和 RMS 值计算代码.....	8
图 3-8. 陷波滤波器的初始化.....	8
图 3-9. 具有陷波滤波器的电压环路.....	9
图 3-10. 电流环路代码.....	9
图 3-11. 正弦波发生器.....	10
图 3-12. 锯齿波发生器.....	10
图 3-13. 更新函数中的后台死区时间计数器.....	11
图 3-14. 正周期中的图腾柱控制代码.....	11
图 4-1. 启动过程.....	12
图 4-2. 负载瞬态 (100% 至 50% 至 10%)	13
图 4-3. 负载瞬态 (50% 至 100% 至 50%)	13
图 4-4. 负载瞬态的真 RMS 计算.....	13

表格清单

表 2-1. 功率级规格.....	3
表 2-2. 开关模式.....	5
表 4-1. THD% 和稳定时间.....	13

商标

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

PLECS® is a registered trademark of Plexim GmbH.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

逆变器广泛用于各种应用。例如，光伏逆变器、不间断电源 (UPS) 和车载充电器 (OBC) 利用逆变器将直流电源转换为交流电源。在这些系统中，逆变器性能对整个系统的性能具有重大影响。因此，为了提高逆变器的性能，人们提出并研究了许多拓扑和控制算法。一种初步验证转换器的可行性和性能的有效方法是仿真。此外，数字控制在现实情况下被广泛用于控制功率级，在仿真软件中代码比控制块更加灵活。因此，本应用手册的一个目的是介绍具有数字控制功能的单相离网逆变器的实现，另一个目的是验证具有多环路控制功能的图腾柱调制的性能。在传统控制方法中，电压环路的输入信号直接来自输出端的采样交流电压。但在本应用手册中，输出电压的 RMS 值用作电压环路中的基准值。本应用手册中讨论了该方法的优点。

PMP23338 是 TI 一款具有电表功能的 3.6kW 单相图腾柱无桥功率因数校正 (PFC) 电路参考设计。利用图腾柱无桥结构，该参考设计支持逆变器功能。两个有源半桥构成了该拓扑：一个半桥在低频下工作，另一个半桥在高频下工作。

PMP23338 中的高频半桥由两个 LMG3522R030 器件构成。LMG3522R030 是 TI 的 650V GaN FET，具有集成的驱动器和保护功能。与 Si FET 相比，由于 C_{OSS} 较低，GaN FET 的开关损耗要低得多。此外，GaN FET 的独特结构可实现零反向恢复电荷，从而进一步提高 GaN FET 在高频下的性能。

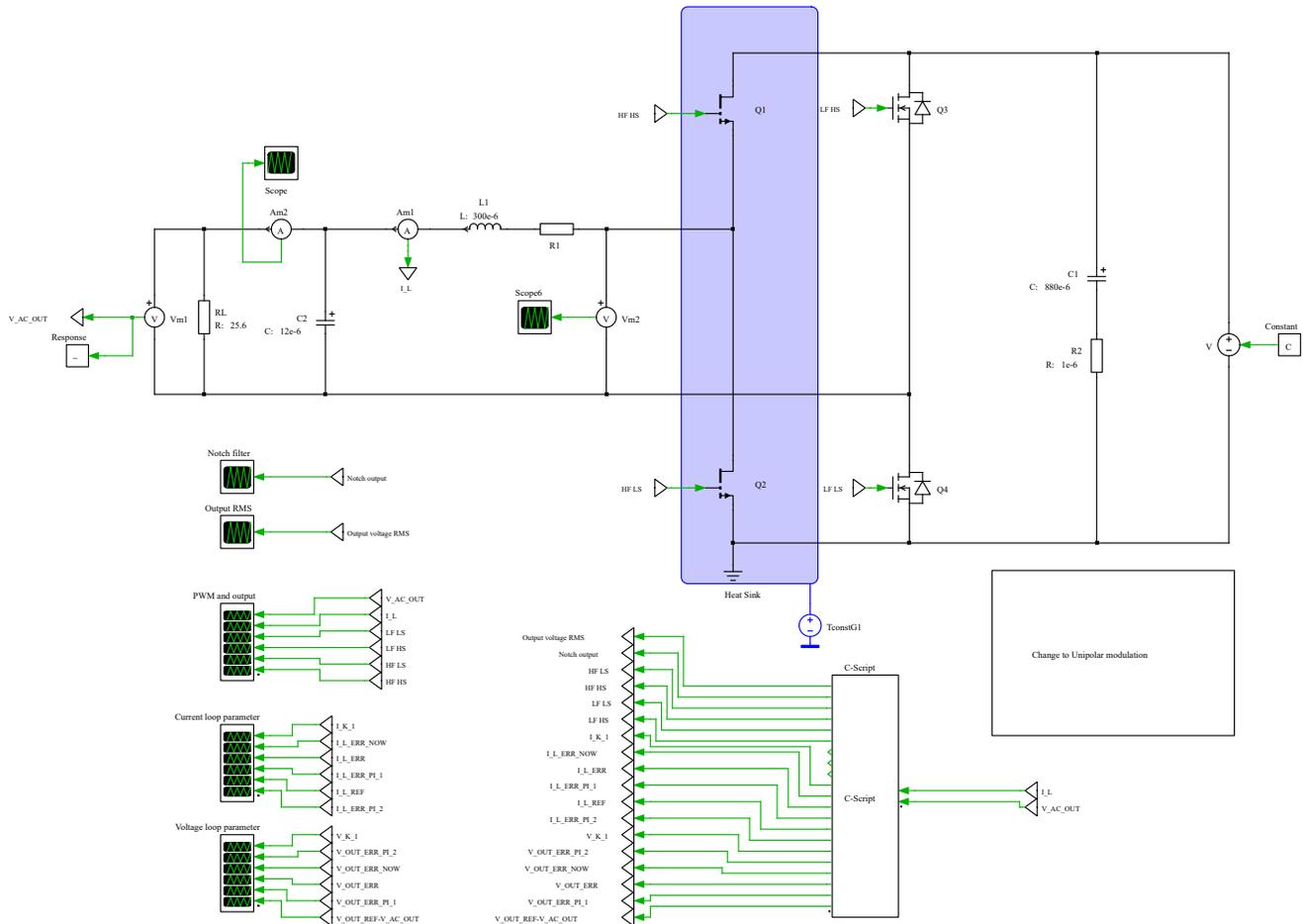
2 逆变器模型概述

2.1 功率级

图 2-1 是逆变器模型的概览，其中 **C-Script** 表示用于对数据进行采样、计算控制参数并输出 PWM 信号的数字控制器。功率级参数与 PMP23338 参考设计相同，表 2-1 中列出了规格。使用了具有 LC 输出滤波器的传统 H 桥拓扑。TI GaN 器件 LMG352xR030 用于高频电桥，常见的 Si FET 用作低频电桥 (50/60Hz)。

表 2-1. 功率级规格

参数	规格	单位
输入电压	380	V
输出电压	220	V _{RMS}
输出电压频率	50	Hz
输出功率	3.6	kW
输出电流	16	A _{RMS}
PWM 频率 (GaN 电桥)	100	kHz
PWM 频率 (SI 电桥)	50	Hz



2.2 控制和调制方法

离网逆变器的一种常见控制方法是具有 PI 补偿器的多环路控制。电压环路的输出是电流环路的基准值。该模型中采用了这种常见的控制方法，但电压基准和采样信号是输出电压的 RMS 值。此外，还使用了一个额外的陷波滤波器来使输出电压的 100Hz 纹波振幅衰减。传统电压环路直接使用采样交流电压来产生误差信号。在本应用手册中，使用 RMS 值可以在逆变器需要连接到电网时快速将电压基准切换为直流总线电压，还可以减少采样噪声引起的问题。图 2-2 显示了控制系统的方框图。

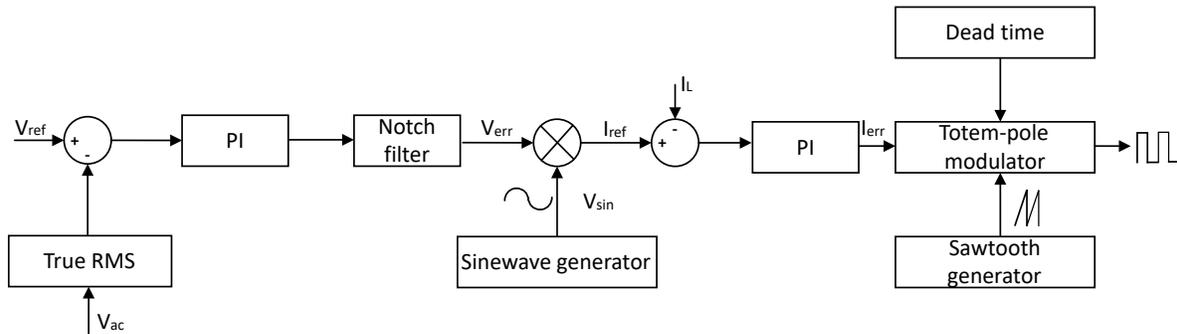


图 2-2. 控制方法方框图

在过去几十年中，人们提出了几种调制方法。双极调制、单极调制和具有多个频率的单极调制广泛用于电流应用。不同的调制方法对电流总谐波失真 (THD) 和共模电压（即电桥中点和中性点之间的电压变化）有不同的影响。不过，本应用手册使用图腾柱调制（也称为“改进版”单极调制）来降低开关损耗，从而优化效率。图腾柱无桥 PFC 结构现在广泛应用于 PFC 电路和逆变器电路，例如 PMP23338。在单极或双极调制中，全部四个开关都在高频率下运行，Si FET 中的开关损耗远高于 GaN FET。因此，如果使用图腾柱调制来实现 Si FET 以低频率运行且 GaN FET 以高频率运行，则图腾柱调制可以充分利用 GaN 的特性，从而降低开关损耗。

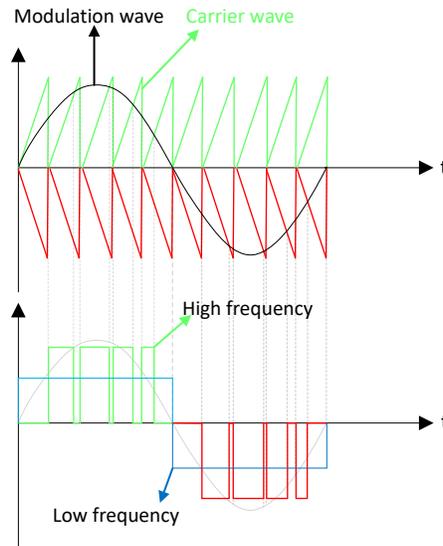


图 2-3. 图腾柱调制

对于低频电桥，开关点位于调制信号的零点处；对于高频电桥，开关点是与锯齿波的交点。表 2-2 显示了使用图腾柱调制的开关状态。

表 2-2. 开关模式

参数	Q1	Q2	Q3	Q4	模式
正半周期	开启	关闭	关闭	开启	1
	关闭	开启	关闭	开启	2
负半周期	关闭	开启	开启	关闭	3
	开启	关闭	开启	关闭	4

图 2-4 显示了每种模式的基本运行情况。

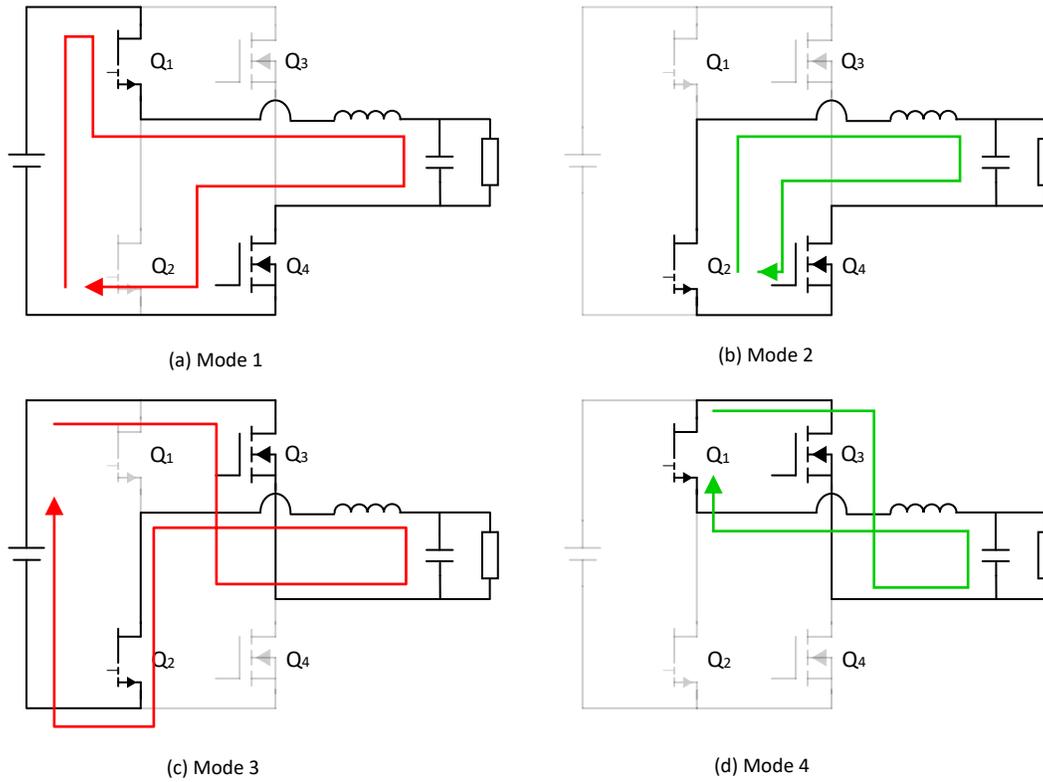


图 2-4. 每种状态下的运行模式

3 使用 C-Script 块实现数字控制

本节介绍使用 C-Script 块实现数字控制的详细过程。采样的影响不包括在内，这意味着所有采样电流和电压都是功率级的原始值。本节介绍如何使用仿真来实现数字控制，并提供将这些代码移植到 C2000 的思路。

3.1 工程结构概述

为了更好地了解 C-Script 处理，图 3-1 对工程结构和 C-Script 函数进行了总体介绍。块中使用了代码声明、启动函数、输出函数和更新函数。有关内置函数和更新逻辑的详细说明，请参阅 PLECS® C-Script 用户手册。

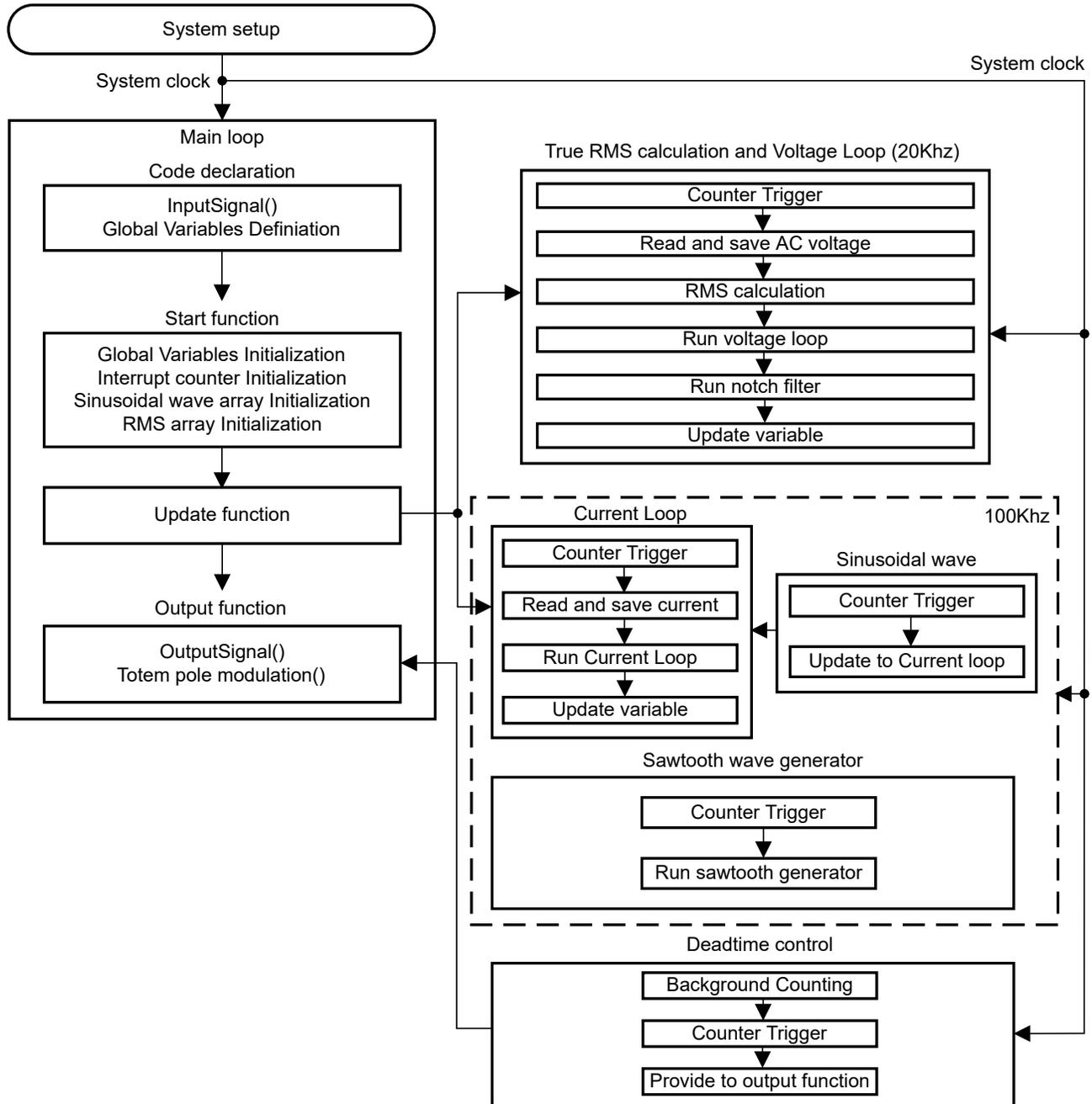


图 3-1. 工程结构图

在 C-Script 块中，还需要进行一些 C-Script 设置。图 3-2 显示了设置概况。输入数量表示来自功率级的输入信号或由其他块生成的其他信号，输出数量表示输出信号的数量。一个重要的参数是采样时间，其值被设置为 83ns，

了该模块的仿真结果。为了确定数组的确切长度，假设窗口宽度为四个周期的 50Hz 正弦波，采样速率为 20kHz，则获得数组长度 1600。

```
//AC voltage output sample
V_sample_Counter++;
if(V_sample_Counter==600)//20Khz
{
V_OUT_Temp=V_AC_OUT;// Save the value

V_RMS_Array[V_RMS_Tempcounter]=V_OUT_Temp;//update this value into the array

V_RMS_Tempcounter++;

//RMS calculation

for(i=0;i<1601;i++)
{
Temp1=V_RMS_Array[i]*V_RMS_Array[i]+Temp2;//Accumulation
Temp2=Temp1;
}
V_RMS_Out=sqrt(Temp1/1600);//Samplepoint=12,but now 11 may because the operation step
Temp1=Temp2=0;

if(V_RMS_Tempcounter==V_OUT_Samplepoint)
{
V_RMS_Tempcounter=0;
}

V_sample_Counter=0;
}
```

图 3-7. 交流电压采样和 RMS 值计算代码

3.3 多环路控制

如前所述，多环路控制方法广泛用于逆变器控制。本节介绍如何实现多环路控制方法。有关控制方框图，请参阅图 2-2。

3.3.1 具有陷波滤波器的电压环路

获得交流电压的 RMS 值后，首先在电压环路中使用该值。基准电压首先在启动函数中初始化，其值为 220。环路计算速率与采样速率相同，其值为 20kHz。首先，使用 PI 补偿器调节增益和电压环路相位，获得采样的 RMS 值与基准电压之间的误差值。

为了进一步降低采样信号中的 100Hz 电压纹波，在电压 PI 补偿器之后采用了一个陷波滤波器。该陷波滤波器的中心频率被设置为 100Hz 或 628rad/s，带宽为 5Hz。图 3-8 说明了启动函数中陷波滤波器的参数初始化，而图 3-9 展示了实现陷波滤波器后的电压环路代码。

```
//Norch filter parameter
a0=4+W_C*W_C*Tn*Tn;
a1=2*Tn*Tn*W_C*W_C-8;
a2=4+W_C*W_C*Tn*Tn;
b0=4+W_C*W_C*Tn*Tn+2*W_Bw*Tn;
b1=2*Tn*Tn*W_C*W_C-8;
b2=4+Tn*Tn*W_C*W_C-2*W_Bw*Tn;
```

图 3-8. 陷波滤波器的初始化

```
//Voltage loop control
ISR_SLOW_COUNT++;
if (ISR_SLOW_COUNT==600) // Interrupt of Voltage loop
{
    ISR_SLOW_COUNT=0;
    V_OUT_ERR_PI_1=((V_OUT_REF-V_RMS_Out)*Gv_Kp); //this time error for P
    V_OUT_ERR=V_OUT_ERR_PI_2+Gv_Ki*Ts*250*((V_K_1)+(V_OUT_REF-V_RMS_Out)); //this time minus last time *Ki for I,
    V_OUT_ERR_NOW=V_OUT_ERR_PI_1+V_OUT_ERR; //output of voltage loop
    V_OUT_ERR_PI_2=V_OUT_ERR; //Save this time I error
    V_K_1=V_OUT_REF-V_RMS_Out; //Save this time P error
    //Notch filter
    r_k=V_OUT_ERR_NOW;
    y_k=(a0/b0)*r_k+(a1/b0)*r_k_1+(a2/b0)*r_k_2-(b1/b0)*y_k_1-(b2/b0)*y_k_2;
    y_k_2=y_k_1;
    y_k_1=y_k;
    r_k_2=r_k_1;
    r_k_1=r_k;
}
}
```

图 3-9. 具有陷波滤波器的电压环路

3.3.2 具有 PI 补偿器抗饱和功能的电流环路

电流环路在电压环路之后连接。更新速率被设置为 100kHz，因此电感器电流的采样速率也为 100kHz。陷波滤波器的输出信号乘以正弦模块产生的正弦波，从而生成基准电流信号。与电压环路类似，电流误差信号由 PI 补偿器进行处理。为了避免积分过饱和，在 PI 补偿器中使用了抗饱和功能。图 3-10 显示了电流环路的代码。

```
//Current loop control
ISR_FAST_COUNT++; //Current loop counter
if (ISR_FAST_COUNT==120) //120=100Khz
{
    ISR_FAST_COUNT=0; // reset counter
    //I_L_REF=0.7*SinwaveOutput; // Open loop setting
    I_L_REF=y_k*SinwaveOutput;
    I_L_ERR_PI_1=(I_L_REF-I_L)*Gi_Kp; //Error of Proportion this time
    I_L_ERR=I_L_ERR_PI_2+(Gi_Ki*Ts*50*(I_K_1+(I_L_REF-I_L))); // Error of intergation this time
    // Anti-windup
    if (I_L_ERR>0.95&&(I_L_REF-I_L)>0)
    {
        I_L_ERR=0.95;
    }
    if (I_L_ERR<-0.95&&(I_L_REF-I_L)<0)
    {
        I_L_ERR=-0.95;
    }
    //I_L_ERR_NOW=I_L_REF; //open loop setting
    I_L_ERR_NOW=I_L_ERR+I_L_ERR_PI_1;
    I_L_ERR_PI_2=I_L_ERR; //I_L_ERR_PI_2 Error of integration k-1
    I_K_1=(I_L_REF-I_L); //e(k-1)
}
}
```

图 3-10. 电流环路代码

3.3.3 正弦波和锯齿波发生器

在 PLECS 中，会针对每个采样阶跃处理更新和输出函数。因此，设计人员可以将采样时间视为系统时钟，使用计数器以适当的频率生成这些信号。对于正弦波发生器，首先创建一个数组，并使用以正弦方式变化的数值初始化该数组。该数组被设置为 2000，从而与电流环路工作频率相对应。

```
//Update sinwave number
step_counter++;
if(step_counter==120)
{
if(Steptemp<2000)
{
SinwaveOutput=Sinwave[Steptemp];
Steptemp++;
}
else
{
Steptemp=0;
}

step_counter=0;
}
```

图 3-11. 正弦波发生器

逻辑与锯齿波发生器中的逻辑相同。图腾柱调制的一个重要方面是需要生成两个锯齿信号；一个用于正周期，另一个用于负周期，以便生成适当的 PWM 信号，如图 2-3 所示。这两个载波信号的振幅分别为 0 至 1 和 0 至 -1。值得一提的是，由于使用了一个振幅为 -1 至 1 的锯齿信号来生成 PWM 信号，因此需要 2 个信号。当误差信号接近于零时，最低占空比为 50%，正确的占空比应该接近于零。此外，上限也被设置为 12 并除以 120，从而设置系统时钟下的正确频率。图 3-12 显示了锯齿波发生器代码。

```
//update sawtooth number
CurrentNum=CurrentNum+1;
CurrentNum2=CurrentNum2-1;//for upperlimit=1,1/120 one step
if(CurrentNum==120)
{
CurrentNum=0;
}
if(CurrentNum2== -120)
{
CurrentNum2=0;
}
```

图 3-12. 锯齿波发生器

3.3.4 图腾柱调制和死区时间控制

要实现图腾柱调制，请将电流环路的输出误差信号与生成的锯齿波进行比较。有关开关状态，请参阅表 2-2。误差信号的正负值决定低频电桥的开关状态，锯齿和误差信号之间的交点决定高频电桥的开关状态。为了避免在零点附近产生 PWM 信号干扰，应设置阈值。

此外，为了避免电桥短路，设置了死区时间。由于设置了连续采样速率，所有这些函数都将按照特定的顺序执行，因此，无法在瞬态时间中添加延迟函数。鉴于此，在更新函数中设置了后台计时器，对每个采样时间进行累加。因此，一旦计数器达到所需的值，计时器就会使电桥中的另一个 FET 关断或导通。相应地，导通或关断时间可以延长，但无法缩短，以实现死区时间控制。图 3-13 和图 3-14 显示了相应的代码。

```
//deadtime
DB_Counter++;
if(DB_Counter==11)
DB_Counter=0;
```

图 3-13. 更新函数中的后台死区时间计数器

尽管计数器数值设置为 11，但有效数值为 10，这意味着死区时间为 83.3ns。

```
//Positive cycle
if(I_L_ERR_NOW>0.003)// Sin>0,low frequency lower mosfet on
{
LF_HS=0;
if(DB_Counter==10)//Dead time
{
LF_LS=1;
}

if(I_L_ERR_NOW>Sawtooth)
{
HF_LS=0;
if(DB_Counter==10)
{
HF_HS=1;
}
}
else
{
HF_HS=0;
if(DB_Counter==10)
{
HF_LS=1;
}
}
}
```

图 3-14. 正周期中的图腾柱控制代码

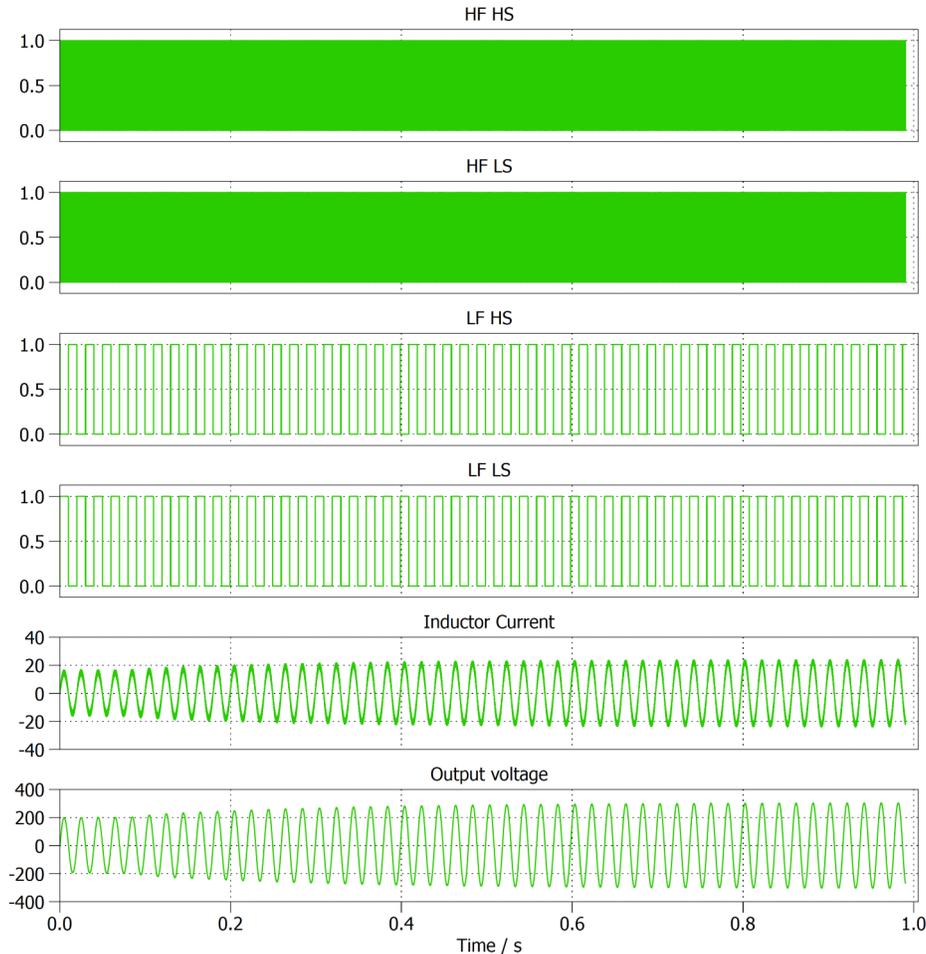
4 仿真结果

本节介绍仿真结果以验证理论和代码实现。有关功率级参数，请参阅表 2-1。

在启动过程中，为避免电压浪涌，RMS 数组的初始值被设置为 70。从启动到达到最终值的 95% 的时间被定义为稳定时间。图 4-1 显示了频率为 50Hz 的低频电桥开关和频率为 100kHz 的高频电桥开关。在过零期间，会由于误差信号而产生一些干扰，可以通过增大阈值来削弱这些干扰。

从启动到达到最终值的 95% 需要 660ms。为了更好地评估控制参数的性能，设置了一系列瞬态测试。如图所示，在满载和半负载条件下电感器电流是相对标准的正弦波。然而，在轻负载条件下，电感器电流呈现出明显的失真。减小失真的一种有效方法是增大电感。

根据表 4-1，THD% 和稳定时间表明控制系统可以快速有效地调节电感器电流和输出电压。



HF HS : 高频和高侧 PWM 信号
 HF LS : 高频和低侧 PWM 信号
 LF HS : 低频和高侧 PWM 信号
 LF LS : 低频和低侧 PWM 信号

图 4-1. 启动过程

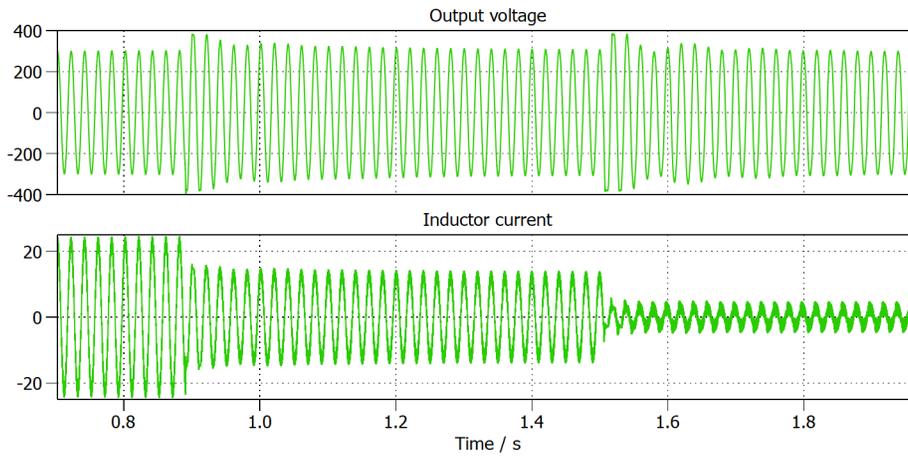


图 4-2. 负载瞬态 (100% 至 50% 至 10%)

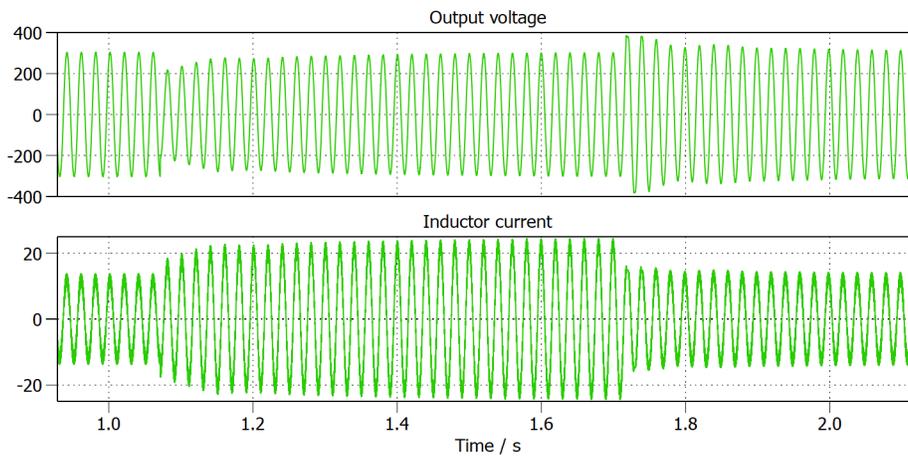


图 4-3. 负载瞬态 (50% 至 100% 至 50%)

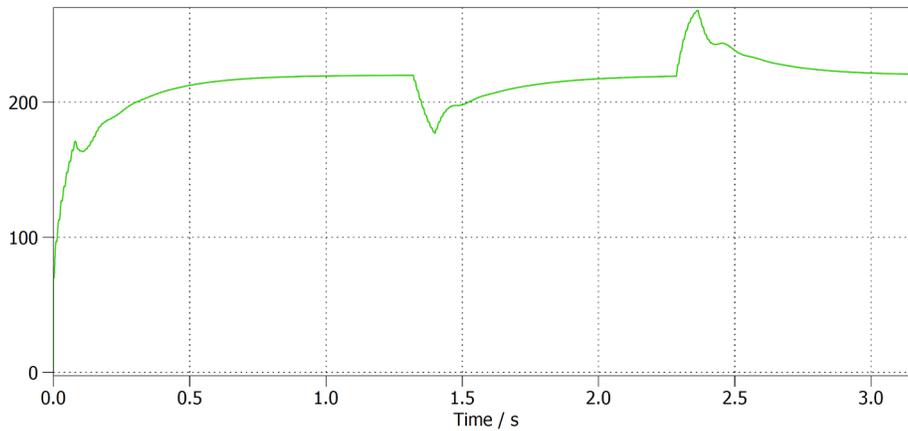


图 4-4. 负载瞬态的真 RMS 计算

表 4-1. THD% 和稳定时间

条件	THD%	稳定时间
满载启动	2.7%	0.660s
满载至半负载	2.8%	0.281s

表 4-1. THD% 和稳定时间 (续)

条件	THD%	稳定时间
半负载至 10% 负载	2.6%	0.259s

图 4-4 显示了真 RMS 计算块的输出。请注意该块中的权衡。较大的数组数值会减慢计算速度并增加系统的额外延迟。这会导致输出电压超过基准值，因为 RMS 计算滞后于实际值。不过，较小的数组长度会在 RMS 值中引入 50Hz 频率纹波，从而导致控制发生振荡。经过多次测试，发现对于该模型而言，窗口宽度 4 是比较合适的值。

5 总结

本应用手册介绍如何在 PLECS 中实现具有数字控制功能的单相离网逆变器。所有函数块都是使用 C-Script 代码块实现的。该模型与 TI 参考设计 PMP23338 或其他 TI 图腾柱 PFC 或逆变器参考设计相匹配。通过使用该模型，可以轻松验证功率级或控制块的参数。TI GaN LMG352XR030 也通过该模型实现，并且此器件的性能可以使用该模型来验证。

此外，对采用真 RMS 计算的多环路控制环路的说明可以用作单相离网逆变器的设计参考。可以使用该模型来扩展复杂的控制方法和拓扑。

此外，通过对工程软件结构和代码的详细说明，本应用手册还就将代码移植到 TI 的 C2000 MCU 中提供了一些思路。

6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [PMP23338 具有电表功能的 3.6kW 单相图腾柱无桥 PFC 参考设计](#)
- 德州仪器 (TI), [TIDM-02008 采用 C2000™ MCU 的双向高密度 GaN CCM 图腾柱 PFC 参考设计](#)
- 德州仪器 (TI), [TIDM-HV-1PH-DCAC 具有电压源和并网模式的单相逆变器参考设计](#)
- 德州仪器 (TI), [LMG3522R30 具有集成驱动器、保护和温度报告功能的 650V 30mΩ GaN FET 数据表](#)
- [PLECS User Manual](#)
- IEEE, [Design and analysis of single phase voltage source inverter using Unipolar and Bipolar pulse width modulation techniques](#), 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEEES), Putrajaya, Malaysia, 2016, pp. 277-282.

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司