



# 第八届中国功率变换器磁元件联合学术年会

---

## PWM逆变器输出端 差共模无源滤波器的研究

杨玉岗， 孙鹤鸣

辽宁工程技术大学

2018年8月17日



# 内容提要

---

01

**背景介绍**

02

**PWM逆变器输出端差共模电压的谐波分析**

03

**差共模无源滤波器的电路拓扑研究**

04

**差共模无源滤波器中共模变压器的设计及实验结果**

05

**结论**



## 研究背景及意义

### PWM逆变器输出电压存在的问题

#### 高频dv/dt

逆变器开关器件的开通和关断速度较快，在开关器件开通和关断时刻，逆变器的输出电压会产生较大的dv/dt，**高频脉冲**将在负载端产生**过电压**。

#### 共模电压危害

由于变频器采用PWM调制技术，**三相电压输出不平衡**，使负载端产生**高频共模电压**，高频共模电压会对电机和电网带来严重危害。

#### 电磁干扰

dv/dt过高，会导致负载绝缘击穿进而产生漏电流，漏电流经地线流回系统的三相电源中，产生**高频电磁干扰**，影响系统中其他电子设备的正常运行。

## 研究意义

将PWM逆变器产生的谐波控制在最小范围内，减小负载端所受到的负面影响，抑制电磁污染，提高系统的可靠性，延长设备的使用寿命。



# 国内外逆变器输出端无源滤波器的研究现状

## 国内研究

哈尔滨工业大学的徐殿国教授等人对PWM逆变器输出端共模与差模电压设计了一种二阶RLC抑制型滤波器，哈尔滨理工大学姜艳姝教授等人对PWM逆变器输出差共模滤波器有一定研究，但总体来说对**差共模无源滤波器**的研究较少。

VS

## 国外研究

A.L.Julian学者提出的一种带有二阶滤波器的三相四桥臂功率变换器，虽然滤波效果较好，但需要**增加一组额外的桥臂**；A.V.Jouanne等学者提出的共模变压器方案，加上差模滤波电路，滤波器**体积较大**。



# 内容提要

---

01

背景介绍

02

**PWM逆变器输出端差共模电压的谐波分析**

03

差共模无源滤波器的电路拓扑研究

04

差共模无源滤波器中共模变压器的设计及实验结果

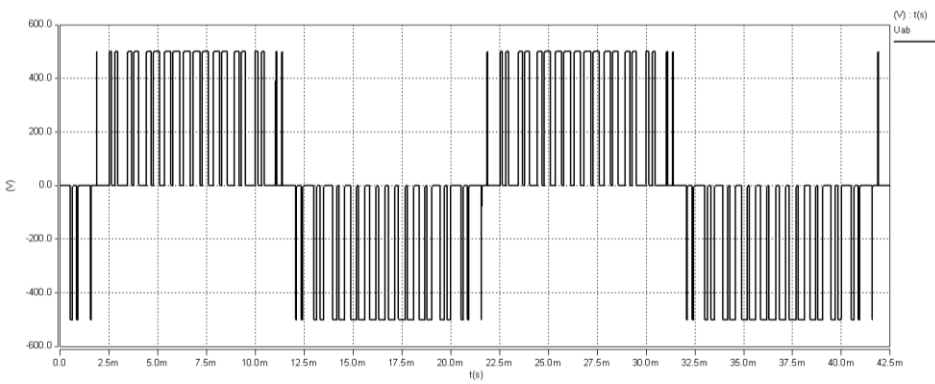
05

结论

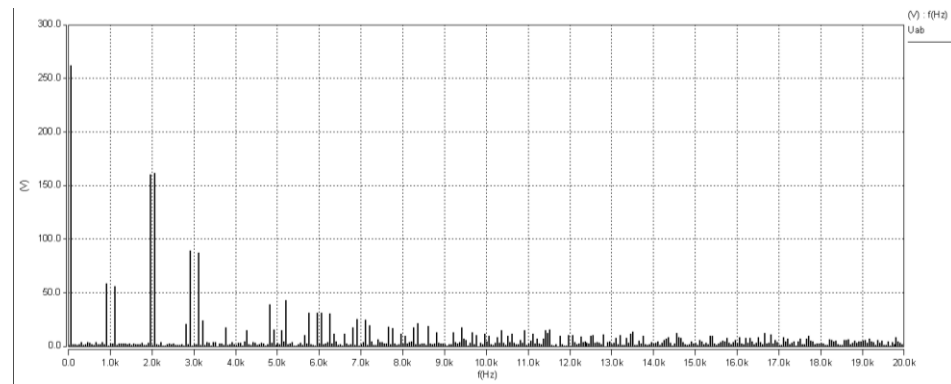


## PWM逆变器输出电压波形和频谱仿真

为了更加直观地观察分析PWM逆变器的输出谐波特性，采用SABER仿真软件对逆变器输出的电压进行仿真和频谱分析。



PWM逆变器输出线电压仿真波形



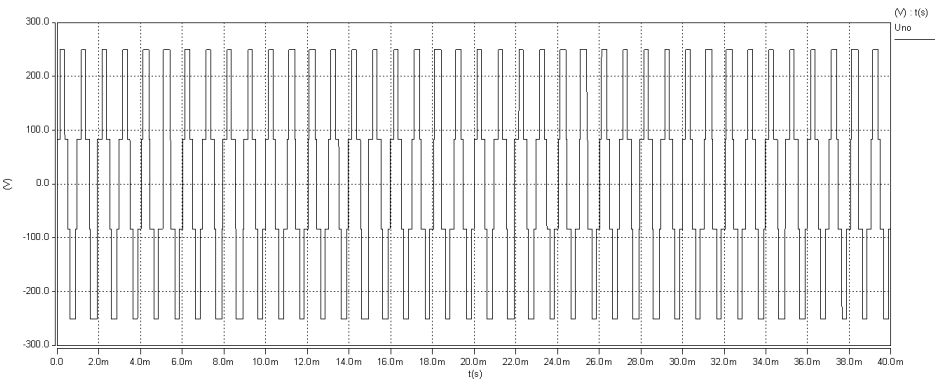
PWM逆变器输出线电压频谱图

## 分析

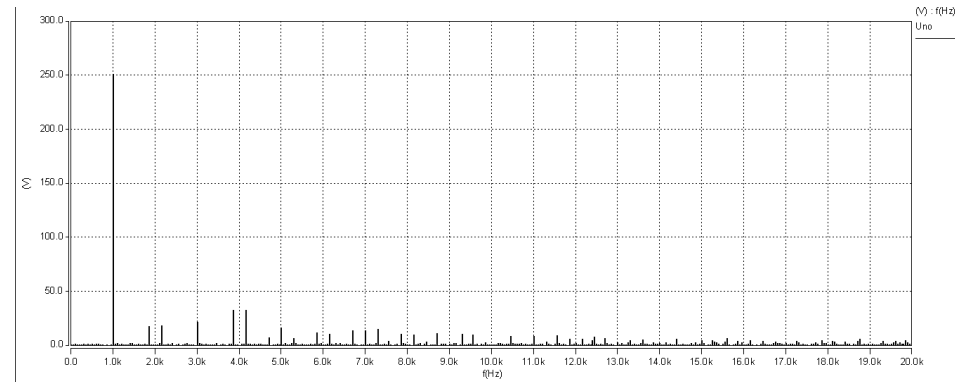
可以看出，在脉宽调制(PWM)中，逆变器输出的线电压中不含有低次谐波，载波角频率为 $\omega_c$ 整数倍的谐波被消除。在输出谐波中，幅值较高的是 $\omega_c \pm 2\omega_r$ 和 $2\omega_c \pm 2\omega_r$ 。 $\omega_r$ 为调制波角频率。



## PWM逆变器输出电压波形和频谱仿真



PWM逆变器输出共模电压仿真波形



PWM逆变器输出共模电压频谱图

## 分析

PWM逆变器输出共模电压是以**载波角频率 $n\omega_c$** 为中心，**边频 $\pm k\omega_r$** 分布其两侧，谐波分量在两侧呈对称衰减。共模电压的**谐波分量幅值与载波频率无关**，但谐波位置随载波频率的变化而发生变化。在**一倍载波角频率处，逆变器输出共模电压的谐波幅值最大。**



# 内容提要

---

01

背景介绍

02

PWM逆变器输出端差共模电压的谐波分析

03

**差共模无源滤波器的电路拓扑研究**

04

差共模无源滤波器中共模变压器的设计及实验结果

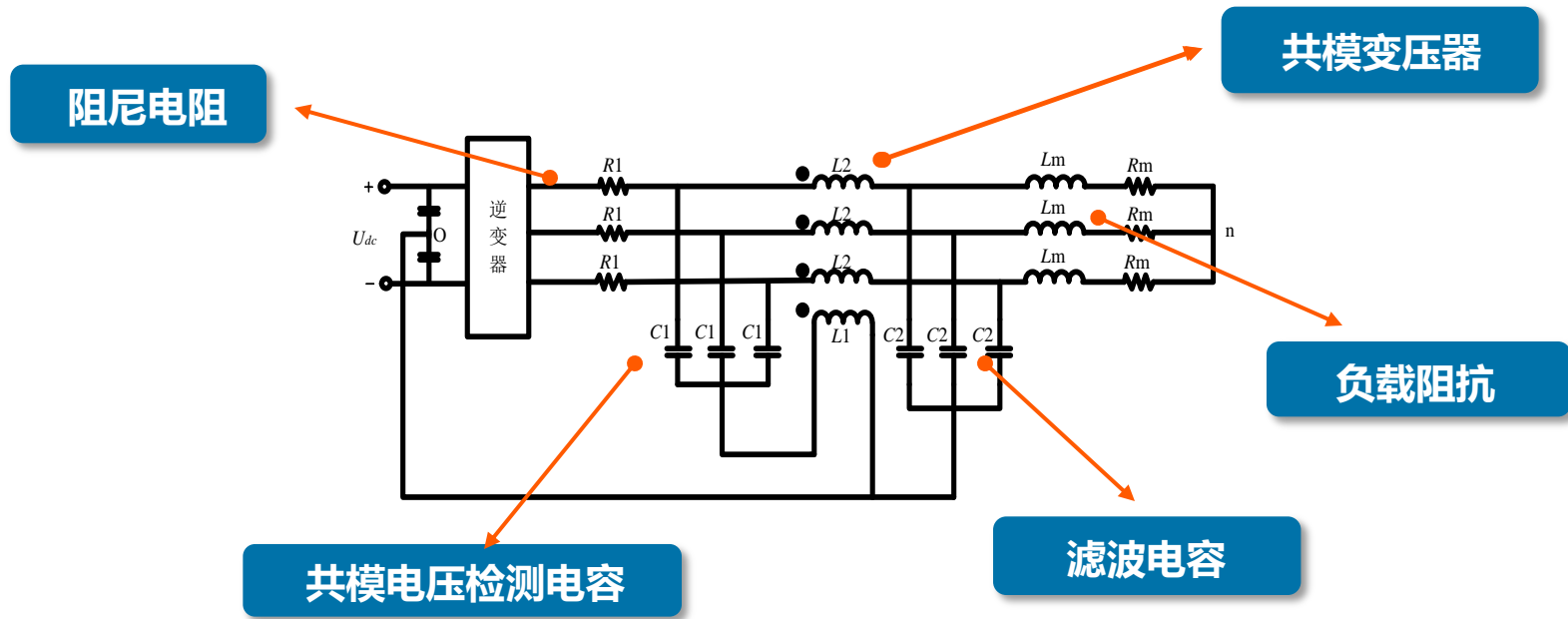
05

结论





## RCLC型无源滤波器的拓扑结构研究

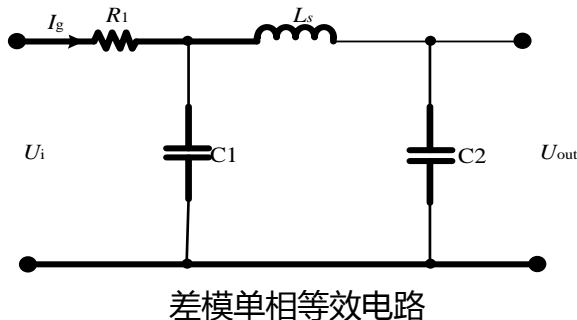


## 分析

1. 输入端的电阻  $R1$  充当**阻尼电阻**来增强系统稳定性，抑制系统谐振；
2. 电容  $C1$  构成一个星型网络，网络的中点用来**检测系统的共模电压**，将该中点的对地共模电压加载到共模变压器原边两端，通过**共模变压器的耦合作用**，与电容  $C2$  构成**共模低通滤波电路**来消除共模电压。
3. 用**共模变压器的漏感来代替三相差模滤波电感**，既可以消除差模谐波，又可以减小滤波器的磁芯数量。



## RCLC型滤波器差模等效电路及其特性分析

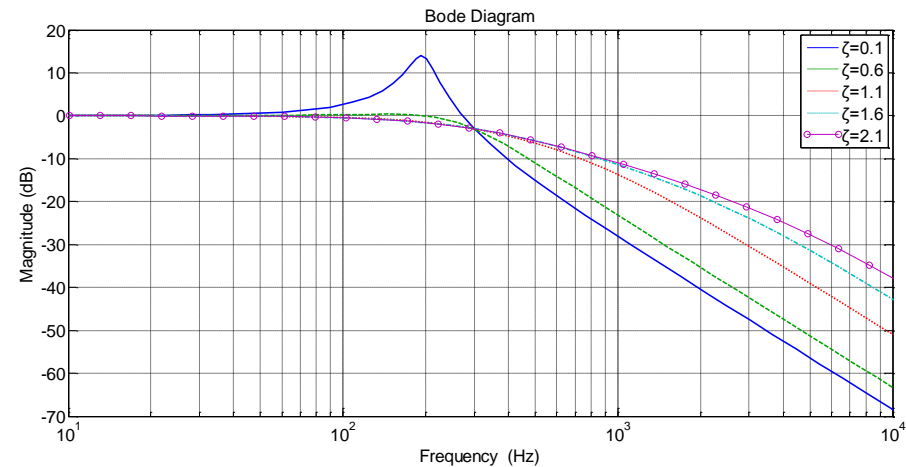


求得输出差模电压的传递函数为

$$H(s) = \frac{LsC1s^2 + 1}{C1Ls^2C2s^4 + 2R1C1LsC2s^3 + Ls(C1 + C2)s^2 + R1(C1 + C2)s + 1}$$

求出传递函数的幅频特性

$$\begin{cases} \omega_{ln} = \frac{1}{\sqrt{LsC2}} \\ \zeta = \frac{R1}{2} \sqrt{\frac{C2}{Ls}} \end{cases}$$

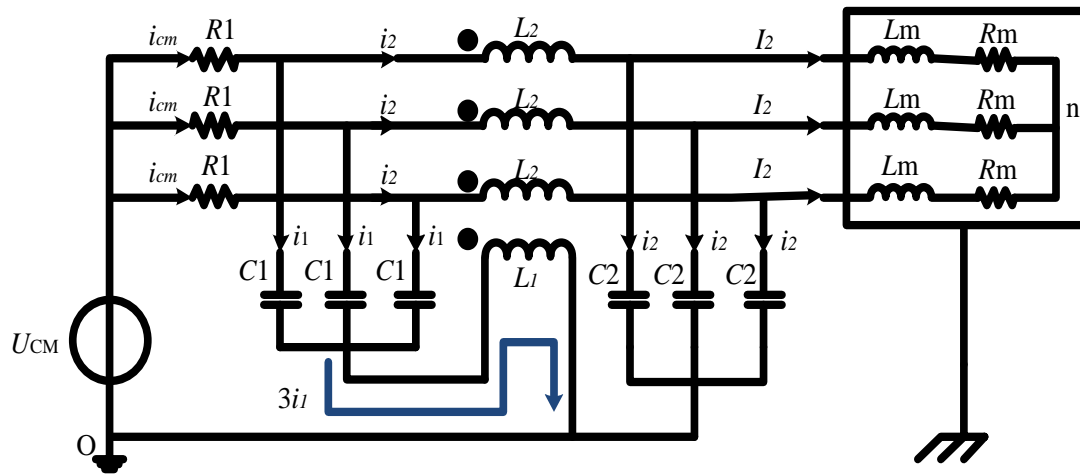


差模电路的对数幅频特性图

### 分析

利于MATLAB软件绘制出差模传递函数的Bode图来可以看到，此时滤波电路有着良好的**低通特性**，可以消除高频差模电压谐波分量。

## RCLC型滤波器共模等效电路及其特性分析



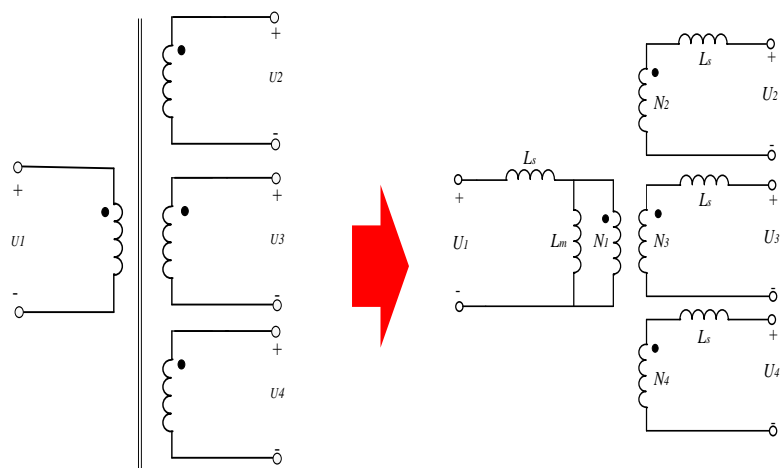
RCLC滤波器的共模变等效电路

分析

RCLC型无源滤波器的共模电压检测网络包括：由电容C1网络检测的共模电压传递到变压器的原边绕组L1，共模变压器的副边绕组L2与电容C2滤波回路一起构成一个**截止频率远小于开关频率的低通滤波器**去抑制共模电压。为了便于分析，本文在共模电压的等效电路里将PWM逆变器输出的共模电压用一个电压源来等效替代。并且假设流过负载的共模电流很小，可以忽略不计。



## RCLC型滤波器共模等效电路及其特性分析

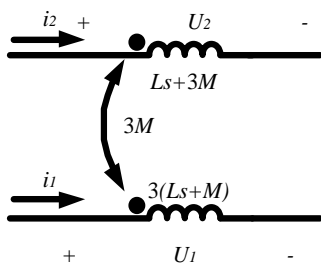


共模变压器等效电路

$$\begin{cases} U_1 = \left( L_s \cdot \frac{d3i_1}{dt} + \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \cdot L_m \cdot \frac{d3i_1}{dt} \right) + \frac{N_1 \cdot N_2}{N_1^2} \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{N_1 \cdot N_3}{N_1^2} \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{N_1 \cdot N_4}{N_1^2} \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} \\ U_2 = \frac{N_2 \cdot N_1}{N_2^2} \cdot L_m \cdot \frac{d3i_1}{dt} + \left( L_s \cdot \frac{di_2}{dt} + \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} \right) + \frac{N_2 \cdot N_3}{N_2^2} \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{N_2 \cdot N_4}{N_2^2} \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} \\ U_3 = \frac{N_3 \cdot N_1}{N_3^2} \cdot L_m \cdot \frac{d3i_1}{dt} + \frac{N_3 \cdot N_2}{N_3^2} \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} + \left( L_s \cdot \frac{di_2}{dt} + \left( \frac{N_3}{N_1} \right)^2 \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} \right) + \frac{N_3 \cdot N_4}{N_3^2} \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} \\ U_4 = \frac{N_4 \cdot N_1}{N_4^2} \cdot L_m \cdot \frac{d3i_1}{dt} + \frac{N_4 \cdot N_2}{N_4^2} \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{N_4 \cdot N_3}{N_4^2} \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} + \left( L_s \cdot \frac{di_2}{dt} + \left( \frac{N_4}{N_1} \right)^2 \cdot L_m \cdot \frac{di_2}{dt} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_1 = 3(L_s + M) \frac{di_1}{dt} + 3M \frac{di_2}{dt} \\ U_2 = 3M \frac{di_1}{dt} + (L_s + 3M) \frac{di_2}{dt} \\ U_3 = 3M \frac{di_1}{dt} + (L_s + 3M) \frac{di_2}{dt} \\ U_4 = 3M \frac{di_1}{dt} + (L_s + 3M) \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$

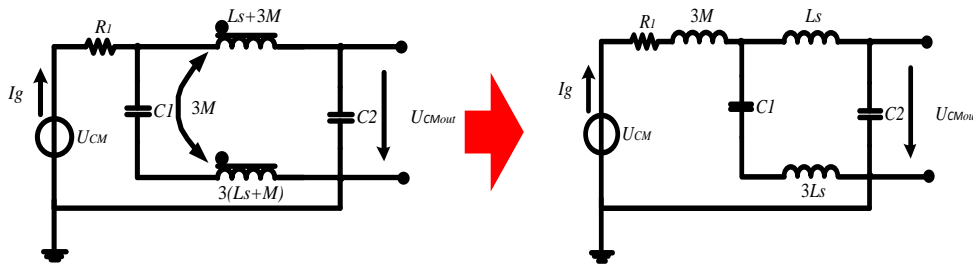
由于共模都有分量都是相对参考地而言的，假设PWM逆变器输出端的三相负载对称相等，根据上述电压方程利用戴维南定理可得出关于共模变压器的单相等效电路。



$$\begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3(L_s + M)s & 3Ms \\ 3Ms & (L_s + 3M)s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(s) \\ i_2(s) \end{bmatrix}$$



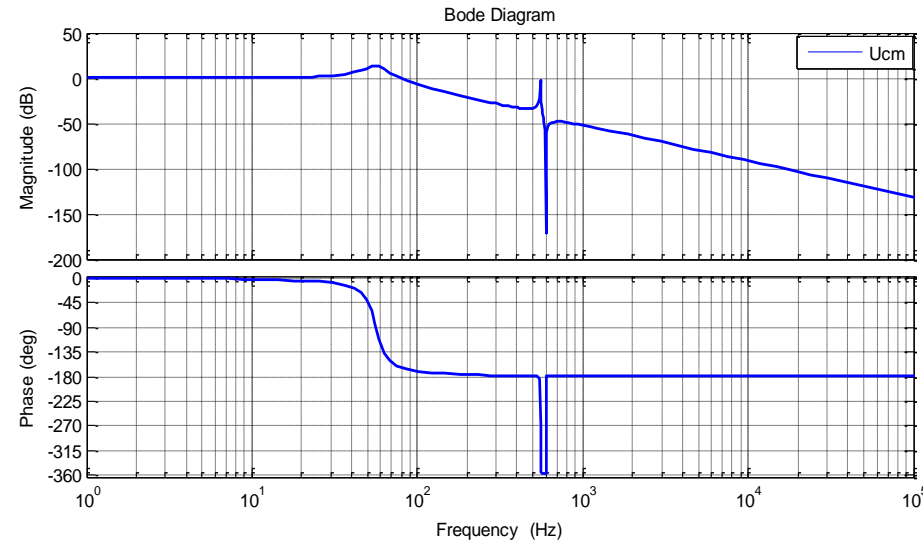
## RCLC型滤波器共模等效电路及其特性分析



无源滤波器的共模单相等效电路

求得输出共模电压的传递函数为

$$H_o(s) = \frac{3LsC1s^2 + 1}{3(Ls^2 + 4LsM)C1C2s^4 + 4R1LsC1C2s^3 + [3(Ls + M)C1 + (Ls + 3M)C2]s^2 + R1(C1 + C2)s + 1}$$



输出共模电压传递函数的Bode图

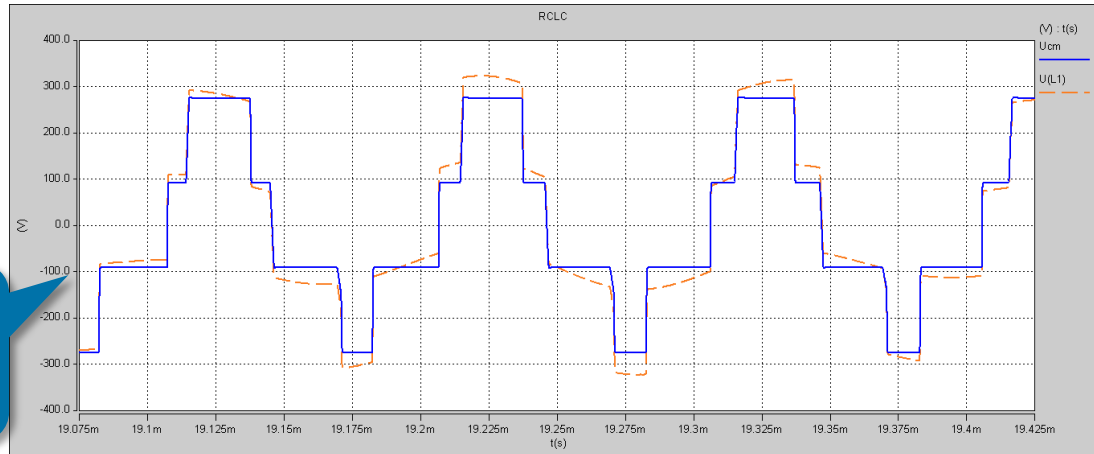
分  
析

共模回路的截止频率远小于开关频率，所以该滤波器对共模电压的抑制有着很好的效果。



## 滤波器稳定性分析及其参数设计限制条件

当电路中出现了大于开关频率的谐振点时，会使得共模变压器原边电压过高。



共模变压器原边输入电压与共模输入电压不匹配的情况

## 分析

1. 整个电路不仅达不到理想的共模滤波效果，还因为变压器原边电压过高使得共模电压转化成为差模电压，影响到了差模回路，导致差模滤波回路也受到了影响。
2. 因此，为了避免出现系统失稳的状态或者差模电压与共模电压发生相互转化的情况，应该对可能产生的谐振情况进行分析。
3. 由于滤波电感 $L_s$ 、滤波电容 $C_2$ 与阻尼电阻 $R_1$ 已经由差模滤波回路所确定，所以影响共模电路稳定性的参数主要是检测电容 $C_1$ ，从与电容 $C_1$ 发生串联谐振的共模变压器原边电感 $L_1$ 入手，利用共模单相等效电路图求共模变压器原边电压对输入共模电压的传递函数，对共模电路稳定性进行分析。



## 滤波器稳定性分析及其参数设计限制条件

求出变压器原边电压对共模电压的传递函数  $H_1(s)$

$$U_1(s) = 3(L_s + M)s \cdot I_1(s) + 3Ms \cdot I_2(s)$$

$$U_{CM}(s) = \left[ \frac{1}{sC_1} + 3(L_s + M)s + R_1 \right] \cdot I_1(s) + (3Ms + R_1) \cdot I_2(s)$$

$$I_1(s) = \frac{1 - (3Ms + R_1)C_2 \cdot s \cdot H_o(s)}{\frac{1}{sC_1} + 3(L_s + M)s + R_1} U_{CM}(s)$$

$$I_2(s) = U_{CM}(s) \cdot H_o(s) \cdot sC_2$$

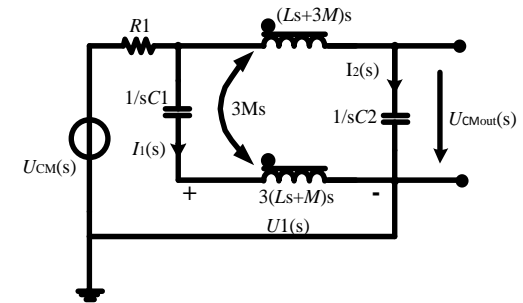
$$H_1(s) = \frac{U_1(s)}{U_{CM}(s)}$$



$$H_1(s) = \frac{[3(L_s + M)C_1s^2 - (9(L_s + M)MC_1C_2s^4 + 3(L_s + M)R_1C_1C_2) \cdot H_o(s)] + 3MC_2s^2[1 + 3(L_s + M)C_1s^2 + R_1C_1s] \cdot H_o(s)}{1 + 3(L_s + M)C_1s^2 + R_1C_1s}$$

$$H_o(s) = \frac{Ds^2 + 1}{Xs^4 + Ys^3 + Zs^2 + Ws + 1}$$

$$\begin{cases} A = 3(L_s + M)C_1 \\ B = (3MC_1 - A)R_1C_2 \\ D = 3L_sC_1 \\ X = 3(L_s^2 + 4L_sM)C_1C_2 \\ Y = 4R_1L_sC_1C_2 \\ Z = 3(L_s + 3M)C_1 + (L_s + 3M)C_2 \\ W = R_1(C_1 + C_2) \end{cases}$$



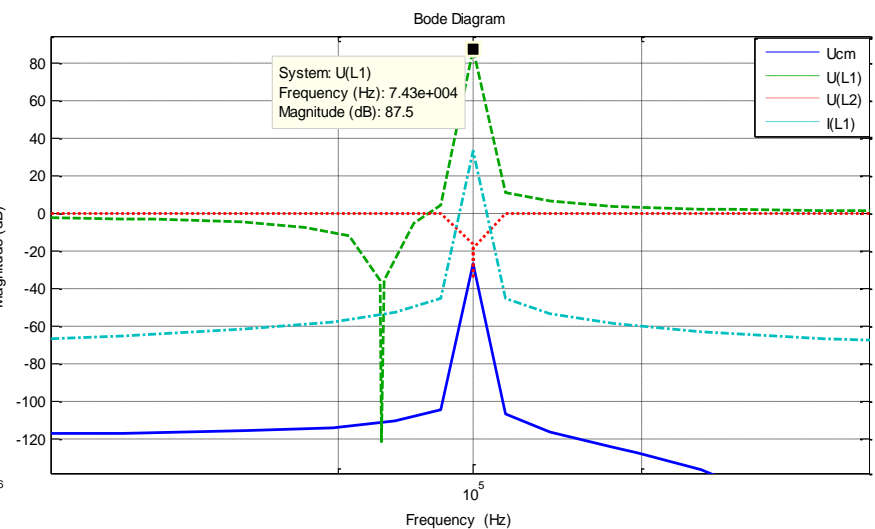
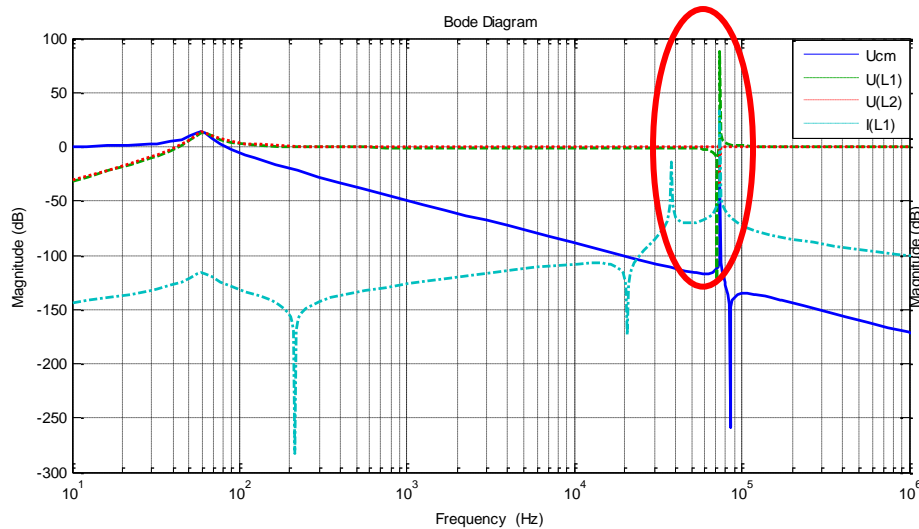
共模单相等效电路

$$H_1(s) = \frac{AXs^6 + (AY + BD)s^5 + (AZ + 3MC_2D)s^4 + (AW + B)s^3 + (A + 3MC_2)s^2}{AXs^6 + (AY + R_1C_1X)s^5 + (AZ + R_1C_1Y + X)s^4 + (AW + R_1C_1Z + Y)s^3 + (A + R_1C_1W + Z)s^2 + (R_1C_1 + W)s + 1}$$



## 滤波器稳定性分析及其参数设计限制条件

用类似方法可求得共模变压器副边电压对输入共模电压的传递函数，变压器原边电流对输入电压的传递函数以及变压器副边电压的传递函数。



变压器原边电压、原边电流、副边电压和共模输出电压传递函数对应的Bode图

传递函数Bode图中对应的谐振点

分析

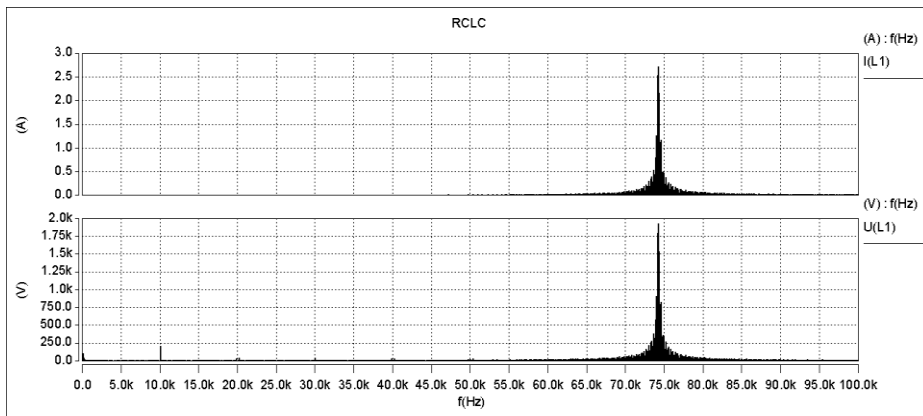
当所有的变量都给定时，可以利用MATLAB对传递函数进行分析，进而绘制出变压器原边电压的传递函数的波特图，从波特图中可以观察到变压器的电压谐振点。四个公式的传递函数在**同一个频率**下达到了谐振峰值点，证明了公式推导正确性。



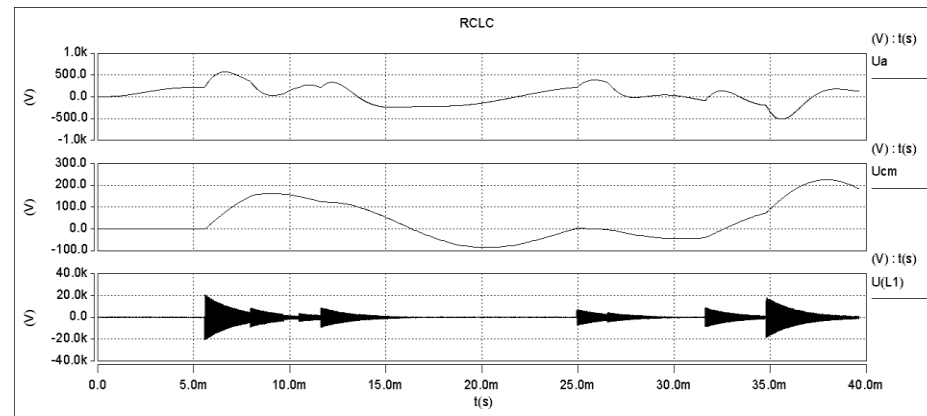


## 滤波器稳定性分析及其参数设计限制条件

利用SABER仿真软件中的傅里叶分析来对观察量进行频谱分析



谐振时共模变压器原边输入电压和电流频谱图



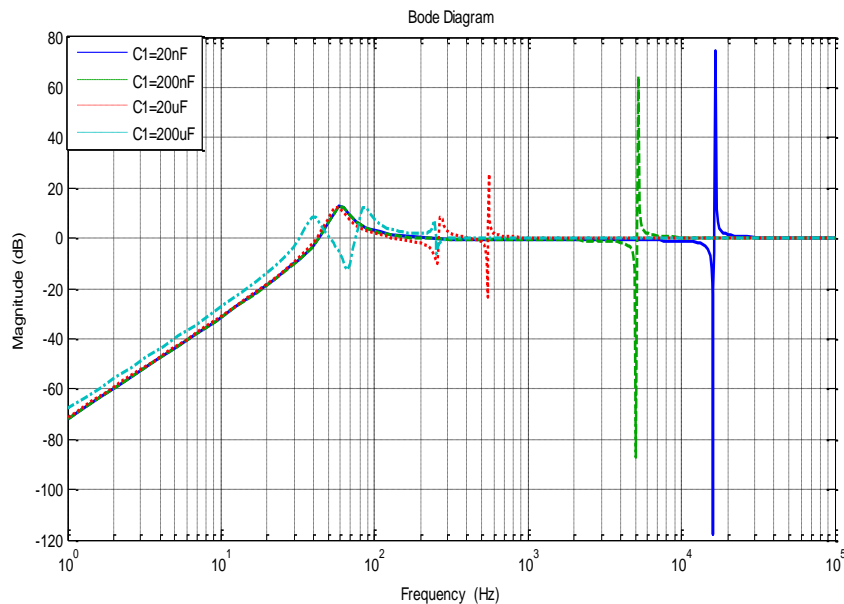
变压器原边谐振对电路输出差模和共模电压的影响

## 分析

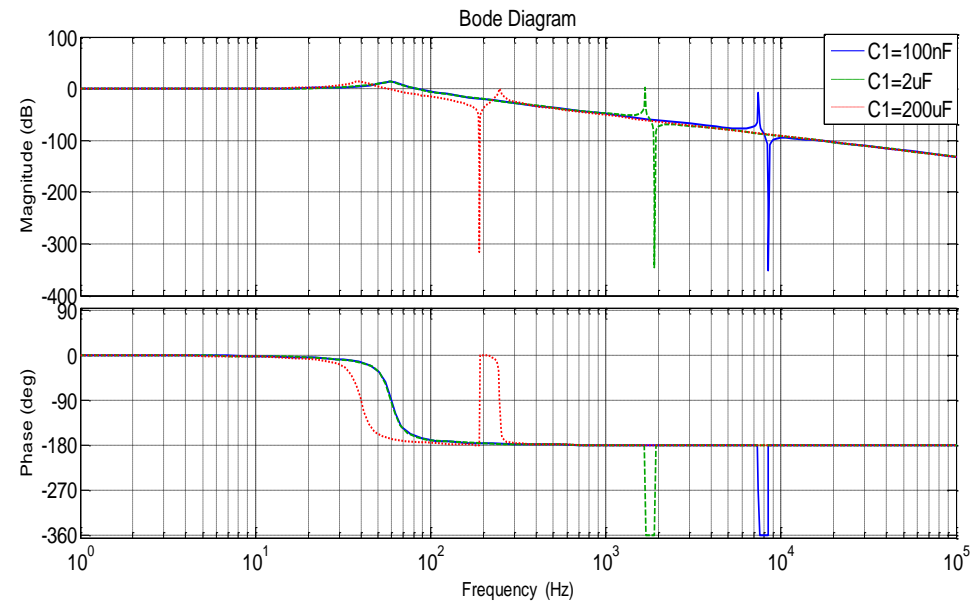
1. MATLAB中电压电流的谐振峰值点与频谱中的谐振点**对应一致**,
2. 电路中存在谐振电压时**共模电压通过共模变压器转化为差模电压**,
3. 输出三相电压与共模电压都发生**畸变**, 对系统影响危害十分严重。



## 滤波器稳定性分析及其参数设计限制条件



不同电容C1对共模变压器原边绕组电压的影响



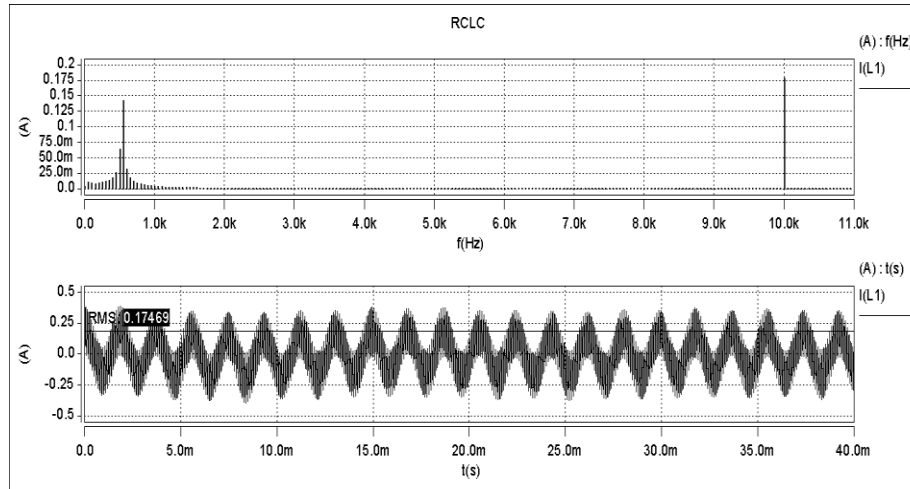
不同检测滤波器的共模传递函数波特图

### 分析

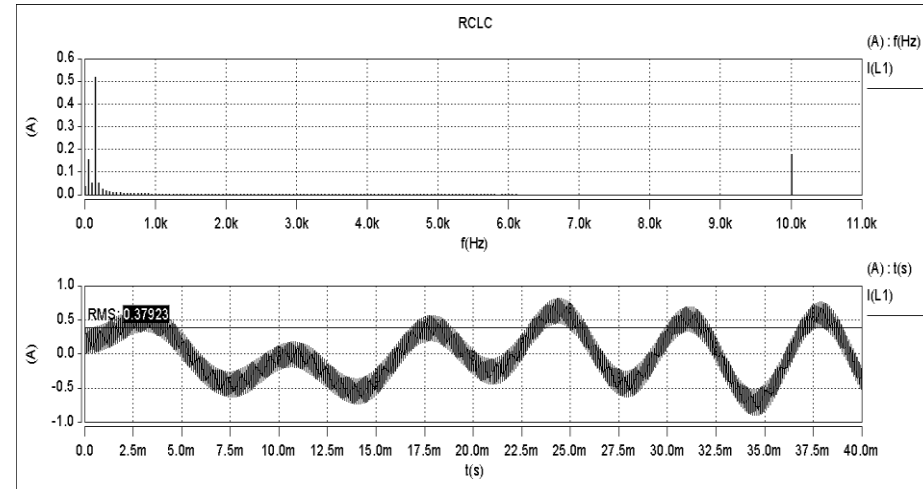
1. 随着电容  $C1$  增大，谐振点与谐振峰值减小，
2. 所以为了避免电路出现失稳，应使谐振频率点远小于开关频率点。



## 滤波器稳定性分析及其参数设计限制条件



C1值较小情况



C1值较大情况

### 注意

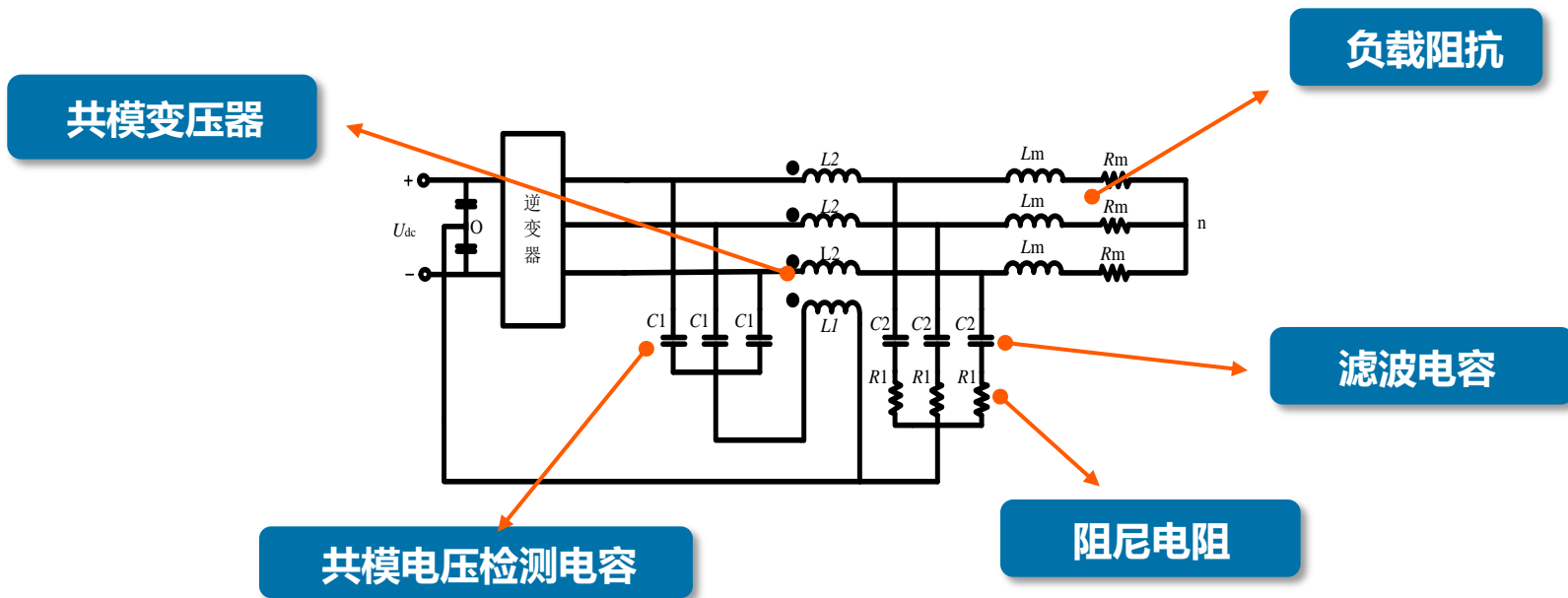
若差模回路的截止角频率过高且电容C1取值较大，谐振点过低时，差模谐波电压会发生谐振，导致流入变压器的原边电流过大。

### 参数设计限制

谐振角频率应大于差模回路的截止角频率，且远远小于开关角频率。



## CLCR型无源滤波器

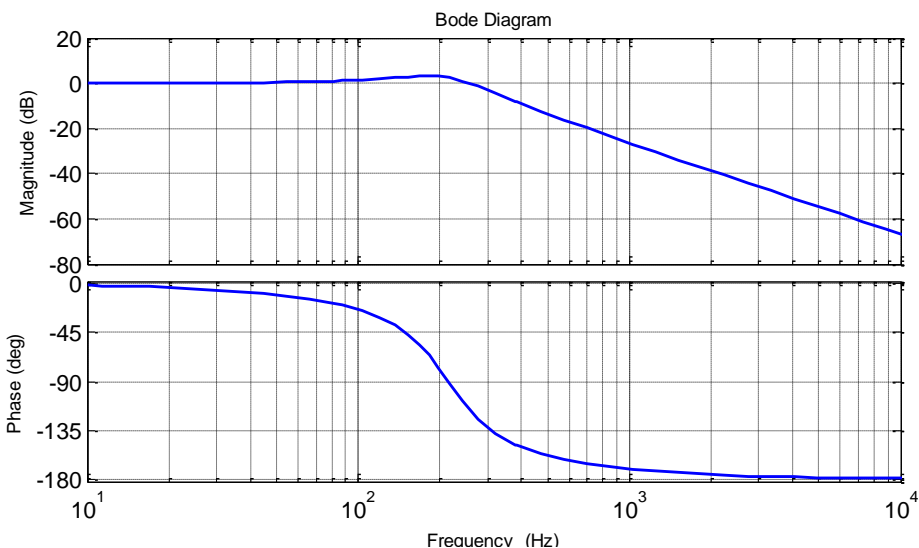


分析

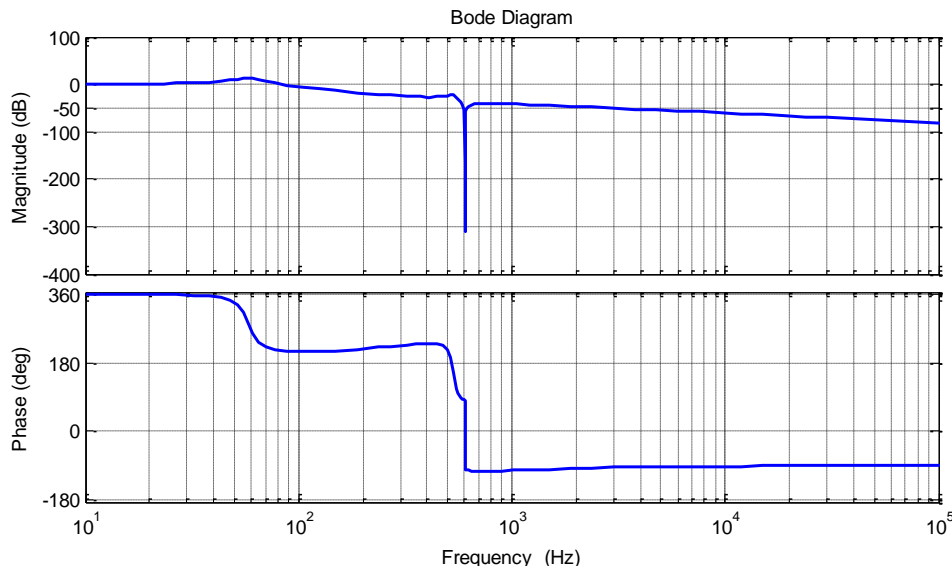
1. 阻尼电阻是与负载呈并联关系，
2. 不会消耗有功功率，无基波电流损耗，
3. 应用于负载电流较大的工作场合。



## CLCR型无源滤波器



差模电路的Bode图



共模电路的Bode图

分析

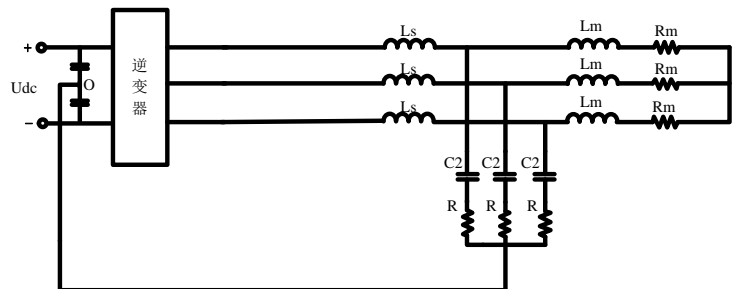
对差模电压的高频分量同样有着很好衰减作用。

对共模电压有着低通特性，但对共模电压的抑制效果比RCLC型滤波器差。

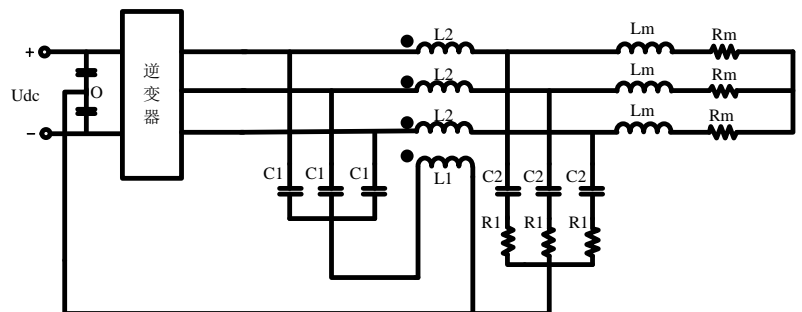


## 无源滤波器仿真波形对比

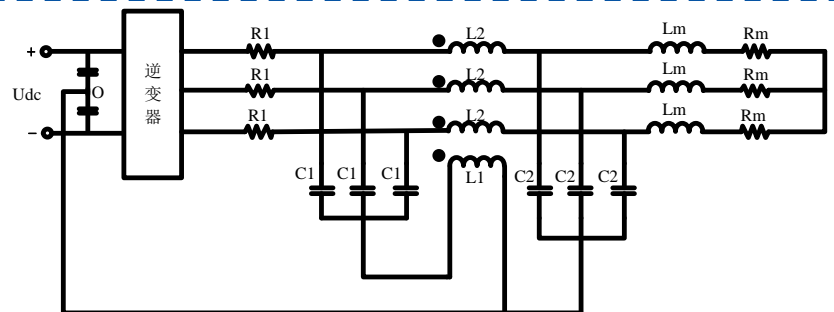
### 改进型RLC滤波器



### CLCR型滤波器



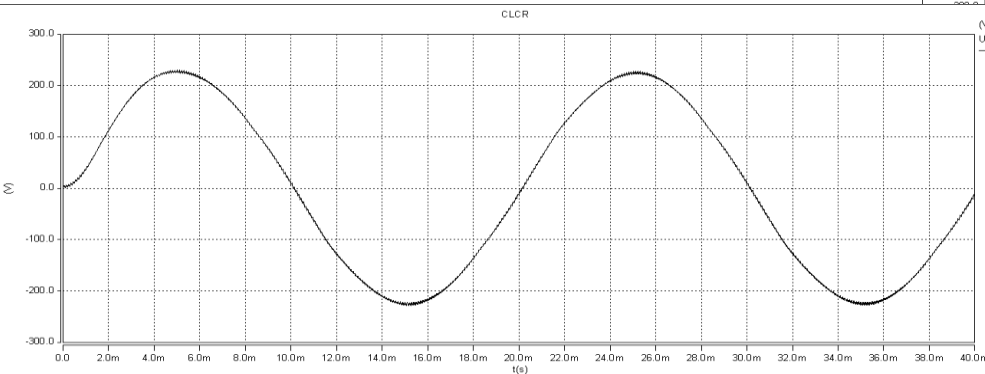
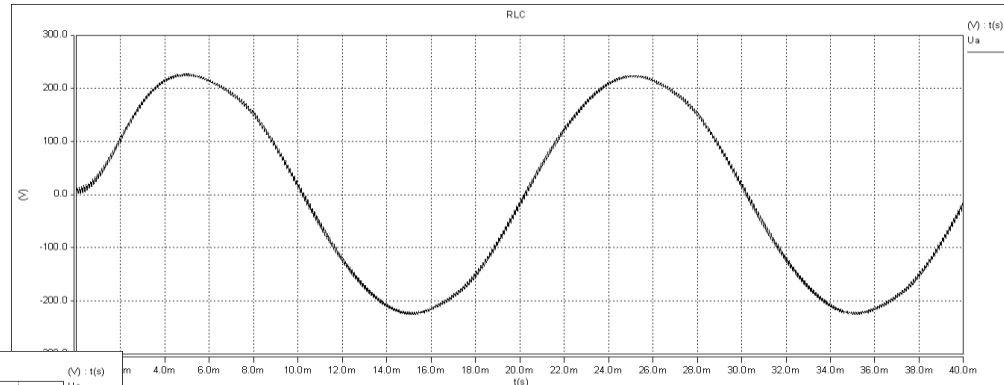
### RCLC型滤波器





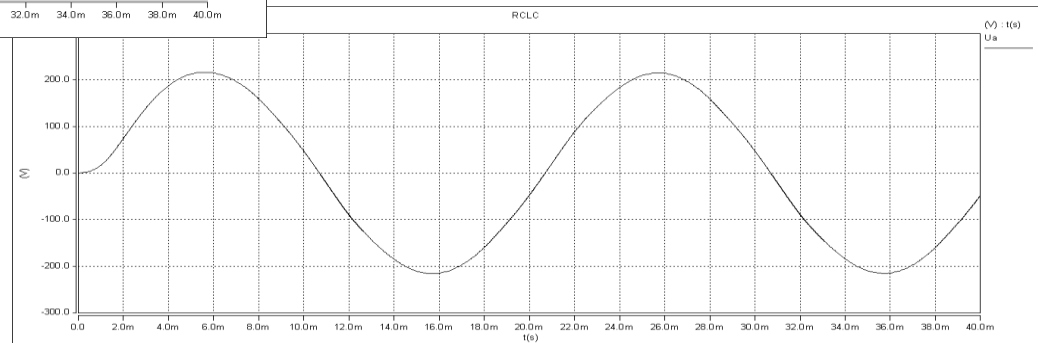
## 无源滤波器仿真波形对比

改进型RLC电路输出  
差模电压



CLCR电路输出差模电  
压

RCLC电路输出差模电压

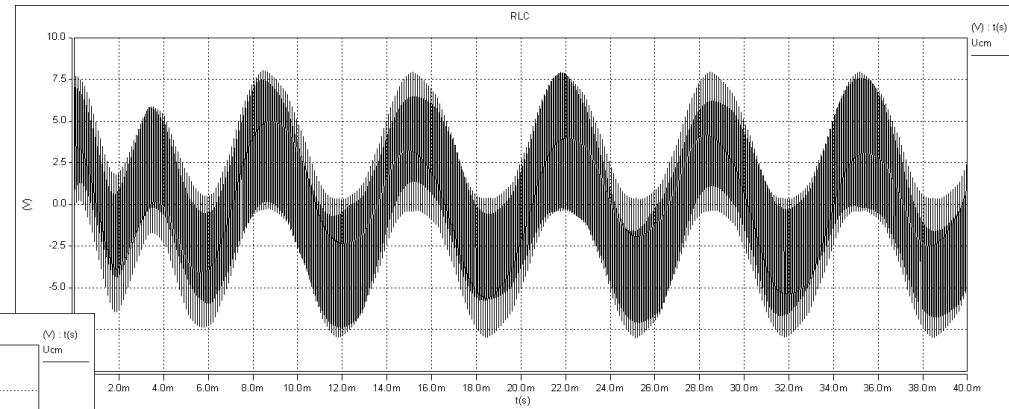


可以看出，改进型RLC电路输出的差模电压纹波较大，RCLC电路输出差模电压效果最好。相比之下CLCR型滤波器输出的差模电压纹波相比于改进型RLC滤波器输出电压较低，其效果处于二者之间。

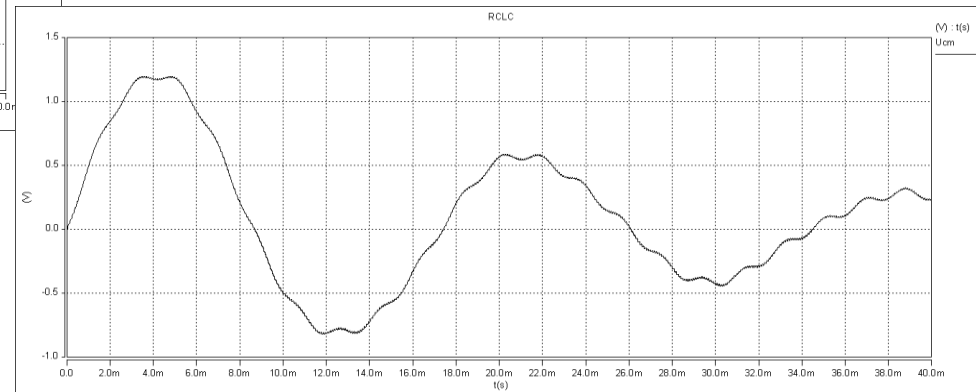


## 无源滤波器仿真波形对比

改进型RLC电路输出  
共模电压



CLCR电路输出共模电压



RCLC电路输出共模电压



虽然改进型RLC滤波器输出滤波电容的中性点直接接于逆变器直流电压母线中点处，对共模电压幅值有一定的抑制作用，但输出端共模电压的高频 $dv/dt$ 仍然达到了几百kV/s。对于CLCR型滤波器，输出端的共模电压相比于RLC型滤波器电路有所降低，并且共模电压高频 $dv/dt$ 分量也降低到了几十kV/s左右，而RCLC型滤波器输出的共模电压 $dv/dt$ 只有几百v/s，有着显著的滤波效果。





# 内容提要

---

01

背景介绍

02

PWM逆变器输出端差共模电压的谐波分析

03

差共模无源滤波器的电路拓扑研究

04

差共模无源滤波器中共模变压器的设计及实验结果

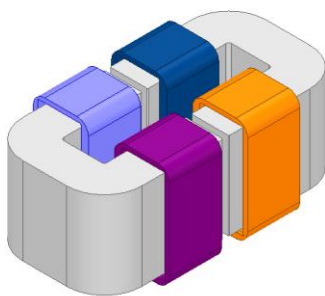
05

结论



## 共模变压器绕组的设计

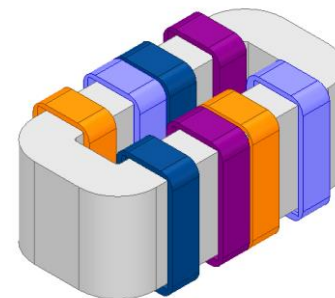
由于共模变压器对各个绕组之间的互感有着较高的要求，所以为了保证变压器绕组互感能够近似相等，应该使变压器绕组产生的漏感能够均匀地分布在磁芯周围。



普通绕线方式

	绕组1	绕组2	绕组3	绕组4
绕组1	1	0.66596	0.60043	0.72534
绕组2	0.66596	1	0.72532	0.60038
绕组3	0.60043	0.72532	1	0.66599
绕组4	0.72534	0.60038	0.66599	1

集中绕制产生的漏感较大，但相互之间的耦合系数差别过大。



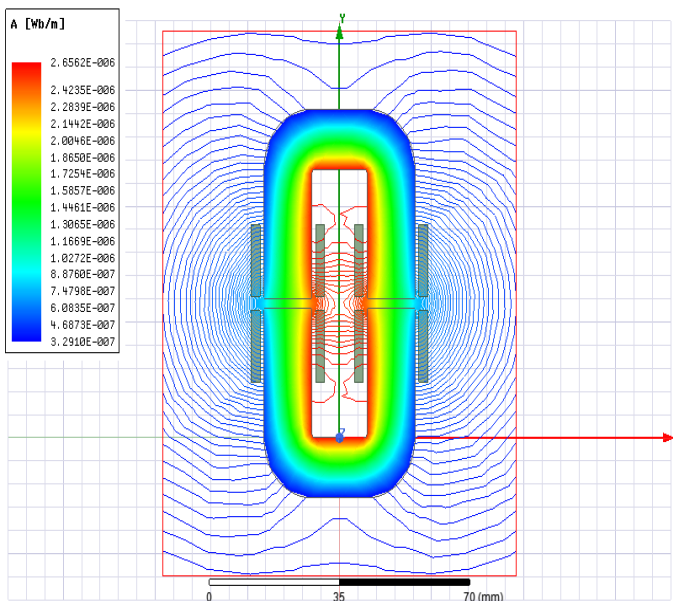
改进后的绕线方式

	绕组1	绕组2	绕组3	绕组4
绕组1	1	0.79424	0.81715	0.8205
绕组2	0.79424	1	0.82037	0.8173
绕组3	0.81715	0.82037	1	0.79441
绕组4	0.8205	0.8173	0.79441	1

改进绕线方式之后，绕组产生的耦合系数比较均匀。

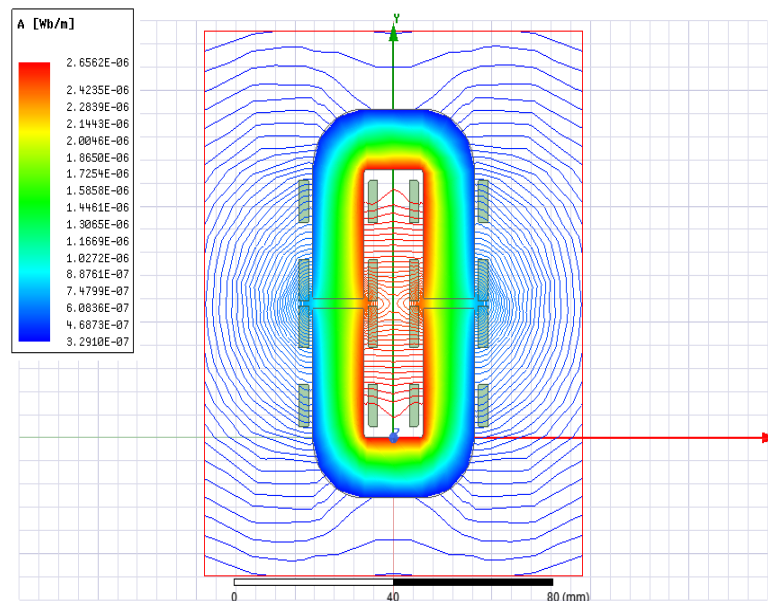


## ANSYS仿真分析



普通绕线方式磁芯产生磁力线分布

VS

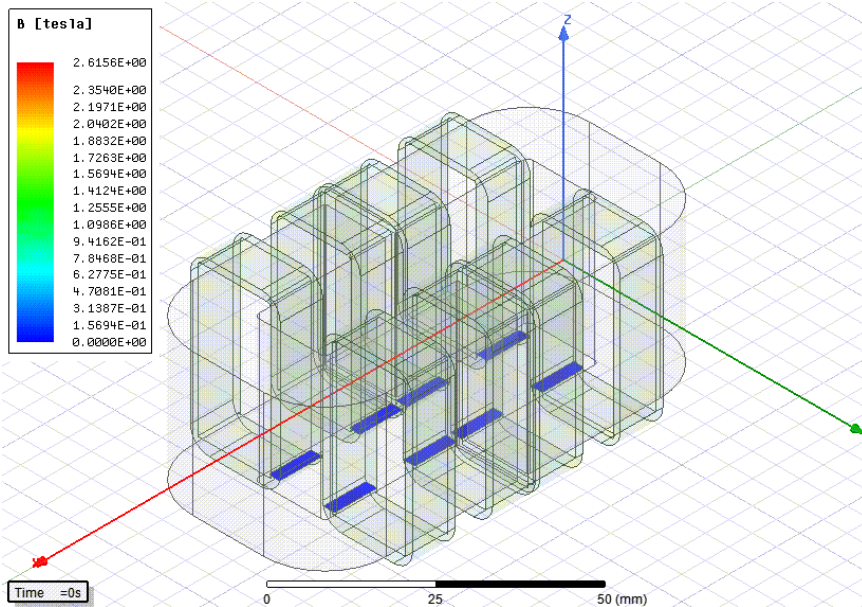


改进后的绕线方式磁芯产生磁力线分布

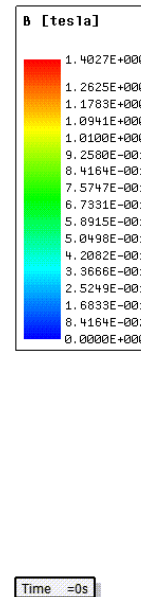
普通绕线方式下磁芯产生的磁力线**比较分散**，绕组之间的磁力线并不均匀。

改进绕线方式之后磁芯产生磁力线**分布均匀**，各绕组之间的磁力线十分均匀。

## ANSYS仿真分析



通入三相交流电共模变压器磁通密度图



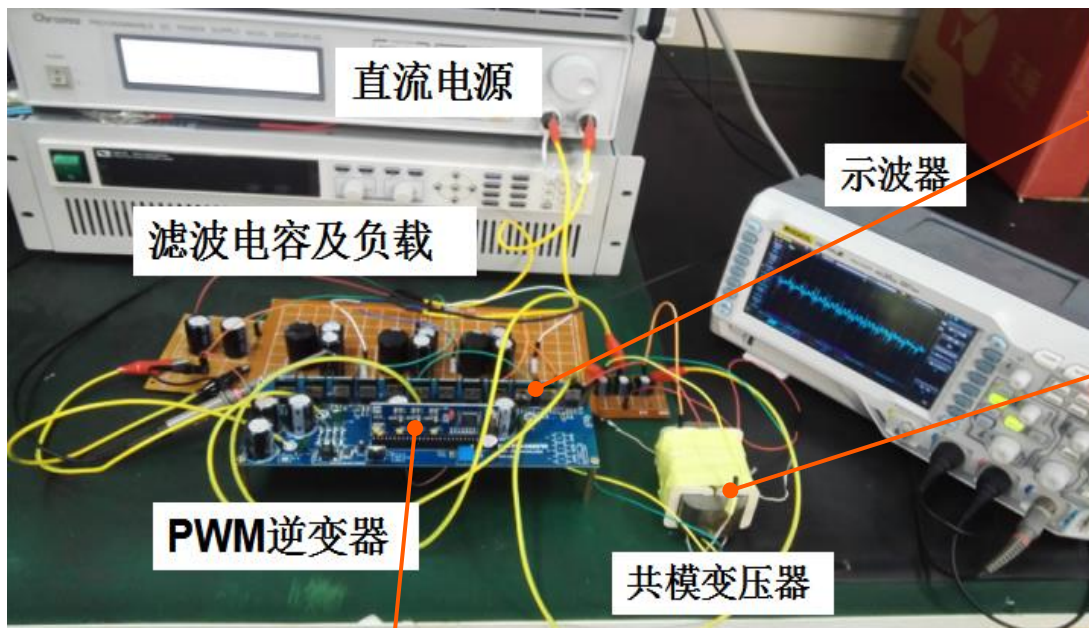
通入三相交流电共模变压器磁通密度矢量图

## 分析

在向共模变压器通入三相交流电的时候，由于**三相差模电流分量的和在任意时刻都近似为零**，所以它们在磁芯内所产生的**磁通相互抵消**，可以看到三相差模电流在磁芯内部产生的**磁通呈相互抵消**状态。此时，对于差模量来说，铁芯内部的磁通量很小，相当于只有**变压器漏感磁通**对差模电流提供一个**高阻抗的滤波电感**。



## 逆变系统实验平台搭建



PWM三相驱动电路

共模变压器磁芯为AMCC32的铁基非晶CC型磁芯

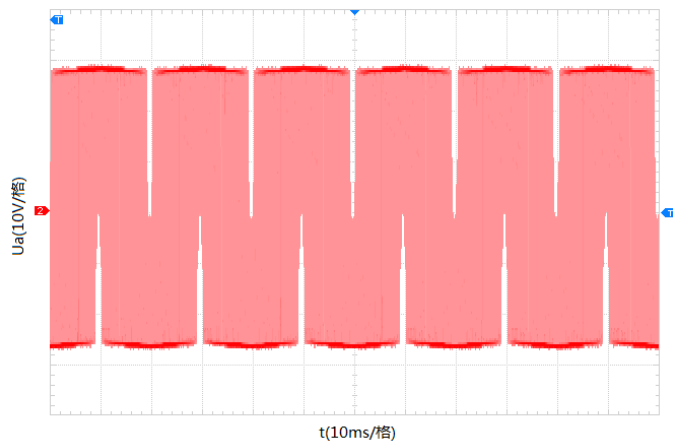
PWM逆变器的控制芯片选用EG8030

## 实验条件

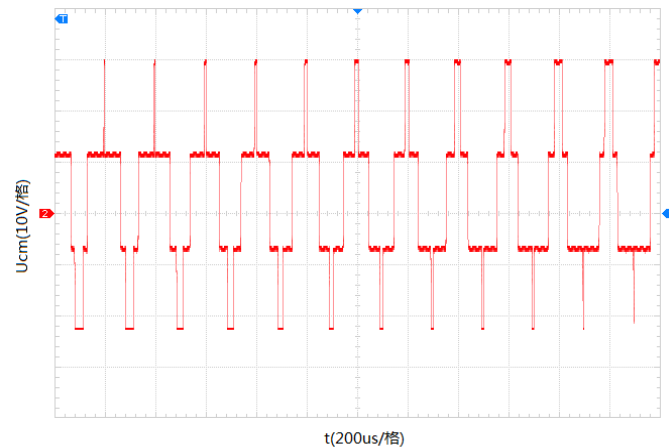
1. 开关频率为10kHz ;
2. 输入直流电压为55V



## 实验结果分析



加入滤波器之前的差模电压



加入滤波器之前的共模电压

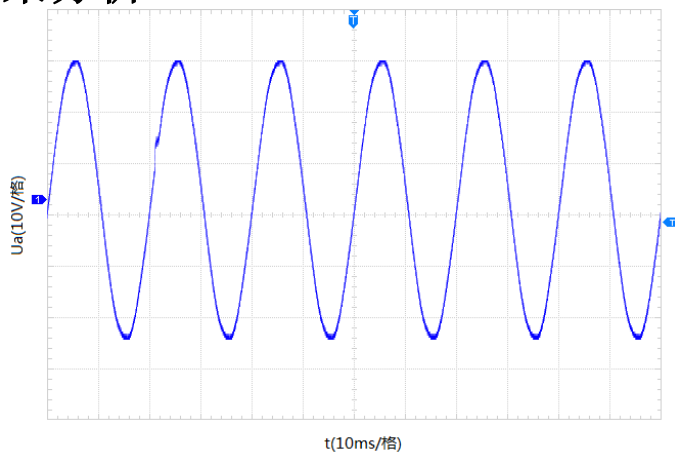
分析

上图分别为未加入滤波器时候的PWM逆变器输出的差模电压波形和共模电压波形，可以看到逆变器输出电压中存在着**幅值很高的共模电压分量**。

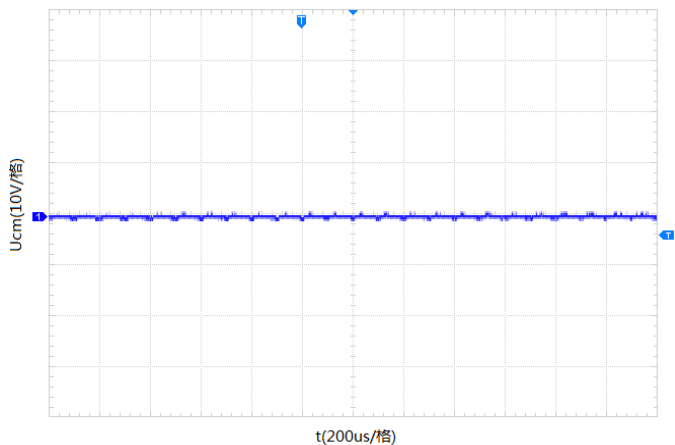




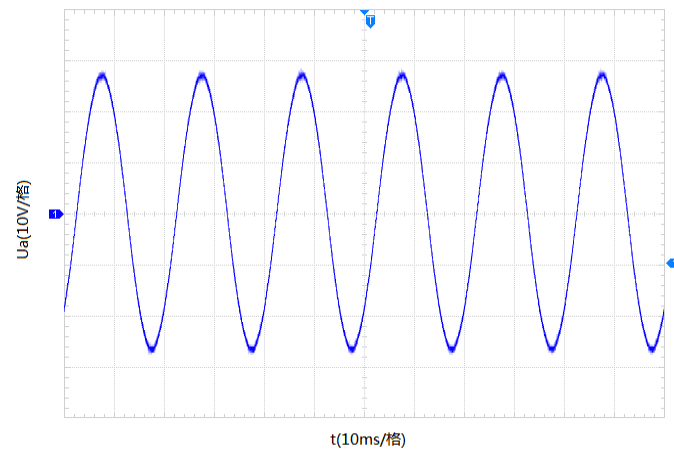
## 实验结果分析



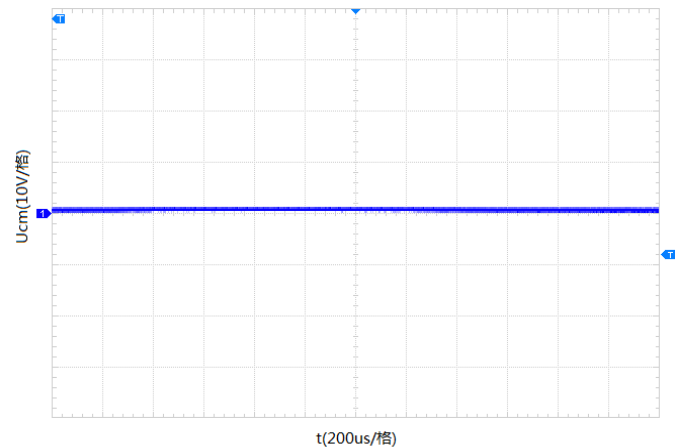
加入改进型RLC滤波器之后的差模电压



加入改进型RLC滤波器之后的共模电压



加入RCLC滤波器之后的差模电压



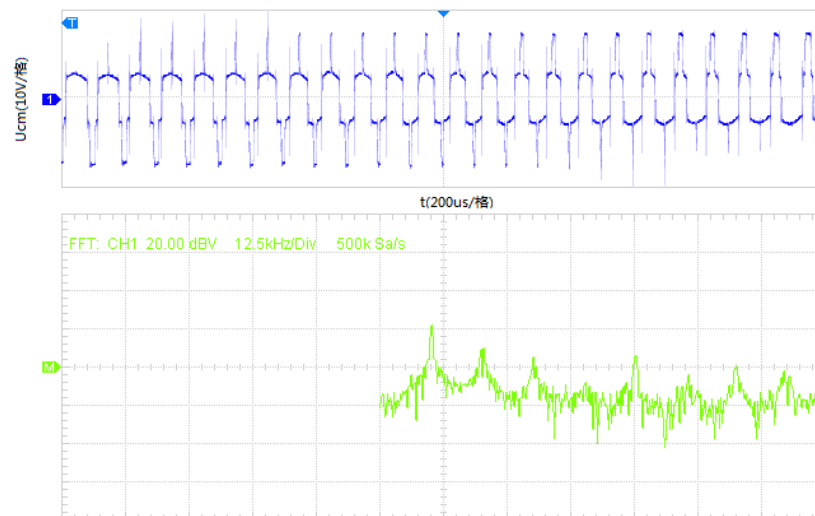
加入RCLC滤波器之后的共模电压



## 实验结果分析



加入滤波器之前的差模电压FFT



加入滤波器之前的共模电压FFT

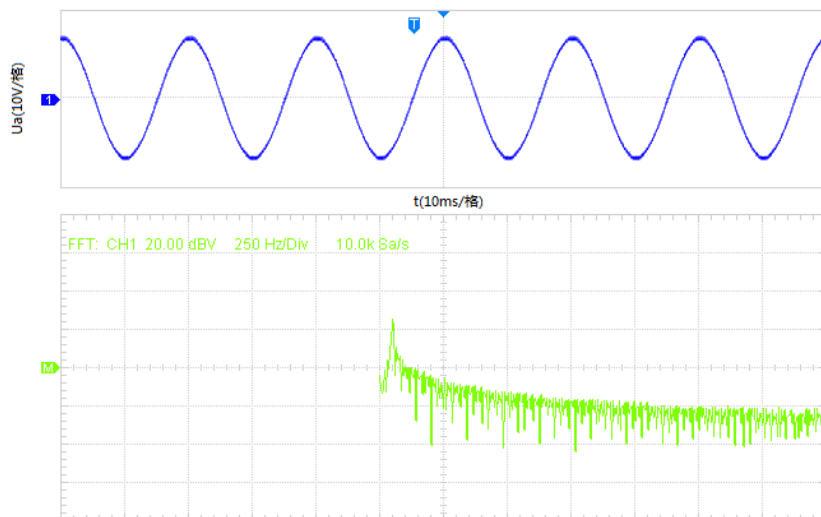
## 分析

从示波器中显示的**FFT矩形窗函数**可以看出，差模电压除在50Hz处以外，还存在着50Hz三倍频的谐波分量，这个三倍频分量主要是由直流母线中点电压对地产生的；而共模电压在**开关频率及其整数倍处存在电压谐波分量**。

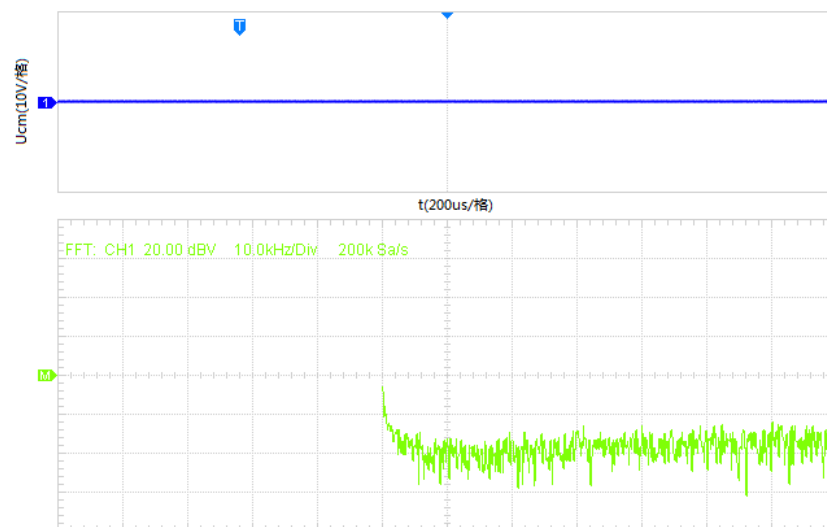




## 实验结果分析



加入RCLC滤波器之后的差模电压FFT



加入RCLC滤波器之后的共模电压FFT

## 分析

从示波器中显示的**FFT矩形窗函数**可以看出，差模电压除在50Hz处以外，其它的频率的谐波电压分量都得到了有效衰减；而共模电压在**开关频率处的电压分量亦被有效抑制**，可见该差共模无源滤波器对PWM逆变器输出的**差模及共模电压都有着良好的抑制作用**。



# 内容提要

---

01

背景介绍

02

PWM逆变器输出端差共模电压的谐波分析

03

差共模无源滤波器的电路拓扑研究

04

差共模无源滤波器中共模变压器的设计及实验结果

05

结论



## 总结

01



介绍了PWM逆变器输出端滤波器的国内外发展现状，并对PWM逆变器输出的电压谐波进行了分析；

02



提出了新型的差共模无源滤波器拓扑结构，并对滤波器电路可能出现的谐振失稳情况进行了详细研究；

03



提出了一种新的绕线方式，通过ANSYS有限元仿真软件对两种绕线方式进行了对比，验证了新绕线方式的有效性；

04



搭建了一个实验样机，通过实验样机对滤波器的设计进行了初步的验证，并在样机上得到了较为理想的实验结果。



---

*Thanks !*

