

基于共模变压器PWM逆变器端 无源滤波器的研究

杨玉岗, 吴晗, 孙鹤鸣

辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105

摘要: 由于PWM逆变器输出电压中含有较多的高频分量, 所以逆变器输出端必须加入低通滤波器来减小谐波含量。本文借鉴在PWM逆变器与电机之间插入共模变压器来消除逆变器输出端共模电压的方法, 通过分析共模变压器带有漏感时的等效电路, 提出了一种新型的RCLC型逆变器端无源滤波器。利用共模变压器所产生的漏感代替差模电感来抑制差模电压 dv/dt , 同时该滤波器对共模电压也有着很好的抑制作用。与传统的滤波器相比, 该滤波器可通过一个共模变压器同时对共模及差模电压 dv/dt 起到抑制作用, 减少了滤波器的体积规模。最后通过理论的推导和仿真实验来验证了该滤波器的有效性。

关键词: 共模电压, 差模电压, PWM逆变器, 共模变压器

Research on passive filter based on common-mode transformer PWM inverter

YANG Yugang, WU Han, SUN Heming

Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105

1 引言

现代工业中 PWM 功率变换器已经成为不可少的器件, 但随着电力电子器件开关频率和输出功率的不断提高, 逆变器输出的电压中含有大量的高频谐波成分, 其所带来电磁干扰等负面效应也日趋严重, 这不但缩短了仪器的使用寿命, 而且严重威胁了周边其他电气设备的安全稳定运行。除此以外, 逆变器输出的高频共模电压还会通过寄生电容产生高频对地漏电流, 导致产生电磁干扰 (EMI), 影响系统内其他电气设备的正常工作。为了防止逆变器所产生高频共模电压造成危害, 许多逆变器的输出端都会连接滤波器来消除高频共模电压所带来的负面影响。因此, 针对 PWM 逆变器所设计的滤波器也在不断的改进中^[1-6]。

除了常见用于消除差模高频电压分量的 LC 滤波器和二阶 RLC 低通滤波器除外, 对于共模高频电压滤波器结构也在不断的进行改进。由学者 A.Von J. 等人首次提出共模变压器的概念, 它是在共模扼流圈的基础上, 又增加了一个连接阻尼电阻的绕组, 该滤波器可以有效的抑制共模

电流的振荡, 并以此来消耗振荡的能量, 从而减小 EMI, 但对于高频电压的抑制作用却不明显^[7]。

文献 [8] 在利用共模变压器的基础上提出了一种类似于有源滤波器的 LCL 型滤波电路结构, 它采用的是利用共模变压器的第四绕组将系统中点检测出的共模电压反向叠加到逆变器输出端, 从而使逆变器所产生的共模电压相互抵消, 但由于第四绕组串联电阻的存在, 使得共模变压器所复制的电压并不精确, 从而并不能完整的消除共模电压。

文献 [9] 在文献 [7] 之后考虑到共模变压器第四绕组漏感的影响并对其进行了详细的分析, 但并没有分析其他三相绕组的漏感, 而且同样滤波电路对共模高频电压的抑制效果并不明显。本文在文献 [9] 和文献 [10] 的基础上, 分析了带有漏感时共模变压器的工作状态, 利用共模变压器提出了一种新型 PWM 逆变器输出端无源滤波器来消除差模及共模高频谐波电压, 从理论上分析了这种结构滤波器的工作原理, 最后通过仿真和实验证明了这种方案的有效性。

2 PWM 逆变器产生共模电压分析

依据单相系统和直流系统的定义，将 PWM 逆变器输出端中点对参考地的电位定义为系统共模电^[11]。所以共模电压的定义公式为

$$V_{cm} = (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) / 3 \quad (1)$$

式中 V_{ao} , V_{bo} , V_{co} 为逆变器输出端对地相电压； V_{cm} 为共模电压。当三相对称负载连接三相对称电源时， $(V_{ao} + V_{bo} + V_{co})$ 为零，所以负载端的中心点将不会存在共模电压分量；当三相对称负载连接三相两电平逆变器时，由于逆变器在任意时刻都会产生三个开关动作，组成 8 种开关状态，使逆变器的输出电压 $(V_{ao} + V_{bo} + V_{co})$ 的和不为零，分别为 $\pm U_{dc}/2$ （上三个开关或下三个开关同时导通时）或 $\pm U_{dc}/6$ （两个上开关一下开关或两下开关一上开关同时导通时）（ U_{dc} 为逆变器直流母线电压）。

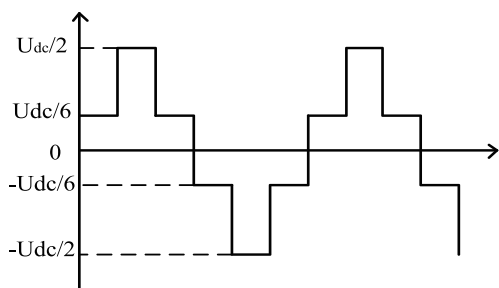


图 1 三相逆变器输出的共模电压波形

Fig.1 The common mode voltage waveform output by the three-phase inverter

可见由于共模电压存在较高的 dv/dt ，在电压发生跃变的瞬间，若负载内部存在寄生电容则将会产生较大的对地漏电流，从而产生传导电磁干扰（EMI），进而影响系统内其他电气设备的正常工作^[11]。

2.1 无源滤波器的拓扑结构

该无源滤波器电路拓扑结构如图 2 所示，设 L_m 和 R_m 为三相对称感性负载。该滤波器功能如下：利用电路中的输入电阻 R_1 做为阻尼电阻来增强系统稳定性，抑制系统谐振；电容 C_1 网络构成一个星型网络系统，利用电容 C_1 网络的中点来检测系统的共模电压，并将检测出的共模电压传递到共模变压器的原边绕组，通过共模变压器耦合与电容 C_2 构成共模低通滤波电路来消除共模电压。同时，由共模变压器漏感 L_s 与滤波电容 C_2 和阻尼电阻

R_1 构成 RLC 滤波电路滤除差模的高频谐波分量。利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分量，又可以减少滤波器使用磁芯个数。为了达到较好的滤波效果，共模变压器的漏感应由差模滤波电路来决定，电容 C_2 的数值选取也以差模滤波电路为主。

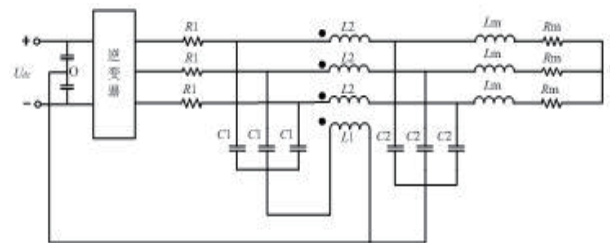


图 2 RCLC 型无源滤波器

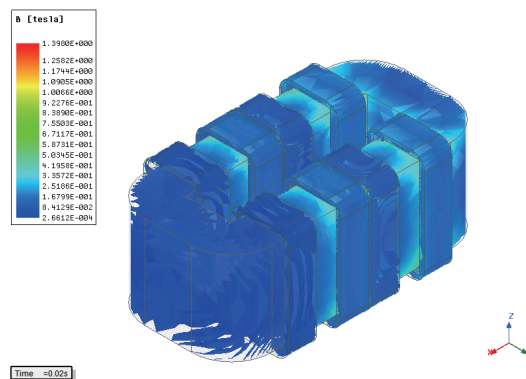
Fig.2 RCLC passive filter

3 滤波器作用分析

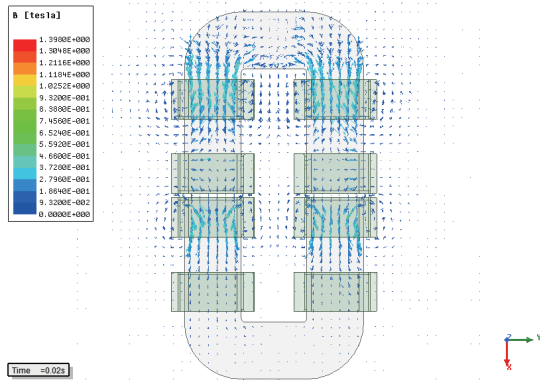
3.1 共模变压器分析

利用 ANSYS 仿真软件对共模变压器磁芯进行 Maxwell 瞬态场分析，来观察不同状态下变压器内部的磁通分布；如图 3 所示，在向共模变压器磁芯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，所以三相差模电流在磁芯内部产生的磁通呈相互抵消状态，对共模电压高频分量不产生影响。此时，对于差模量来说，磁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。

如图 4 所示，当变压器磁芯绕组中只通过共模电流时，可以见到共模电流产生磁通均匀的分布在铁芯内部，对于共模高频分量形成了一个等效的共模电感，使得对共模高频分量抑制作用更加明显。



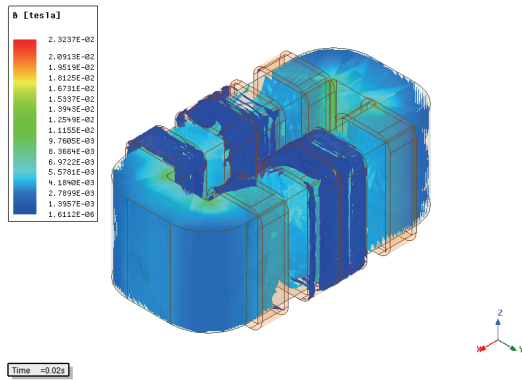
(a) 通入三相交流电共模变压器磁通密度图



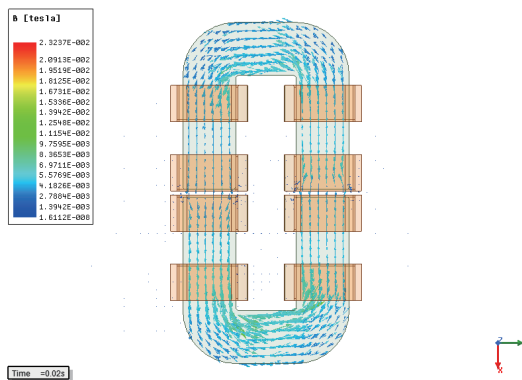
(b) 通入三相交流电共模变压器磁通密度矢量图

图 3 通入三相交流电时变压器的磁密云图

Fig. 3 Magnetic density cloud diagram of transformer with three-phase AC current



(a) 通入共模电流时共模变压器磁通密度图



(b) 通入共模电流时共模变压器磁通密度矢量图

图 4 通入共模电流时变压器的磁密云图

Fig. 4 Magnetic cloud graph of transformer with common

3.2 无源滤波器的拓扑结构

由图 3 可以看出,对于无源滤波器差模等效电路来说,无论何时三相电路的电流和都等于零,所以逆变器三相电流在共模变压器磁芯内部产生的磁通相叠加也为零,因此 PWM 逆变器输出的差模分量在共模变压器上感应的电压为零,因此在进行差模回路分析时,共模变压器的耦合作用可以忽略不计。得出 RCLC 型无源滤波器差模单相等效电路如图 5 所示。

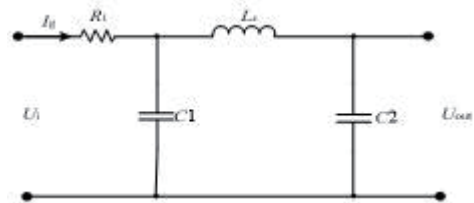


图 5 RCLC 型无源滤波器差模单相等效电路

Fig.5 RCLC type passive filter differential single-phase equivalent circuit

根据电路原理可求得输出差模电压的传递函数为

$$H(s) = \frac{L_s C_1 s^2 + 1}{C_1 L_s^2 C_2 s^4 + 2R_1 C_1 L_s C_2 s^3 + L_s (C_1 + C_2) s^2 + R_1 (C_1 + C_2) s + 1} \quad (2)$$

为了便于分析,忽略低频时电容 C_1 对差模电路的影响。当 C_1 取值为 $2\mu\text{F}$ 的时候,根据 Bode 图可以看出忽略电容 C_1 与考虑电容 C_1 其传递函数衰减特性基本相一致,此时差模电路有着良好的低通特性,可以消除高频差模的电压谐波分量。

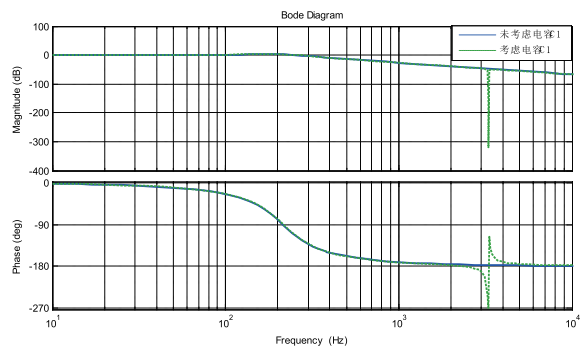


图 6 考虑电容 C_1 后差模传递函数 Bode 图对比

Fig.6 Comparison of Bode diagrams of difference Mode transfer function considering Capacitance C_1

3.3 RCLC 型滤波器共模等效电路及其特性分析

RCLC 型无源滤波器的共模电压检测网络包括如下部

分, 由电容 $C1$ 网络检测共模电压传递到变压器原边绕组, 共模变压器与电容 $C2$ 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。由此便得 RCLC 型差共模滤波器的共模等效电路如图 7 所示, $3i_1$ 为流入共模变压器原边的共模电流, i_2 为流入共模变压器副边的共模电流。

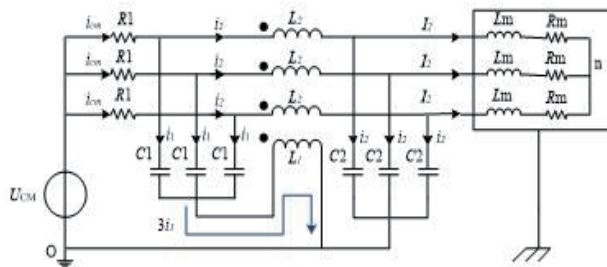


图 7 滤波器的共模等效电路

Fig.7 Common mode equivalent circuit of filter

如图 8 所示, 将共模变压器等效为耦合电感形式。设 N 为变压器绕组匝数, 假设变压器四相绕组对称, 且匝数比相等, $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = N$, 所以 $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L$, M 为各绕组之间的互感, 由于变压器磁件结构对称, $M_{12} = M_{13} = M_{14} = M_{21} = M_{23} = M_{24} = M_{31} = M_{32} = M_{34} = M_{41} = M_{42} = M_{43}$; 下面对 RCLC 型差共模滤波器共模单相等效电路进行推导与分析。

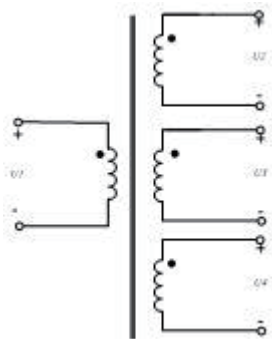


图 8 共模变压器等效分析

Fig.8 Equivalent Analysis of Common Mode Transformer

根据电磁感应定律, 可以推导出变压器原副边的电压方程如下:

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

由于系统共模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。

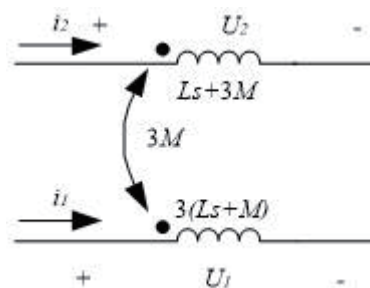


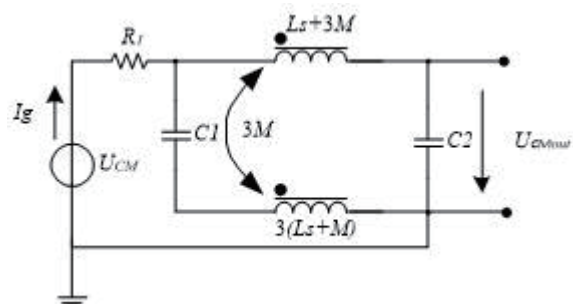
图 9 共模变压器单相等效电路

Fig.9 Single phase equivalent circuit of common mode transformer

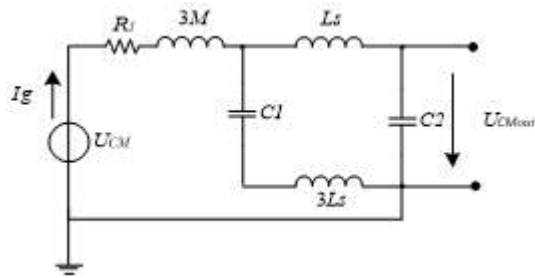
在复频域中, 可得零初始条件下共模变压器的特征方程为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3(L_s + M) & 3M \\ 3M & L_s + 3M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

RCLC 型无源滤波器共模单相等效电路可以用下图表示:



(a) 存在互感耦合的等效电路



(b) 消去互感耦合的等效电路

图 10 RCLC 无源滤波器的共模单相等效电路

Fig.10 Common-mode single-phase equivalent circuit of RCLC passive filter

由解耦后等效电路求出 RCLC 滤波器共模单相等效电路的传递函数如下：

$$H(s) = \frac{3L_s C_1^2 + 1}{3(L_s + 4L_s M)C_1 C_2^2 + 4R_s L_s C_1 C_2^2 + [3(L_s + M)C_1 + (L_s + 3M)C_2]^2 + R_s(C_1 + C_2)^2 + 1} \quad (5)$$

绘制出输出共模电压的传递函数的 Bode 图如图 11 所示

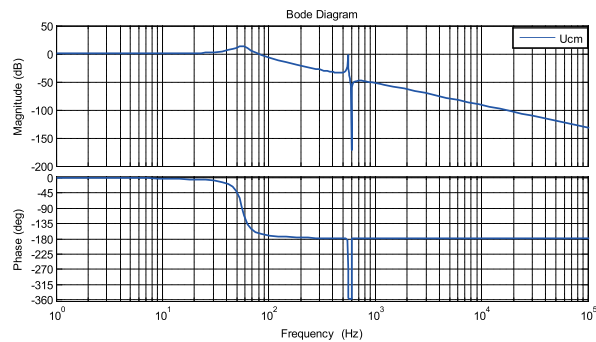


图 11 输出共模电压传递函数的 Bode 图

Fig.11 Bode diagram of output common-mode voltage transfer function

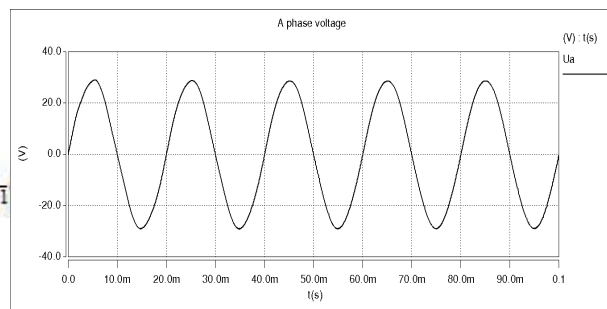
可以看出，共模回路也具有良好低通特性，所以 RCLC 滤波器对共模电压的也有着很好衰减作用。

此外，变压器的耦合系数为 $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M}{L_s + M}$ ，所以变压器互感 $M = \frac{k}{1-k} L_s$ ，这样可以将耦合系数与共模电路输

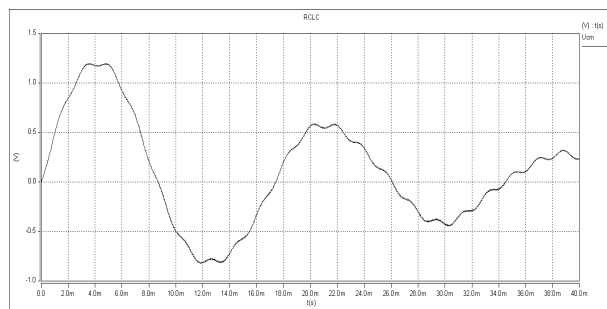
出电压的传递函数建立起了直接的联系，即可以通过改变共模变压器的耦合系数来改变无源滤波器对共模电压滤波效果。

4 仿真

使用 Saber 软件进行仿真，设置直流母线电压为 55V；PWM-IGBT 逆变器的开关频率为 10kHz；电容 C1-C3 网络取 2μF，电容 C4-C6 网络取 470μF，变压器自感为 530μH，线圈匝数为 50 匝，变压器的耦合系数为 0.8。仿真结果如图 12 所示。



(a) 加入滤波器之后的差模电压



(b) 加入滤波器之后的共模电压

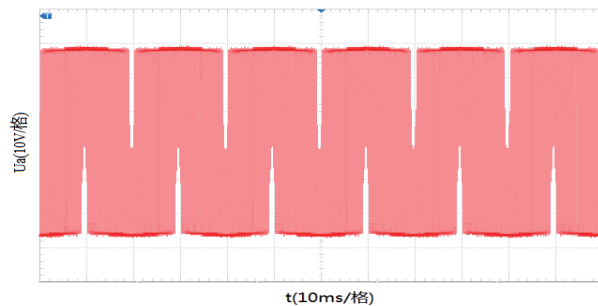
图 12 电压仿真波形

Fig.12 Voltage simulation waveform

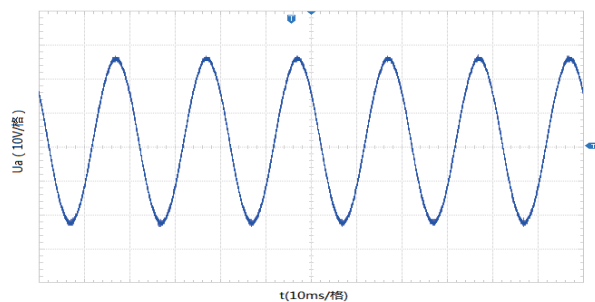
由仿真结果可见，该滤波器不仅对差模谐波电压有着良好的抑制作用，而且共模谐波电压的 dv/dt 高频分量也被有效的抑制。

5 实验验证

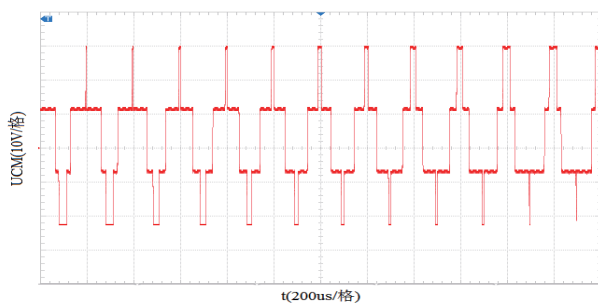
为了进一步的验证理论分析和共模等效电路模型的正确性,搭建了以EG8030为核心控制器的实验平台,EG8030是一款数字化的、功能完善的自带死区控制的三相纯正弦波逆变发生器芯片。选择AMCC32铁基非晶体作为共模变压器的磁芯,实验条件与仿真设置相一致,选用100Ω电阻为对称三相负载,三相逆变器的主电路图如图2所示,得出的实验结果如下。



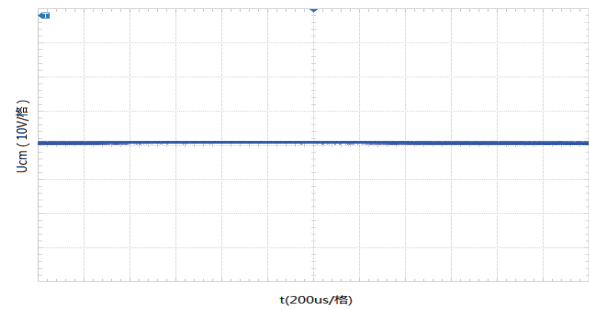
(a) 加入滤波器之前的差模电压



(b) 加入滤波器之后的差模电压



(c) 加入滤波器之前的共模电压



(d) 加入滤波器之后的共模电压

图13 实验测量波形

Fig.13 Experimental waveform

通过实验波形可以看出,实验结果与仿真结果基本一致,差模和共模高频谐波电压都被明显地滤除。

6 结论

本文通过讨论共模变压器存在漏感时的变压器等效电路,设计出一种新型的RCLC型无源滤波器,利用变压器漏感来同时滤除差模和共模谐波电压分量,与传统源滤波器相比不仅能够达到很好的滤波效果而且还能够减少无源滤波器的磁芯使用个数,最后通过仿真和实验验证了共模等效电路模型的正确性和该滤波器设计的有效性。

参考文献

- [1] 白保东, 刘威峰, 王禹等. PWM驱动感应电机轴电压轴承电流[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 434-440.
- [2] 胡存刚, 胡军, 陈权等. 基于特定谐波消除PWM的三电平有源中点钳位逆变器共模电压抑制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 93-102.
- [3] Chenggang Mei, J C Balda, W P Waite and K Carr. Active Cancellation of Common-Mode Voltages on Drives Rated 460-V and Higher[J]. Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International, 2003, 3(2). 1845-1851
- [4] 姜保军. 电机驱动系统电机端共模电压的研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(2): 94-96.