



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110492764 A

(43)申请公布日 2019. 11. 22

(21)申请号 201910795301.0

(22)申请日 2019.08.27

(71)申请人 中国科学院电工研究所  
地址 100190 北京市海淀区中关村北二条6号

(72)发明人 李子欣 赵聪 徐飞 高范强  
王平 李耀华

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责  
任公司 11251  
代理人 关玲

(51)Int.Cl.  
H02M 7/217(2006.01)

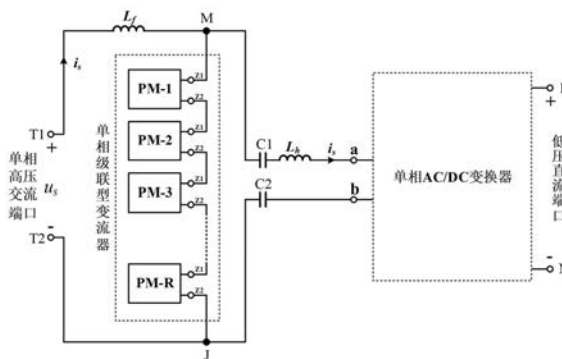
权利要求书1页 说明书4页 附图2页

(54)发明名称

电容隔离型单相交直流电力电子变压器

(57)摘要

一种电容隔离型单相交直流电力电子变压器,由单相级联型变流器、滤波电感 $L_f$ 、无极性高压隔离电容 $C_1$ 、无极性高压隔离电容 $C_2$ 、高频电感 $L_h$ 和单相AC/DC变换器组成。单相级联型变流器交流的输出电压 $u_{MN\_ref}$ 由两部分组成: $u_{MN\_ref} = u_{closeloop} + u_{square\_HF}$ 。其中, $u_{closeloop}$ 为单相级联型变流器的双闭环控制输出电压, $u_{square\_HF}$ 为占空比50%的方波,频率为 $f_{square\_HF}$ 。单相级联型变流器双闭环控制方法为:外环为单相级联型变流器内所有功率模块电容电压之和的控制环,内环为流过单相高压交流端口的交流电流控制环。单相AC/DC变换器交流端电压为50%占空比的方波,且该方波电压的频率为 $f_{square\_HF}$ ,相位与 $u_{square\_HF}$ 相同。



1. 一种电容隔离型单相交直流电力电子变压器,其特征在于:所述的电容隔离型单相交直流电力电子变压器由单相级联型变流器、滤波电感 $L_f$ 、无极性高压隔离电容 $C_1$ 、无极性高压隔离电容 $C_2$ 、高频电感 $L_h$ 和单相AC/DC变换器组成;所述的单相级联型变流器由 $R$ 个功率模块PM-1、PM-2、……、PM- $R$ 级联连接构成, $R$ 为正整数;所述的每个功率模块均含 $Z_1$ 和 $Z_2$ 两个连接端子;所述单相级联型变流器中的第 $k$ 功率模块PM- $k$ 的连接端子 $Z_2$ 连接到第 $k+1$ 功率模块PM- $(k+1)$ 连接端子 $Z_1$ , $1 \leq k \leq R-1$ ;所述单相级联型变流器中的第1功率模块PM-1的连接端子 $Z_1$ 连接到M点;所述单相级联型变流器中的第 $R$ 功率模块PM- $R$ 的连接端子 $Z_2$ 连接到J点;所述滤波电感 $L_f$ 的一端连接到M点,所述滤波电感 $L_f$ 的另外一端连接到所述单相高压交流端口连接端子T1,所述单相高压交流端口连接端子T2与J点连接在一起;所述无极性高压隔离电容 $C_1$ 的一端连接到M点,所述无极性高压隔离电容 $C_1$ 的另外一端连接到所述高频电感 $L_h$ 的一端,所述高频电感 $L_h$ 的另外一端连接到单相AC/DC变换器的交流连接端子a;所述无极性高压隔离电容 $C_2$ 的一端连接J点,所述无极性高压隔离电容 $C_2$ 的另外一端连接到单相AC/DC变换器的交流连接端子b;所述单相AC/DC变换器的直流侧正极连接端子P和直流侧负极连接端子N作为所述电容隔离型单相交直流电力电子变压器低压直流端口的两个连接端子。

2. 如权利要求1所述的电容隔离型单相交直流电力电子变压器,其特征在于:所述的电容隔离型单相交直流电力电子变压器的高压侧和低压侧电路通过无极性高压隔离电容 $C_1$ 和 $C_2$ 实现电气隔离,所述单相AC/DC变换器的直流侧输出电压与所述单相级联型变流器中每个功率模块直流侧电容电压相等。

3. 如权利要求1所述的电容隔离型单相交直流电力电子变压器,其特征在于:所述的单相级联型变流器的交流输出电压参考值 $U_{MN\_ref}$ 由两部分组成:

$$U_{MN\_ref} = U_{cloop} + U_{square\_HF}$$

其中, $U_{cloop}$ 为单相级联型变流器的双闭环控制输出电压, $U_{square\_HF}$ 为占空比50%的高频方波成分,频率为 $f_{square\_HF}$ ,且 $f_{square\_HF}$ 由所述无极性高压隔离电容 $C_1$ 、无极性高压隔离电容 $C_2$ 、高频电感 $L_h$ 根据下式确定:

$$f_{square\_HF} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 \times C_2 \times L_h / (C_1 + C_2)}}。$$

4. 如权利要求1所述的电容隔离型单相交直流电力电子变压器,其特征在于:所述的单相级联型变流器的双闭环控制方法,外环为单相级联型变流器内所有功率模块电容电压之和的控制环,内环为流过单相高压交流端口的交流电流控制环;内环电流的参考值幅值为电压外环的输出,内环电流参考值的相位为所述单相高压交流端口电压 $u_s$ 的相位。

5. 如权利要求1所述的电容隔离型单相交直流电力电子变压器,其特征在于:所述的单相AC/DC变换器交流端子a和交流端子b之间的电压 $u_{ab}$ 为50%占空比的方波,且该方波电压的频率为 $f_{square\_HF}$ 。 $u_{ab}$ 的相位与所述单相级联型变流器的交流输出电压参考值 $U_{MN\_ref}$ 中的高频方波电压 $U_{square\_HF}$ 的相位相同。

## 电容隔离型单相交直流电力电子变压器

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种电力电子变压器,特别涉及一种电容隔离型单相交直流电力电子变压器。

### 背景技术

[0002] 电力电子变压器除去具备传统电力变压器的电气隔离和电压等级变换功能之外,还具备电能质量治理、直流设备接入、潮流灵活调节、故障隔离等多种复合功能,在智能电网、能源互联网、轨道交通机车牵引等领域具有广泛的应用前景。

[0003] 现有的技术下,电力电子变压器一般通过中高频变压器实现高、低压侧电路的电气隔离。但是,这些技术方案存在高压大容量中高频变压器运行效率难以提高、电-磁-热多物理场综合优化设计困难、系统电路拓扑复杂等问题,影响了电力电子变压器效率和功率密度的提高,也导致造价高,难以规模推广应用。发明专利CN201310016540、CN201410135384、CN201510129159、CN201610274288、CN201710079402、CN201711082371、CN201811171060等均是采用中高频变压器实现电气隔离。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的旨在克服现有电力电子变压器普遍采用中高频变压器实现电气隔离,存在电路拓扑复杂、电能变换级数多、效率低,以及半导体开关器件数量多,可靠性差等缺点,提出一种基于电容隔离的单相交直流电力电子变压器。

[0005] 本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器,由单相级联型变流器、滤波电感 $L_f$ 、无极性高压隔离电容 $C_1$ 、无极性高压隔离电容 $C_2$ 、高频电感 $L_h$ 和单相AC/DC变换器组成。所述的单相级联型变流器由 $R$ 个功率模块 $PM-1$ 、 $PM-2$ 、……、 $PM-R$ 级联连接构成, $R$ 为正整数。每个功率模块均含 $Z_1$ 和 $Z_2$ 两个连接端子。所述单相级联型变流器中的第 $k$ 功率模块 $PM-k$ 的连接端子 $Z_2$ 连接到第 $k+1$ 功率模块 $PM-(k+1)$ 的连接端子 $Z_{11}$  $1 \leq k \leq R-1$ ;所述单相级联型变流器中的第1功率模块 $PM-1$ 连接端子 $Z_1$ 连接到 $M$ 点;所述单相级联型变流器中的第 $R$ 功率模块 $PM-R$ 的连接端子 $Z_2$ 连接到 $J$ 点。所述滤波电感 $L_f$ 的一端连接到 $M$ 点,所述滤波电感 $L_f$ 的另外一端连接到所述单相高压交流端口连接端子 $T_1$ ,所述单相高压交流端口连接端子 $T_2$ 与 $J$ 点连接在一起。所述无极性高压隔离电容 $C_1$ 的一端连接到 $M$ 点,所述无极性高压隔离电容 $C_1$ 的另外一端连接到所述高频电感 $L_h$ 的一端,所述高频电感 $L_h$ 的另外一端连接到单相AC/DC变换器的交流连接端子 $a$ 。所述无极性高压隔离电容 $C_2$ 的一端连接 $J$ 点,所述无极性高压隔离电容 $C_2$ 的另外一端连接到单相AC/DC变换器的交流连接端子 $b$ 。所述单相AC/DC变换器的直流侧正极连接端子 $P$ 和直流侧负极连接端子 $N$ 作为所述电容隔离型单相交直流电力电子变压器低压直流端口的两个连接端子。

[0006] 所述的电容隔离型单相交直流电力电子变压器的高压侧和低压侧电路通过无极性高压隔离电容 $C_1$ 和 $C_2$ 实现电气隔离,所述单相AC/DC变换器的直流侧输出电压与所述单相级联型变流器中每个功率模块直流侧电容电压相等。

[0007] 所述的单相级联型变流器的交流输出电压参考值 $u_{MN\_ref}$ 由两部分组成:

$$[0008] \quad u_{MN\_ref} = u_{closeloop} + u_{square\_HF}$$

[0009] 其中, $u_{closeloop}$ 为单相级联型变流器的双闭环控制输出电压, $u_{square\_HF}$ 为占空比50%的高频方波成分,频率为 $f_{square\_HF}$ ,且 $f_{square\_HF}$ 由所述无极性高压隔离电容C1、无极性高压隔离电容C2、高频电感 $L_h$ 根据下式确定:

$$[0010] \quad f_{square\_HF} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C1 \times C2 \times L_h / (C1 + C2)}}$$

[0011] 所述的单相级联型变流器采取双闭环控制方法,外环为单相级联型变流器内所有功率模块电容电压之和的控制环,内环为流过单相高压交流端口的交流电流控制环;内环电流的参考值幅值为电压外环的输出,内环电流参考值的相位为所述单相高压交流端口电压 $u_s$ 的相位。

[0012] 所述的单相AC/DC变换器交流端子a和交流端子b之间的电压 $u_{ab}$ 为50%占空比的方波,且该方波电压的频率为 $f_{square\_HF}$ 。 $u_{ab}$ 的相位与所述单相级联型变流器的交流输出电压参考值 $u_{MN\_ref}$ 中的高频方波电压 $u_{square\_HF}$ 的相位相同。

## 附图说明

[0013] 图1为本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器电路的原理图;

[0014] 图2为本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器中单相级联型变流器内的R(R为正整数)个功率模块PM-1、PM-2、……、PM-R和单相AC/DC变换器的一种具体实现电路原理图;

[0015] 图3为本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器的计算机仿真结果之一:单相高压交流电源的电压 $u_s$ 及电流 $i_s$ 、单相AC/DC变换器的直流负载侧电压 $u_{PN}$ ;

[0016] 图4为本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器的计算机仿真结果之二:单相AC/DC变换器的交流侧电压 $u_{ab}$ 和电流 $i_{ab}$ 。

## 具体实施方式

[0017] 以下结合附图和具体实施方式进一步说明本发明。

[0018] 如图1所示,本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器电路的原理图:本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器由单相级联型变流器、滤波电感 $L_f$ 、无极性高压隔离电容C1、无极性高压隔离电容C2、高频电感 $L_h$ 和单相AC/DC变换器组成。所述的单相级联型变流器由R个功率模块PM-1、PM-2、……、PM-R级联连接构成,R为正整数;每个功率模块均含Z1和Z2两个连接端子。所述单相级联型变流器中的第k功率模块PM-k连接端子Z2连接到第k+1功率模块PM-(k+1)连接端子Z1, $1 \leq k \leq R-1$ ;所述单相级联型变流器中的第1功率模块PM-1的连接端子Z1连接到M点;所述单相级联型变流器中的第R功率模块PM-R的连接端子Z2连接到J点。所述滤波电感 $L_f$ 的一端连接到M点,所述滤波电感 $L_f$ 的另外一端连接到所述单相高压交流端口连接端子T1,所述单相高压交流端口连接端子T2与J点连接在一起。所述无极性高压隔离电容C1的一端连接到M点,所述无极性高压隔离电容C1的另外一端连接到所述高频电感 $L_h$ 的一端,所述高频电感 $L_h$ 的另外一端连接到单相AC/DC变换器的交流连接端子a。

所述无极性高压隔离电容C2的一端连接J点,所述无极性高压隔离电容C2的另外一端连接到单相AC/DC变换器的交流连接端子b。所述单相AC/DC变换器的直流侧正极连接端子P和直流侧负极连接端子N作为所述电容隔离型单相交直流电力电子变压器低压直流端口的两个连接端子。

[0019] 所述的电容隔离型单相交直流电力电子变压器的高压侧和低压侧电路通过无极性高压隔离电容C1和C2实现电气隔离,所述单相AC/DC变换器的直流侧输出电压与所述单相级联型变流器中每个功率模块直流侧电容电压相等。

[0020] 所述的单相级联型变流器的交流输出电压参考值 $u_{MN\_ref}$ 由两部分组成:

[0021]  $u_{MN\_ref} = u_{closeloop} + u_{square\_HF}$

[0022] 其中, $u_{closeloop}$ 为单相级联型变流器的双闭环控制输出电压, $u_{square\_HF}$ 为占空比50%的高频方波成分,频率为 $f_{square\_HF}$ ,且 $f_{square\_HF}$ 由所述无极性高压隔离电容C1、无极性高压隔离电容C2、高频电感 $L_h$ 根据下式确定:

$$[0023] \quad f_{square\_HF} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C1 \times C2 \times L_h / (C1 + C2)}}$$

[0024] 所述的单相级联型变流器的双闭环控制方法,外环为单相级联型变流器内所有功率模块电容电压之和的控制环,内环为流过单相高压交流端口的交流电流控制环;内环电流的参考值幅值为电压外环的输出,内环电流参考值的相位为所述单相高压交流端口电压 $u_s$ 的相位。

[0025] 所述的单相AC/DC变换器交流端子a和交流端子b之间的电压 $u_{ab}$ 为50%占空比的方波,且该方波电压的频率为 $f_{square\_HF}$ 。 $u_{ab}$ 的相位与所述单相级联型变流器的交流输出电压参考值 $u_{MN\_ref}$ 中的高频方波电压 $u_{square\_HF}$ 的相位相同。

[0026] 图2为本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器中单相级联型变流器内的R个功率模块PM-1、PM-2、……、PM-R和单相AC/DC变换器的一种具体实现电路原理图,R为正整数。如图2所示,该电路由半导体开关器件S1、S2、S3、S4、二极管D1、D2、D3、D4和直流电容 $C_{dc}$ 组成。半导体开关器件 $S_k$ 的集电极与二极管 $D_k$ 的阴极连接在一起,半导体开关器件 $S_k$ 的发射极与二极管 $D_k$ 的阳极连接在一起,这里的 $k=1,2,3,4$ 。半导体开关器件S1的发射极与半导体开关器件S2的集电极连接到端子x,半导体开关器件S3的发射极与半导体开关器件S4的集电极连接到端子y。半导体开关器件S1和S3的集电极连接到直流电容 $C_{dc}$ 的正极,半导体开关器件S2和S4的发射极连接到直流电容 $C_{dc}$ 的负极。

[0027] 当该电路作为所述单相级联型变流器功率模块PM-1、PM-2、……、PM-R时,该电路的端子x作为单相级联型变流器每个功率模块的交流端口连接端子Z1,该电路的端子y作为单相级联型变流器每个功率模块的交流端口连接端子Z2。当该电路作为所述单相AC/DC变换器时,该电路的端子x作为单相AC/DC变换器的交流端子a,该电路的端子y作为单相AC/DC变换器的交流端子b,该电路直流电容 $C_{dc}$ 的正极作为单相AC/DC变换器的正极连接端子P,该电路直流电容 $C_{dc}$ 的负极作为单相AC/DC变换器的负极连接端子N。

[0028] 本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器采用以下参数:单相高压交流端口电压 $u_s = 5000 \sin(100\pi t) V$ ,单相级联型变流器所有功率模块以及单相AC/DC变换器的直流电容电压额定值均为1.0kV,单相级联型变流器中级联功率模块数量为10个,滤波电感 $L_f =$

100mH,无极性高压隔离电容 $C_1=C_2=20.26\mu\text{F}$ ,高频电感 $L=100\mu\text{H}$ ,单相级联型变流器中级联功率模块开关频率为10kHz,高频方波电压频率为5kHz,单相AC/DC变换器带 $2\Omega$ 电阻负载,即功率为500kW。在这一条件下的计算机仿真结果见图3和图4,其中图3为单相高压交流电源的电压 $u_s$ 及电流 $i_s$ 、单相AC/DC变换器的直流负载侧电压 $u_{PN}$ ;图4为单相AC/DC变换器的交流侧电压 $u_{ab}$ 和电流 $i_{ab}$ 。由仿真结果可见,本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器高压交流输入侧电流正弦度良好,且与交流电压相位几乎相同,功率因数高;而直流输出侧电压稳定在1.0kV左右,实现了单相高压交流电到低压直流的电压变换,而通过无极性高压隔离电容实现了高压侧和低压侧电路的电气隔离。这一仿真结果也表明了本发明电容隔离型单相交直流电力电子变压器的可行性和正确性。

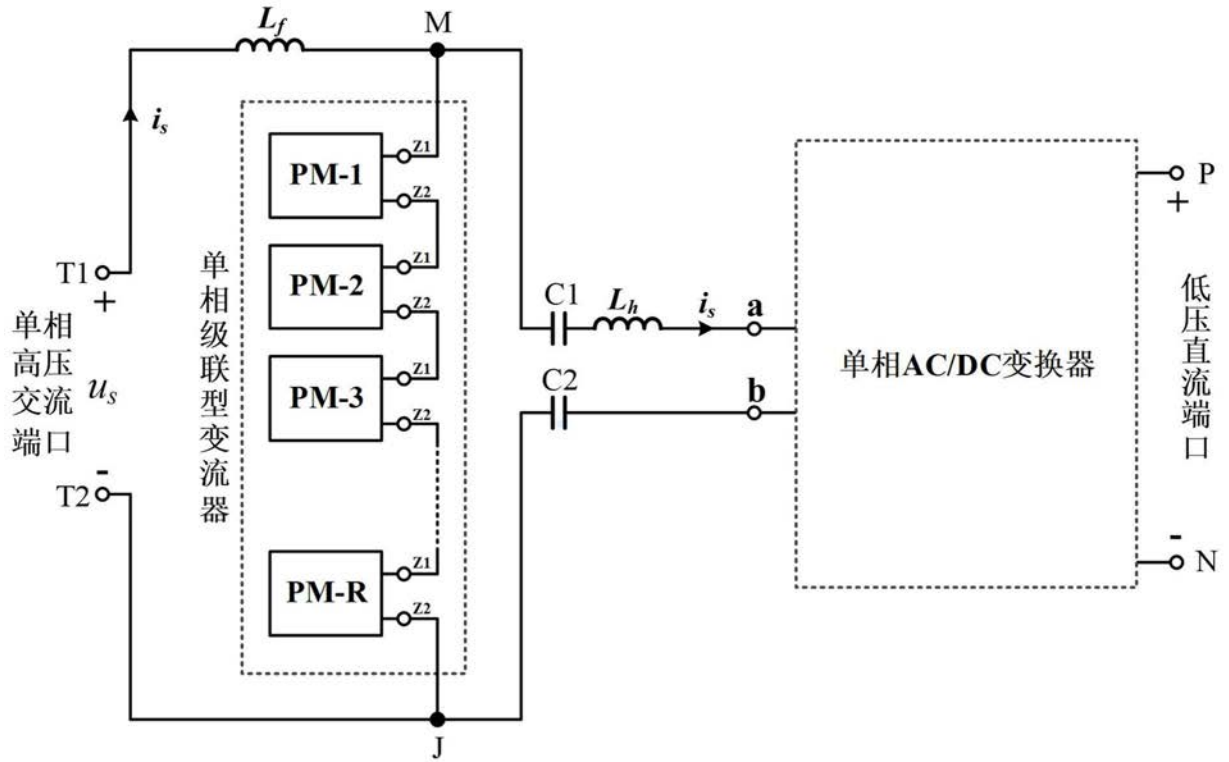


图1

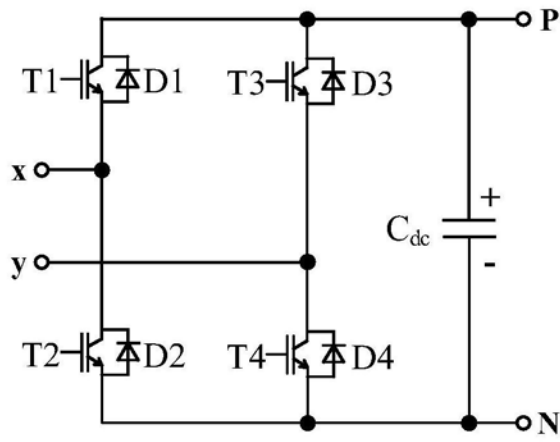


图2

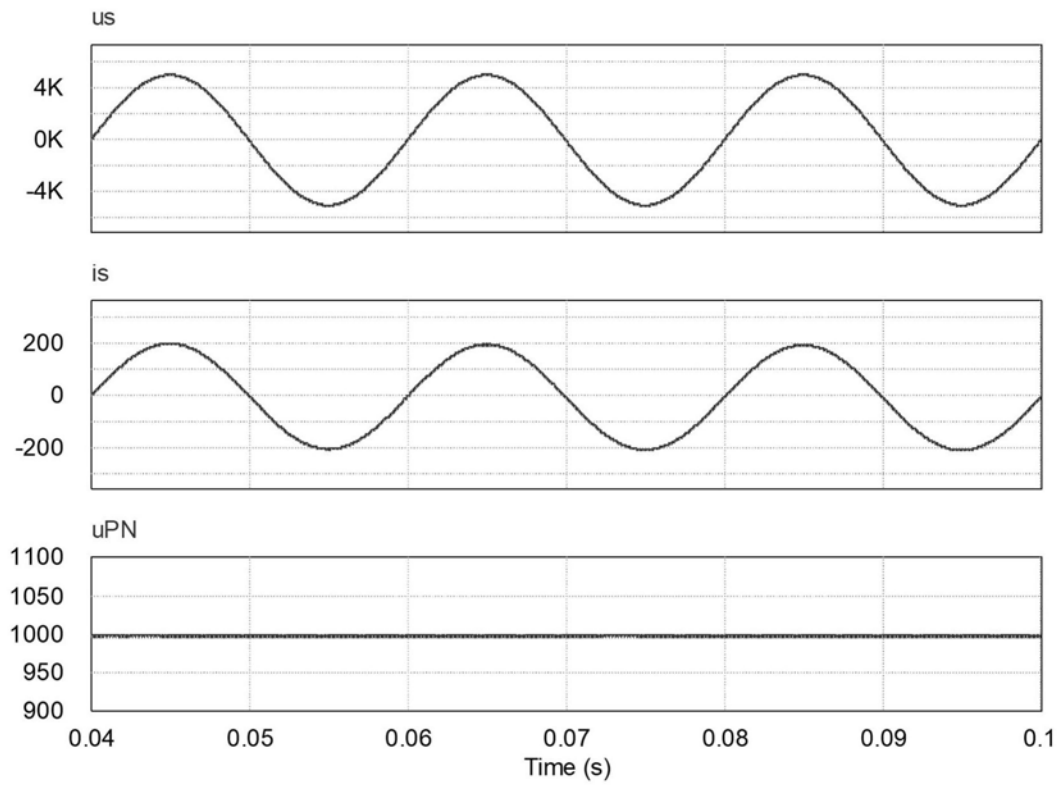


图3

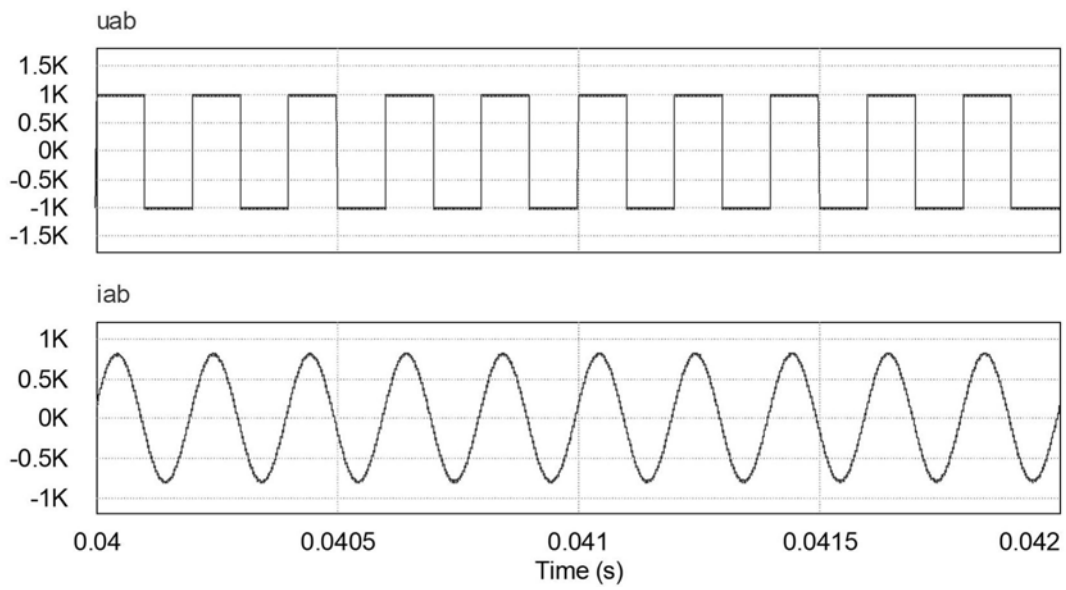


图4