



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103973092 B

(45) 授权公告日 2016. 04. 20

(21) 申请号 201410208737. 2

JP 特开平 11-8090 A, 1999. 01. 12,

(22) 申请日 2014. 05. 16

JP 特开平 11-3794 A, 1999. 01. 06,

(73) 专利权人 华中科技大学

审查员 胡艳梅

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路
1037 号

(72) 发明人 段善旭 仰冬冬 陈昌松

(74) 专利代理机构 华中科技大学专利中心
42201

代理人 廖盈春

(51) Int. Cl.

H02M 1/36(2007. 01)

(56) 对比文件

CN 102130600 A, 2011. 07. 20,

CN 202135059 U, 2012. 02. 01,

CN 1885699 A, 2006. 12. 27,

CN 101127484 A, 2008. 02. 20,

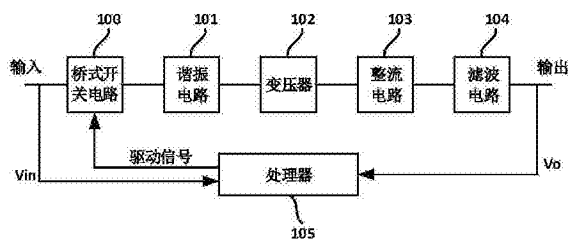
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种 LLC 谐振变换器的软启动方法

(57) 摘要

本发明公开了一种 LLC 谐振变换器的软启动方法。该 LLC 谐振变换器包括依次串接的桥式开关电路、谐振电路、变压器、整流电路和滤波电路，其中，谐振电路由谐振电感和谐振电容串接组成。该方法通过初始化驱动信号占空比为 D_0 ，初始化驱动频率为 f_0 ，其中， D_0 的取值为 $0 \sim 15\%$ ， f_0 的取值为 $1.5f_r \sim 2.5f_r$ ， f_r 为谐振频率，使驱动信号占空比和驱动频率分别随时间线性增加和降低，或者分别随时间指数增加和降低，使驱动信号占空比上升至 50% 的同时，驱动频率下降至谐振频率 f_r ，实现 LLC 谐振变换器的软启动。该方法能够抑制谐振电路在启动时出现的冲击电流，启动时间短，驱动电路容易实现，成本低。



1. 一种LLC谐振变换器的启动方法,所述LLC谐振变换器包括依次串接的桥式开关电路、谐振电路、变压器、整流电路和滤波电路,其中,所述谐振电路由谐振电感和谐振电容串接组成,其特征在于,包括如下步骤:

(1)获取输入电压采样值;

(2)根据输入电压采样值决定所述LLC谐振变换器是否进入启动状态,是则执行步骤(3),否则返回步骤(1);

(3)设置启动标志位,启动开始,初始化驱动信号占空比为 D_0 ,初始化驱动频率为 f_0 ,其中, D_0 的取值为 $0\sim 15\%$, f_0 的取值为 $1.5f_r\sim 2.5f_r$, $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$ 为谐振频率, L_r 为所述谐振电感的感值, C_r 为所述谐振电容的容值;

(4)增加驱动信号占空比,同时降低驱动频率,使驱动信号占空比上升至 50% 的同时,驱动频率下降至谐振频率 f_r ;

(5)判断驱动信号占空比是否为 50% 以及驱动频率是否为谐振频率 f_r ,是则执行步骤(6),否则返回步骤(4);

(6)设置启动完成标志位,启动结束,LLC谐振变换器进入正常闭环运行状态。

2. 如权利要求1所述的LLC谐振变换器的启动方法,其特征在于,所述步骤(4)中,驱动信号占空比和驱动频率分别随时间线性增加和降低,或者驱动信号占空比和驱动频率分别随时间指数增加和降低。

3. 如权利要求2所述的LLC谐振变换器的启动方法,其特征在于,所述步骤(4)中,驱动信号占空比 D 与时间 t 的关系为: $D = D_0 + \frac{0.5 - D_0}{t_s} \cdot t$,驱动频率 f 与时间 t 的关系为:

$$f = f_0 - \frac{f_0 - f_r}{t_s} \cdot t, t_s \text{ 为驱动信号占空比上升至 } 50\% \text{ 以及驱动频率下降至谐振频率 } f_r \text{ 所需的时间; } t_s \text{ 的取值满足如下条件:启动过程中的谐振电流小于门限电流,且启动时间小于门限时间。}$$

4. 如权利要求2所述的LLC谐振变换器的启动方法,其特征在于,所述步骤(4)中,驱动信号占空比 D 与时间 t 的关系为: $D = (0.5 - D_0) \cdot (1 - e^{-t/t_s}) + D_0$,驱动频率 f 与时间 t 的关系为: $f = f_0 - (f_0 - f_r) \cdot (1 - e^{-t/t_s})$, t_s 为时间常数; t_s 的取值满足如下条件:启动过程中的谐振电流小于门限电流,且启动时间小于门限时间。

5. 如权利要求1至4中任一项所述的LLC谐振变换器的启动方法,其特征在于,所述桥式开关电路为全桥开关电路,包括第一和第二桥臂,所述第一桥臂上设有第一和第二开关管,所述第二桥臂上设有第三和第四开关管,其中,所述第一和第四开关管不相邻,所述第二和第三开关管不相邻;所述驱动信号包括第一、第二、第三和第四驱动信号,分别用于驱动所述第一、第二、第三和第四开关管,所述第一和第四驱动信号完全相同,所述第二和第三驱动信号完全相同,所述第一和第二驱动信号的频率和占空比相同,相位相差 180° 。

6. 如权利要求1至4中任一项所述的LLC谐振变换器的启动方法,其特征在于,所述桥式

开关电路为半桥开关电路,包括一个桥臂,所述桥臂上设有第一和第二开关管;所述驱动信号包括第一和第二驱动信号,分别用于驱动所述第一和第二开关管,所述第一和第二驱动信号的频率和占空比相同,相位相差 180° 。

7. 如权利要求1至4中任一项所述的LLC谐振变换器的启动方法,其特征在于,所述步骤(2)具体为:将输入电压采样值与预定电压值进行比较,如果输入电压采样值大于或等于预定电压值,则LLC谐振变换器进入启动状态,执行步骤(3),否则LLC谐振变换器不进入启动状态,返回步骤(1)。

一种LLC谐振变换器的软启动方法

技术领域

[0001] 本发明属于DC/DC变换器技术领域,更具体地,涉及一种LLC谐振变换器的软启动方法。

背景技术

[0002] 高效率、高功率密度、高可靠性一直是开关电源产品的发展方向,LLC谐振变换器可实现输入桥式开关管的零电压导通,输出整流二极管的零电流关断,可工作在高频状态下,因此其具有效率高,体积小,电磁兼容性好等优点,近年来受到广泛关注。

[0003] 通常情况下,LLC谐振变换器工作在谐振频率点,以此获得最佳效率,但在启动时,若直接在谐振点启动,由于谐振阻抗为0,且输出侧滤波电容通常为了充分抑制纹波而设计得较大,启动时输出电压建立缓慢,初期输出基本处于短路状态,因此会导致启动过程中出现很大的电流冲击和电压冲击,损坏开关管、谐振电容等器件。

[0004] 为限制此电流,一般采用远高于谐振频率的开关频率启动,占空比保持50%,然后将开关频率逐渐降低至谐振频率即额定工作点。以这种定频定占空比的方式启动,通常需要非常高的启动频率才足以抑制启动初期的谐振电流。然而,较高的启动频率会带来如下问题:一是要实现高频脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation,PWM),对驱动电路要求高,增加成本;二是从启动频率降至谐振频率时间较长,导致启动时间较长。

发明内容

[0005] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求,本发明提供了一种LLC谐振变换器的软启动方法,有效解决了现有技术中LLC谐振变换器启动时对驱动电路要求高且启动时间长的问题,能够抑制谐振电路在启动时出现的冲击电流,启动时间短,驱动电路容易实现,成本低。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供了一种LLC谐振变换器的启动方法,所述LLC谐振变换器包括依次串接的桥式开关电路、谐振电路、变压器、整流电路和滤波电路,其中,所述谐振电路由谐振电感和谐振电容串接组成,其特征在于,包括如下步骤:(1)获取输入电压采样值;(2)根据输入电压采样值决定所述LLC谐振变换器是否进入启动状态,是则执行步骤(3),否则返回步骤(1);(3)设置启动标志位,启动开始,初始化驱动信号占空比为 D_0 ,初始

化驱动频率为 f_0 ,其中, D_0 的取值为0~15%, f_0 的取值为 $1.5f_r \sim 2.5f_r$, $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$ 为谐

振频率, L_r 为所述谐振电感的感值, C_r 为所述谐振电容的容值;(4)增加驱动信号占空比,同时降低驱动频率,使驱动信号占空比上升至50%的同时,驱动频率下降至谐振频率 f_r ;(5)判断驱动信号占空比是否为50%以及驱动频率是否为谐振频率 f_r ,是则执行步骤(6),否则返回步骤(4);(6)设置启动完成标志位,启动结束,LLC谐振变换器进入正常闭环运行状态。

[0007] 优选地,所述步骤(4)中,驱动信号占空比和驱动频率分别随时间线性增加和降低,或者驱动信号占空比和驱动频率分别随时间指数增加和降低。

[0008] 优选地,所述步骤(4)中,驱动信号占空比D与时间t的关系为: $D = D_0 + \frac{0.5 - D_0}{t_s} \cdot t$,

驱动频率f与时间t的关系为: $f = f_0 - \frac{f_0 - f_r}{t_s} \cdot t$, t_s 为驱动信号占空比上升至50%以及驱

动频率下降至谐振频率 f_r 所需的时间; t_s 的取值满足如下条件:启动过程中的谐振电流小于门限电流,且启动时间小于门限时间。

[0009] 优选地,所述步骤(4)中,驱动信号占空比D与时间t的关系为: $D = (0.5 - D_0) \cdot (1 - e^{-t/t_s}) + D_0$,

驱动频率f与时间t的关系为: $f = f_0 - (f_0 - f_r) \cdot (1 - e^{-t/t_s})$, t_s 为时间常数; t_s 的取值满足如下条件:启动过程中的谐振电流小于门限电流,且启动时间小于门限时间。

[0010] 优选地,所述桥式开关电路为全桥开关电路,包括第一和第二桥臂,所述第一桥臂上设有第一和第二开关管,所述第二桥臂上设有第三和第四开关管,其中,所述第一和第四开关管不相邻,所述第二和第三开关管不相邻;所述驱动信号包括第一、第二、第三和第四驱动信号,分别用于驱动所述第一、第二、第三和第四开关管,所述第一和第四驱动信号完全相同,所述第二和第三驱动信号完全相同,所述第一和第二驱动信号的频率和占空比相同,相位相差 180° 。

[0011] 优选地,所述桥式开关电路为半桥开关电路,包括一个桥臂,所述桥臂上设有第一和第二开关管;所述驱动信号包括第一和第二驱动信号,分别用于驱动所述第一和第二开关管,所述第一和第二驱动信号的频率和占空比相同,相位相差 180° 。

[0012] 优选地,所述步骤(2)具体为:将输入电压采样值与预定电压值进行比较,如果输入电压采样值大于或等于预定电压值,则LLC谐振变换器进入启动状态,执行步骤(3),否则LLC谐振变换器不进入启动状态,返回步骤(1)。

[0013] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比,选取小的驱动信号初始占空比,在启动过程中,逐渐增加驱动信号占空比至50%,明显降低了启动频率,能够抑制谐振电路在启动时出现的冲击电流。由于启动频率接近谐振频率,驱动电路容易实现,成本低;同时调节驱动信号占空比和驱动频率,启动时间短。

附图说明

[0014] 图1是本发明实施例的LLC谐振变换器的软启动系统结构示意图;

[0015] 图2是本发明实施例的LLC谐振变换器的电路图;

[0016] 图3是启动过程中施加到桥式开关电路的开关T1~T4的驱动信号示意图;

[0017] 图4是启动过程中LLC谐振变换器的模态1示意图;

[0018] 图5是启动过程中LLC谐振变换器的模态2示意图;

[0019] 图6是启动过程中LLC谐振变换器的模态3示意图;

[0020] 图7是启动过程中的最大谐振电流与启动频率和启动信号占空比的关系曲线;

[0021] 图8是启动过程中的谐振电流最大值和输出电压波形图,其中,(a)谐振电流最大值,(b)输出电压。

具体实施方式

[0022] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0023] 如图1所示,本发明实施例的LLC谐振变换器的软启动方法中,LLC谐振变换器包括依次串接的桥式开关电路100、谐振电路101、变压器102、整流电路103和滤波电路104,其中,

谐振电路101由谐振电感 L_r 和谐振电容 C_r 串接组成,其谐振频率 $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$ 为LLC谐振变换器的正常工作频率。处理器105用于获取输入电压采样和输出电压采样,并输出驱动信号控制桥式开关电路100。

处理器105用于获取输入电压采样和输出电压采样,并输出驱动信号控制桥式开关电路100。

[0024] 本发明实施例的LLC谐振变换器的软启动方法包括如下步骤:

[0025] (1)处理器获取输入电压采样值。

[0026] (2)处理器根据输入电压采样值决定LLC谐振变换器是否进入启动状态,是则执行步骤(3),否则返回步骤(1)。

[0027] 具体地,处理器将输入电压采样值与预定电压值进行比较,预定电压值通常为LLC谐振变换器正常工作时的输入电压,如果输入电压采样值大于或等于预定电压值,则LLC谐振变换器进入启动状态,执行步骤(3),否则LLC谐振变换器不进入启动状态,返回步骤(1)。

[0028] (3)设置启动标志位,启动开始,初始化驱动信号占空比为 D_0 ,初始化驱动频率为 f_0 。

[0029] 其中, D_0 的取值为0~15%, f_0 的取值为 $1.5f_r \sim 2.5f_r$, f_r 为谐振频率, D_0 和 f_0 的具体取值根据启动阶段的模态分析确定。

[0030] (4)增加驱动信号占空比,同时降低驱动频率,使驱动信号占空比上升至50%的同时,驱动频率下降至谐振频率 f_r 。

[0031] 驱动信号占空比和驱动频率分别随时间线性增加和降低。具体地,驱动信号占空比 D 与时间 t 的关系为:

$D = D_0 + \frac{0.5 - D_0}{t_s} \cdot t$,驱动频率 f 与时间 t 的关系为: $f = f_0 - \frac{f_0 - f_r}{t_s} \cdot t$,

t_s 为驱动信号占空比上升至50%以及驱动频率下降至谐振频率 f_r 所需的时间。 t_s 取合适的值,使得启动过程中的谐振电流小于门限电流,且启动时间小于门限时间。具体实施时,首先初始化 t_s ,例如 $t_s = 10\text{ms}$,然后进行仿真,如果仿真发现启动过程中的谐振电流超过门限电流,则增加 t_s 的值直至谐振电流低于门限电流;如果仿真发现启动过程中谐振电流远低于限值,则减小 t_s 的值直至谐振电流高于门限电流。

[0032] 或者,驱动信号占空比和驱动频率分别随时间指数增加和降低。具体地,驱动信号占空比 D 与时间 t 的关系为: $D = (0.5 - D_0) \cdot (1 - e^{-t/t_s}) + D_0$,驱动频率 f 与时间 t 的关系为:

$f = f_0 - (f_0 - f_r) \cdot (1 - e^{-t/t_s})$, t_s 为时间常数。 t_s 取合适的值,使得启动过程中的谐振电流小于门限电流,且启动时间小于门限时间。具体实施时,首先初始化 t_s ,例如 $t_s = 5\text{ms}$,然后进行仿真,如果仿真发现启动过程中的谐振电流超过门限电流,则增加 t_s 的值直至谐振电流低于门限电流;如果仿真发现启动过程中谐振电流远低于限值,则减小 t_s 的值直至谐振电

流高于门限电流。

[0033] 其中,门限电流根据LLC谐振变换器的元件特性参数确定,门限时间根据LLC谐振变换器的软启动过程设计指标确定。

[0034] (5)判断驱动信号占空比是否为50%以及驱动频率是否为谐振频率,是则执行步骤(6),否则返回步骤(4)。

[0035] (6)设置启动完成标志位,启动结束,LLC谐振变换器进入正常闭环运行状态。

[0036] 当桥式开关电路100为全桥开关电路时,包括第一和第二桥臂,第一桥臂上设有第一和第二开关管,第二桥臂上设有第三和第四开关管,其中,第一和第四开关管不相邻,第二和第三开关管不相邻。上述驱动信号包括第一、第二、第三和第四驱动信号PWM1、PWM2、PWM3和PWM4,分别用于驱动第一、第二、第三和第四开关管,第一和第四驱动信号PWM1和PWM4完全相同,第二和第三驱动信号PWM2和PWM3完全相同,第一和第二驱动信号PWM1和PWM2的频率和占空比相同,相位相差 180° 。

[0037] 当桥式开关电路100为半桥开关电路时,包括一个桥臂,该桥臂上设有第一和第二开关管。上述驱动信号包括第一和第二驱动信号PWM1和PWM2,分别用于驱动第一和第二开关管,第一和第二驱动信号PWM1和PWM2的频率和占空比相同,相位相差 180° 。

[0038] 为使本领域技术人员更好地理解本发明,下面结合具体实施例,对本发明的LLC谐振变换器的软启动方法进行详细说明。

[0039] 如图2所示,LLC谐振变换器包括依次串接的桥式开关电路、谐振电路、变压器、整流电路和滤波电路。桥式开关电路包括T1、T2、T3和T4四个开关管,其中,T1和T2处于同一桥臂,T3和T4处于同一桥臂,两桥臂接于输入电源的正负母线,输入电源电压为600V,T1和T2间的点A与T3和T4间的点B引出接于后端谐振电路。谐振电路包括电感 L_r 和电容 C_r ,电感 L_r 与电容 C_r 串联,电感感值 $L_r=37.07\mu\text{H}$,电容容值 $C_r=23.63\text{nF}$,谐振频率为170kHz。变压器包括第一变压器和第二变压器,第一变压器和第二变压器均具有三个绕组,变比均为26:3:3。第一变压器原边绕组与第二变压器原边绕组串联连接,第一变压器副边绕组端子s2、s3和第二变压器副边绕组端子s6、s7共同连接于输出负极,绕组端子s1、s4、s5、s8接于后端整流电路。

[0040] 整流电路包括第一至第四共四个二极管,第一二极管 D_5 的正极接于第一变压器副边端子s1,第二二极管 D_6 的正极接于第一变压器副边端子s4,第三二极管 D_7 的正极接于第二变压器副边端子s5,第四二极管 D_8 的正极接于第二变压器副边端子s8,第一至第四二极管负极共同连接于输出正极。滤波电路包括电容器C,并接于输出负载,其容值 $C=11.48\text{mF}$ 。

[0041] 开关T1~T4的驱动信号如图3所示,驱动信号占空比为D,周期为T。在启动初期,滤波电容上的电压尚未建立,可认为其处于短路状态,因此根据驱动信号,可以将上述LLC谐振变换器划分为3个模态:模态1、模态2和模态3。各模态出现的条件如下:

[0042] 模态1中桥式开关电路输出端口电压等于输入电压 V_{in} ,此模态发生在T1/T4开通期间或者T1/T4所并联的二极管 D_1/D_4 续流导通期间。

[0043] 模态2中桥式开关电路输出端口电压在 $-V_{in}$ 和 V_{in} 之间,此模态发生在T1~T4管都关断期间,此时谐振电流通过电容C1、C2、C3、C4。

[0044] 模态3中桥式开关电路输出端口电压等于反向输入电压 $-V_{in}$,此模态发生在T2/T3开通期间或者T2/T3所并联的二极管 D_2/D_3 续流导通期间。

[0045] 各模态的示意图及等效电路分别如图4~6所示。每种模态都对应一种状态电路,根据各模态的状态电路可列写状态方程进行状态求解,从而可获得每种模态中谐振电流的数学表达式,在启动过程中,结合桥式开关电路输出端口电压范围以及谐振电流方向,可以判断LLC谐振电路处于哪一种状态,进而利用对应状态的谐振电流的表达式计算得出一个驱动周期内谐振电流的变化轨迹。

[0046] 从0~50%选取不同的初始占空比,从 $0.5f_r$ 到 $5f_r$ 选取不同的启动频率进行组合,采用上述LLC谐振变换器的软启动方法得出启动初期300个开关周期内,谐振电流的变化轨迹,从轨迹中得出最大谐振电流值,从而得到对应初始占空比和启动频率的启动过程中的最大谐振电流值,即可得到启动过程中的最大谐振电流与启动频率以及初始占空比的关系,如图7所示。

[0047] 图7中,横坐标表示归一化的启动频率(启动频率与谐振频率的比值),纵坐标表示启动中出现的最大谐振电流,该谐振电流通过下式进行归一化:

$$[0048] \quad i_{r\max} = \frac{i_{r\max}}{I_N} = i_{r\max} \frac{z_0}{V_{in}}$$

[0049] 其中, $i_{r\max}$ 为归一化的最大谐振电流, $i_{r\max}$ 为实际最大谐振电流, I_N 为基准电流,

V_{in} 为输入电压, $z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$ 为谐振阻抗。

[0050] 根据图7,优选启动频率在 $1.5f_r \sim 2.5f_r$,优选初始占空比为0~15%。在上述优选区间内启动,启动过程中的最大谐振电流很小(低于1倍基准电流),不会导致启动过程中出现过流,避免了全桥开关T1~T4的潜在损坏,同时,启动频率仅为1.5倍到2.5倍谐振频率,频率不高,这既降低了驱动电路的实现难度又可以使得LLC谐振变换器尽快完成启动过程。

[0051] 选取启动时的初始占空比为10%,启动频率为 $1.5f_r$,启动过程的仿真波形如图8所示。启动过程中驱动信号占空比和驱动频率分别随时间线性增加和降低,驱动信号占空比上升至50%以及驱动频率下降至谐振频率 f_r 所需的时间 $t_s = 30\text{ms}$ 。由图8所示的仿真结果可以看出,启动过程中谐振电流最大值未超过1倍基准电流,证明了上述启动方法的有效性。

[0052] 本发明的启动方法在启动时,启动频率接近谐振频率,因此启动时间较短,同时,由于采用了优选的启动频率和初始占空比,使得LLC谐振变换器能够充分抑制启动过程中的电流,避免了全桥开关T1~T4的潜在损坏。

[0053] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

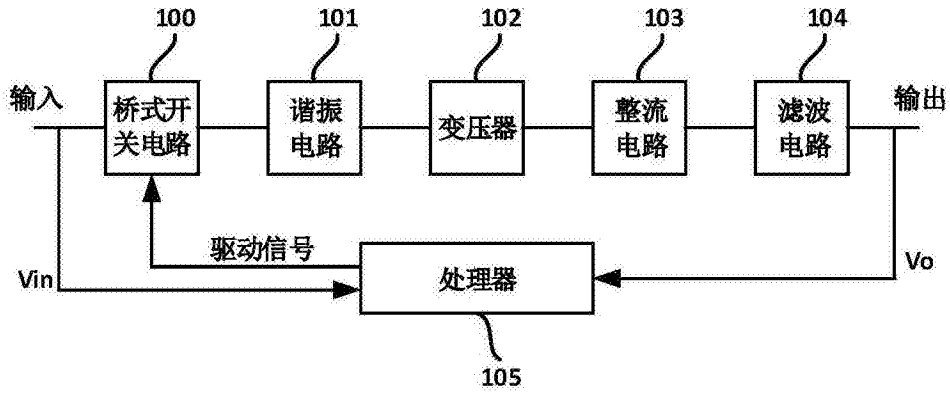


图1

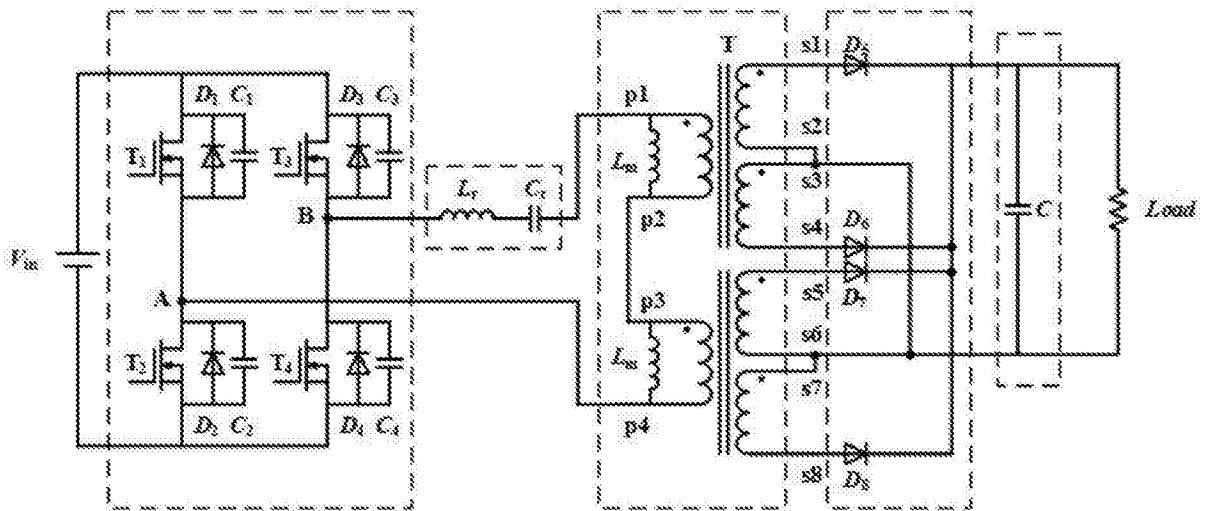


图2

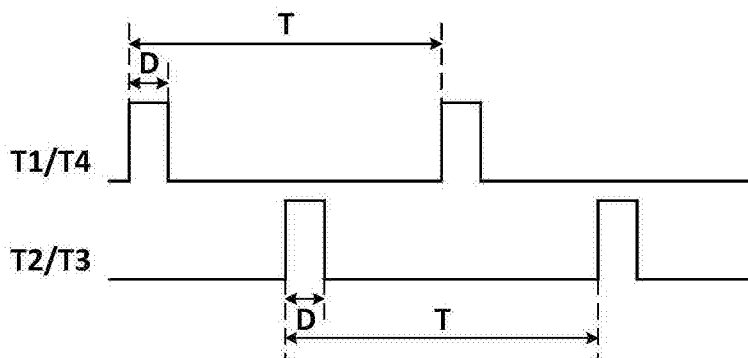


图3

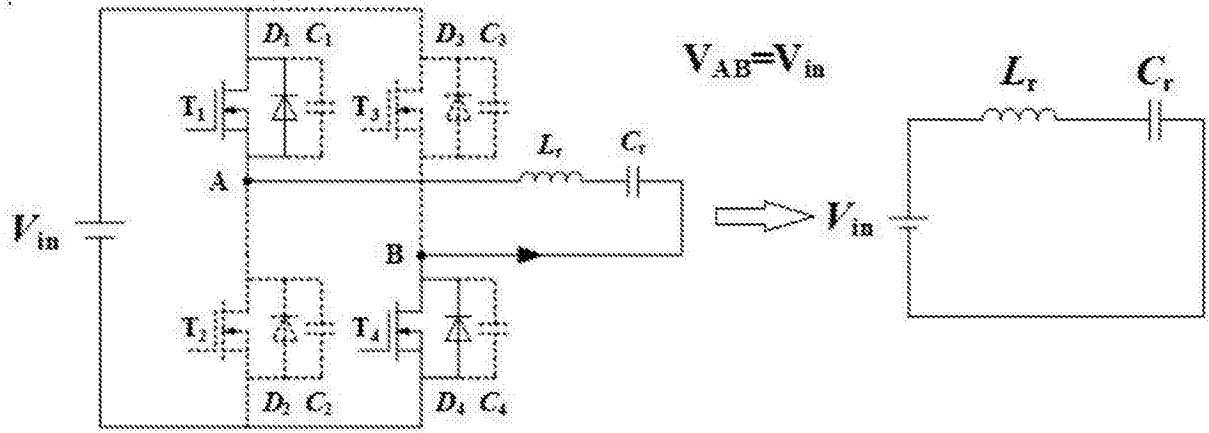


图4

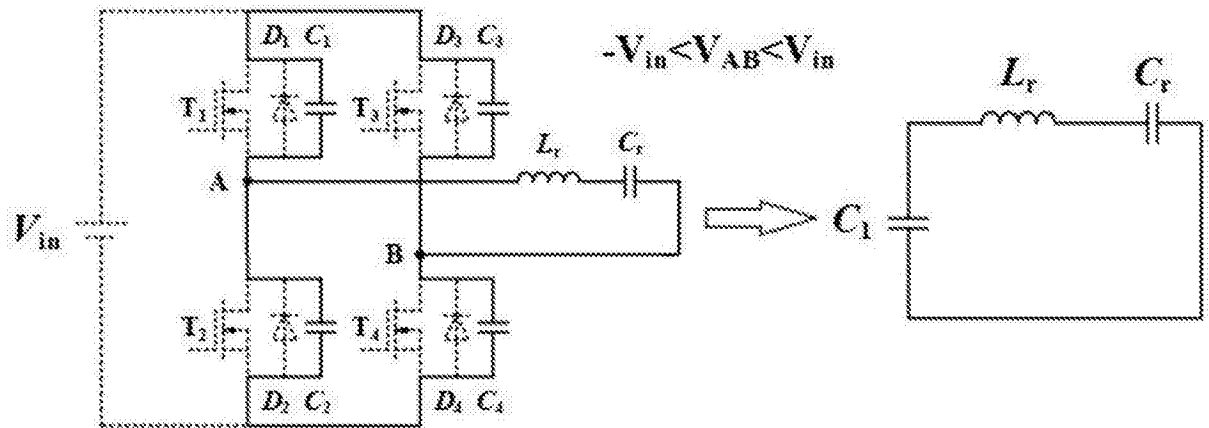


图5

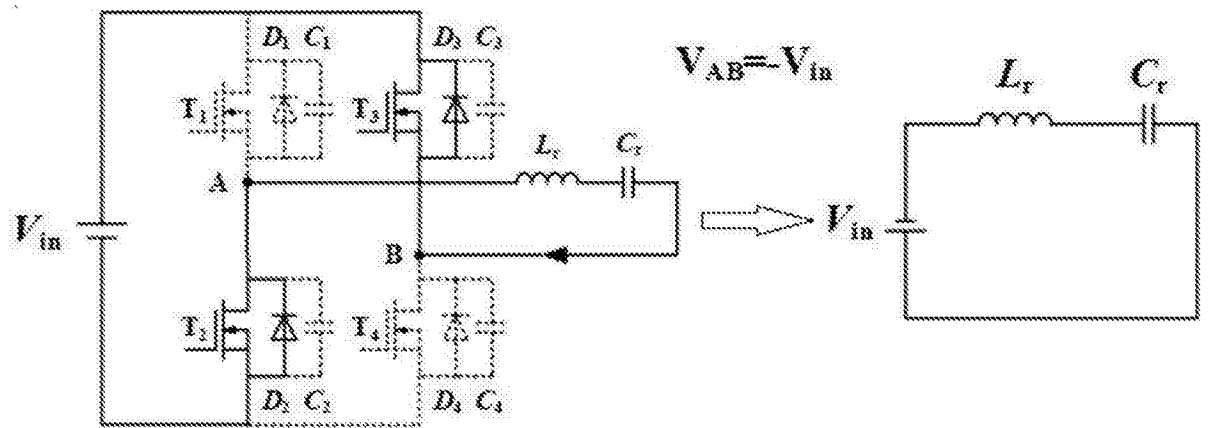


图6

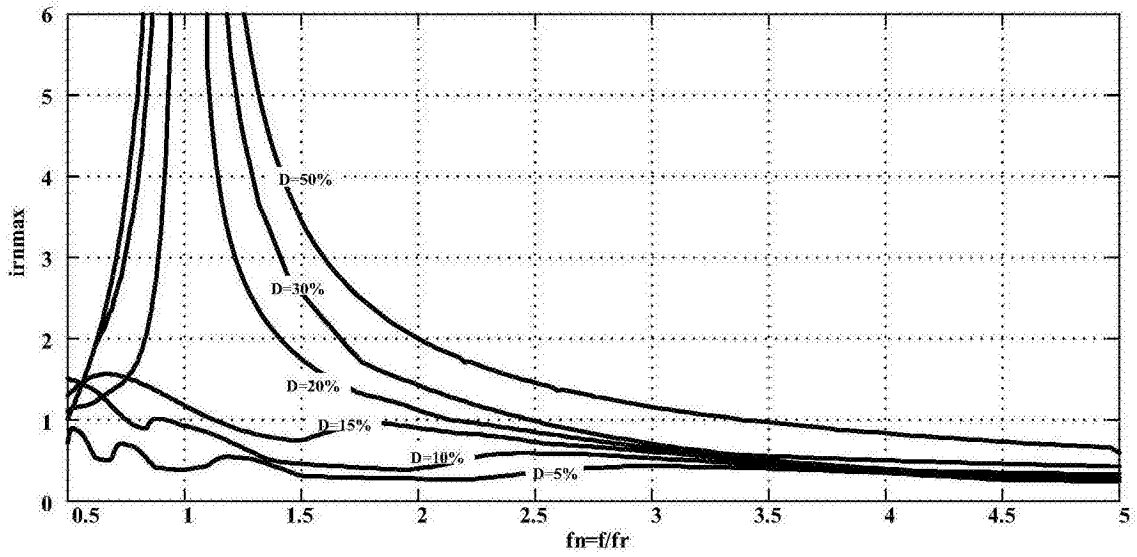
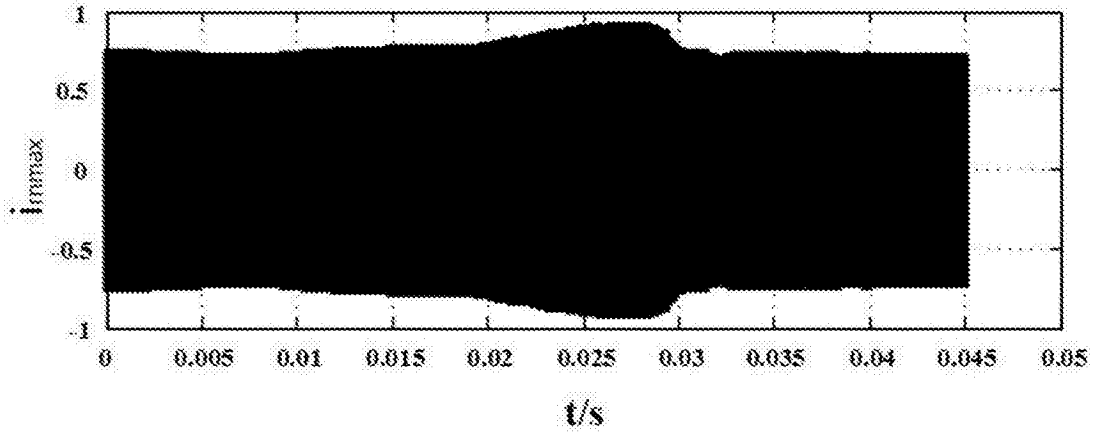
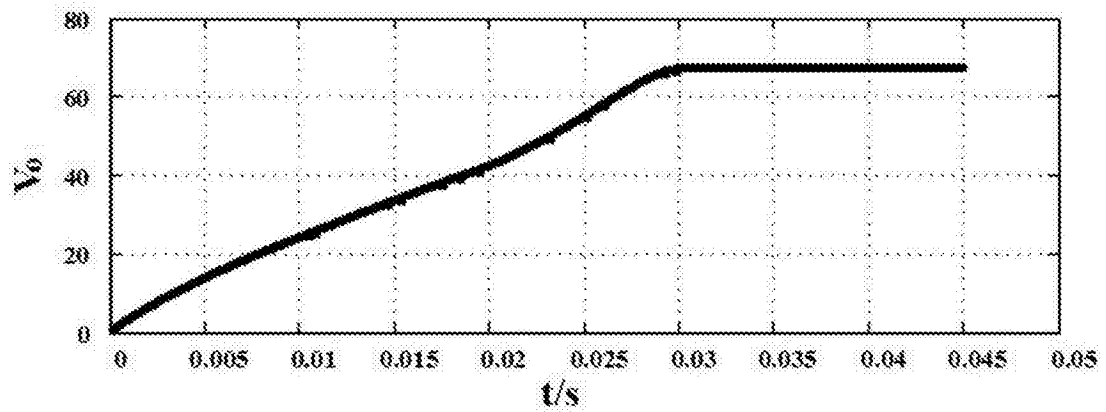


图7



(a)



(b)

图8