

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102223077 A

(43) 申请公布日 2011. 10. 19

(21) 申请号 201110152034. 9

(22) 申请日 2011. 06. 08

(71) 申请人 浙江大学

地址 310027 浙江省杭州市西湖区浙大路  
38 号

(72) 发明人 马皓 郭津

(74) 专利代理机构 杭州天勤知识产权代理有限  
公司 33224

代理人 胡红娟

(51) Int. Cl.

H02M 3/338(2006. 01)

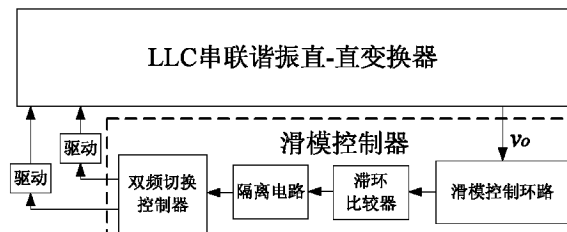
权利要求书 2 页 说明书 4 页 附图 4 页

(54) 发明名称

LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器及其控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器, 包括 : 滑模控制环路、与滑模控制环路相连的滞环比较器、与滞环比较器相连的隔离电路和与隔离电路相连的双频切换控制器 ; 同时本发明还公开了该滑模控制器的控制方法。本发明将滑模控制应用于 LLC 串联谐振直 - 直变换器, 使 LLC 串联谐振直 - 直变换器在具有良好的稳态特性的基础上提高了变换器的动态响应速度, 且对非线性负载具有良好的适应性 ; 同时采用双频切换模式来控制 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出, 变换器在输入电压跳变或负载变化的瞬间即可通过频率切换调节变换器至新的工作状态, 缩短了动态响应时间, 提高了变换器的动态特性, 能够满足高性能要求的应用场合。



1. 一种 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器,其特征在於:包括:  
滑模控制环路,用于采样 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出电压信号,并产生滑模输出信号;

滞环比较器,用于将所述的滑模输出信号转化为滞环输出信号;

隔离电路,用于将所述的滞环输出信号隔离并转化为频率切换信号;

双频切换控制器,用于接收所述的频率切换信号,并产生两组相位互补的开关驱动信号;所述的两组开关驱动信号经驱动电路信号处理后分别驱动 LLC 串联谐振直 - 直变换器中的两个功率开关管。

2. 根据权利要求 1 所述的 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器,其特征在於:所述的开关驱动信号的占空比为 50%,信号在两种频率间切换,其切换频率为所述的滞环输出信号变化的频率。

3. 根据权利要求 1 所述的 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器,其特征在於:所述的滑模控制环路为二阶滑模控制环路或三阶滑模控制环路。

4. 根据权利要求 3 所述的 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器,其特征在於:所述的二阶滑模控制环路由减法器、加法器、比例调节器和微分调节器构成;其中,减法器的第一输入端为所述的二阶滑模控制环路的输入端并接收所述的 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出电压信号,减法器的第二输入端接收外部设备提供的基准电压信号,减法器的输出端与比例调节器的输入端和微分调节器的输入端相连,比例调节器的输出端与加法器的第一输入端相连,微分调节器的输出端与加法器的第二输入端相连,加法器的输出端为所述的二阶滑模控制环路的输出端并产生滑模输出信号;所述的二阶滑模控制环路的滑模面函数为:
$$s = k_1(V_{ref} - v_o) + k_2 \frac{d(V_{ref} - v_o)}{dt}$$
;其中  $v_o$  为 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出电压信号, $V_{ref}$  为基准电压信号, $k_1$  为比例系数, $k_2$  为微分系数。

5. 根据权利要求 3 所述的 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器,其特征在於:所述的三阶滑模控制环路由减法器、加法器、比例调节器、微分调节器和积分调节器构成;其中,减法器的第一输入端为所述的三阶滑模控制环路的输入端并接收所述的 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出电压信号,减法器的第二输入端接收外部设备提供的基准电压信号,减法器的输出端与比例调节器的输入端、微分调节器的输入端和积分调节器的输入端相连,比例调节器的输出端与加法器的第一输入端相连,微分调节器的输出端与加法器的第二输入端相连,积分调节器的输出端与加法器的第三输入端相连,加法器的输出端为所述的三阶滑模控制环路的输出端并产生滑模输出信号;所述的三阶滑模控制环路的滑模面函数为:
$$s = k_1(V_{ref} - v_o) + k_2 \frac{d(V_{ref} - v_o)}{dt} + k_3 \int (V_{ref} - v_o) dt$$
;其中  $v_o$  为 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出电压信号, $V_{ref}$  为基准电压信号, $k_1$  为比例系数, $k_2$  为微分系数, $k_3$  为积分系数。

6. 一种 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器的控制方法,包括如下步骤:

(1) 采样 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出电压信号,将其与基准电压信号进行比较,并将比较结果转化为滑模输出信号;

(2) 将滑模输出信号转化为高低电平交替变化的滞环输出信号,并将滞环输出信号隔离后转化为同样高低电平交替变化的频率切换信号;

(3) 根据频率切换信号,产生两组相位互补,占空比为 50%且在两种频率间切换的开关驱动信号;

(4) 将两组开关驱动信号进行信号处理后,分别驱动 LLC 串联谐振直-直变换器中的两个功率开关管。

## LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器及其控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于谐振变换器控制技术领域,具体涉及一种 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器及其控制方法。

### 背景技术

[0002] 如图 1 所示,现有的 LLC 串联谐振直流 - 直流变换器,通常采用传统的 PID 控制反馈环路,减法器将采样输出与参考量做比较,其比较结果经 PID 控制调整及信号隔离后接入压控变频电路,压控变频电路把输入的电压信号转化为对应频率的占空比为 50% 的方波输出,方波输出信号经驱动电路后驱动功率开关管,以实现对其输出的调节。为避免同一桥臂功率开关管直通,加入死区。传统的 PID 控制具有控制简单、稳定性好、适用性强的优点,但其对系统参数的变化比较敏感,当负载大范围变化,特别是带非线性负载时,具有动态响应速度慢,输出波形畸变等缺点。如今,LLC 串联谐振直流 - 直流变换器的应用范围越来越广,其性能要求不断提高,特别是要求变换器具有高的稳态精度的同时还要具有快速的动态响应速度,传统的 PID 控制策略难以满足要求。

### 发明内容

[0003] 本发明提供了一种 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器及其控制方法,其采用滞环滑模变结构控制使变换器功率开关管频率在两个频率间切换,在调节 LLC 串联谐振直 - 直变换器稳态输出的同时,可提升变换器的动态特性。

[0004] 一种 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器,包括:

[0005] 滑模控制环路,用于采样 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出电压信号,并产生滑模输出信号;

[0006] 滞环比较器,用于将所述的滑模输出信号转化为滞环输出信号;

[0007] 隔离电路,用于将所述的滞环输出信号隔离并转化为频率切换信号;

[0008] 双频切换控制器,用于接收所述的频率切换信号,并产生两组相位互补的开关驱动信号;所述的两组开关驱动信号经驱动电路信号处理后分别驱动 LLC 串联谐振直 - 直变换器中的两个功率开关管。

[0009] 所述的开关驱动信号的占空比为 50%,信号在两种频率间切换,其切换频率为所述的滞环输出信号变化的频率。

[0010] 所述的滑模控制环路为二阶滑模控制环路或三阶滑模控制环路。

[0011] 所述的二阶滑模控制环路由减法器、加法器、比例调节器和微分调节器构成;其中,减法器的第一输入端为所述的二阶滑模控制环路的输入端并接收所述的 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出电压信号,减法器的第二输入端接收外部设备提供的基准电压信号,减法器的输出端与比例调节器的输入端和微分调节器的输入端相连,比例调节器的输出端与加法器的第一输入端相连,微分调节器的输出端与加法器的第二输入端相连,加法器的输出端为所述的二阶滑模控制环路的输出端并产生滑模输出信号;所述的二阶滑模控制环

路的滑模面函数为： $s = k_1(V_{ref} - v_o) + k_2 \frac{d(V_{ref} - v_o)}{dt}$ ；其中  $v_o$  为 LLC 串联谐振直-直变换器的输出电压信号， $V_{ref}$  为基准电压信号， $k_1$  为比例系数， $k_2$  为微分系数。

[0012] 所述的三阶滑模控制环路由减法器、加法器、比例调节器、微分调节器和积分调节器构成；其中，减法器的第一输入端为所述的三阶滑模控制环路的输入端并接收所述的 LLC 串联谐振直-直变换器的输出电压信号，减法器的第二输入端接收外部设备提供的基准电压信号，减法器的输出端与比例调节器的输入端、微分调节器的输入端和积分调节器的输入端相连，比例调节器的输出端与加法器的第一输入端相连，微分调节器的输出端与加法器的第二输入端相连，积分调节器的输出端与加法器的第三输入端相连，加法器的输出端为所述的三阶滑模控制环路的输出端并产生滑模输出信号；所述的三阶滑模控制环路的滑模面函数为： $s = k_1(V_{ref} - v_o) + k_2 \frac{d(V_{ref} - v_o)}{dt} + k_3 \int (V_{ref} - v_o) dt$ ；其中  $v_o$  为 LLC 串联谐振直-直变换器的输出电压信号， $V_{ref}$  为基准电压信号， $k_1$  为比例系数， $k_2$  为微分系数， $k_3$  为积分系数。

[0013] 一种 LLC 串联谐振直-直变换器的滑模控制器的控制方法，包括如下步骤：

[0014] (1) 采样 LLC 串联谐振直-直变换器的输出电压信号，将其与基准电压信号进行比较，并将比较结果转化为滑模输出信号；

[0015] (2) 将滑模输出信号转化为高低电平交替变化的滞环输出信号，并将滞环输出信号隔离后转化为同样高低电平交替变化的频率切换信号；

[0016] (3) 根据频率切换信号，产生两组相位互补，占空比为 50% 且在两种频率间切换的开关驱动信号；

[0017] (4) 将两组开关驱动信号进行信号处理后，分别驱动 LLC 串联谐振直-直变换器中的两个功率开关管。

[0018] 当变换器工作状态发生变化时，如输入电压跳变或负载切换，变换器的输出电压信号即发生相应变化，此变化的输出电压信号传递到滑模控制环路，滑模控制环路自动调节使输出状态变量仍然在滑模面  $s(x) = 0$  上下运动，变换器进入另一个工作状态，且状态切换时间极短，在输出电压信号变化的瞬间即将变换器调节至新的工作状态。

[0019] 本发明的有益技术效果为：

[0020] (1) 本发明将具有良好动态特性效果的滑模控制应用于 LLC 串联谐振直-直变换器，使 LLC 串联谐振直-直变换器在具有良好的稳态特性的基础上提高了变换器的动态响应速度，且对非线性负载具有良好的适应性，能够满足高性能要求的应用场合。

[0021] (2) 本发明采用双频切换模式来控制 LLC 串联谐振直-直变换器的输出，切换频率由滑模控制环和滞环比较器共同控制，变换器在负载电压变化的瞬间即可通过频率切换调节变换器至新的工作状态，无需传统压控变频电路中频率连续变化至新的工作频率从而调节输出的过程，缩短了动态响应时间，提高了变换器的动态特性。

[0022] (3) 本发明采用双频切换模式来控制 LLC 串联谐振直-直变换器的输出，切换频率由滑模控制环和滞环比较器共同控制，变换器在负载电压变化的瞬间即可通过频率切换调节变换器至新的工作状态，无需传统压控变频电路中频率连续变化至新的工作频率从而调节输出的过程，缩短了动态响应时间，提高了变换器的动态特性。

## 附图说明

[0022] 图 1 为传统 PID 控制的 LLC 串联谐振直-直变换器的结构示意图。

[0023] 图 2 为本发明滑模控制的 LLC 串联谐振直-直变换器的结构示意图。

[0024] 图 3 为本发明采用二阶滑模控制的 LLC 串联谐振直 - 直变换器的结构示意图。

[0025] 图 4 为本发明采用三阶滑模控制的 LLC 串联谐振直 - 直变换器的结构示意图。

[0026] 图 5 为本发明在变换器重载工作下,滞环比较器输出信号与变换器两功率开关管驱动电压的波形示意图。

[0027] 图 6 为本发明在变换器轻载工作下,滞环比较器输出信号与变换器两功率开关管驱动电压的波形示意图。

### 具体实施方式

[0028] 为了更为具体地描述本发明,下面结合附图及具体实施方式对本发明 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器及其控制方法进行详细说明。

[0029] 实施例一

[0030] 如图 2 和 3 所示,一种 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器,包括:二阶滑模控制环路、滞环比较器、隔离电路和双频切换控制器。

[0031] 二阶滑模控制环路的输入端与 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出端相连,以采样变换器的输出电压信号  $v_o$ ,并产生滑模输出信号;

[0032] 二阶滑模控制环路由减法器 A1、加法器 A4、比例调节器 A2 和微分调节器 A3 构成;其中,减法器 A1 的第一输入端为二阶滑模控制环路的输入端并接收 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出电压信号  $v_o$ ,减法器 A1 的第二输入端接收外部设备提供的基准电压信号  $V_{ref}$ ,减法器 A1 的输出端与比例调节器 A2 的输入端和微分调节器 A3 的输入端相连,比例调节器 A2 的输出端与加法器 A4 的第一输入端相连,微分调节器 A3 的输出端与加法器 A4 的第二输入端相连,加法器 A4 的输出端为二阶滑模控制环路的输出端并产生滑模输出信号;二阶滑模

控制环路的滑模面函数为:  $s = k_1(V_{ref} - v_o) + k_2 \frac{d(V_{ref} - v_o)}{dt}$ ;其中  $v_o$  为 LLC 串联谐振直 - 直

变换器的输出电压信号,  $V_{ref}$  为基准电压信号,  $k_1$  为比例系数,  $k_2$  为微分系数。

[0033] 滞环比较器的输入端与二阶滑模控制环路的输出端相连,以将滑模输出信号转化为滞环输出信号;

[0034] 隔离电路的输入端与滞环比较器的输出端相连,以将滞环输出信号隔离并转化为频率切换信号;

[0035] 双频切换控制器的输入端与隔离电路的输出端相连,以接收频率切换信号,并产生两组相位互补的开关驱动信号;双频切换控制器的两输出端分别与两个驱动电路的输入端相连,两个驱动电路对两组开关驱动信号进行信号处理后输出分别驱动 LLC 串联谐振直 - 直变换器中的两个功率开关管。

[0036] 开关驱动信号的占空比为 50%,信号在两种频率间切换,其切换频率为滞环输出信号变化的频率。

[0037] 实施例二

[0038] 如图 2 和 4 所示,一种 LLC 串联谐振直 - 直变换器的滑模控制器,包括:三阶滑模控制环路、滞环比较器、隔离电路和双频切换控制器。

[0039] 三阶滑模控制环路的输入端与 LLC 串联谐振直 - 直变换器的输出端相连,以采样

变换器的输出电压信号  $v_o$ ，并产生滑模输出信号；

[0040] 三阶滑模控制环路由减法器 B1、加法器 B5、比例调节器 B2、微分调节器 B3 和积分调节器 B4 构成；其中，减法器 B1 的第一输入端为三阶滑模控制环路的输入端并接收 LLC 串联谐振直-直变换器的输出电压信号  $v_o$ ，减法器 B1 的第二输入端接收外部设备提供的基准电压信号  $V_{ref}$ ，减法器 B1 的输出端与比例调节器 B2 的输入端、微分调节器 B3 的输入端和积分调节器 B4 的输入端相连，比例调节器 B2 的输出端与加法器 B5 的第一输入端相连，微分调节器 B3 的输出端与加法器 B5 的第二输入端相连，积分调节器 B4 的输出端与加法器 B5 的第三输入端相连，加法器 B5 的输出端为三阶滑模控制环路的输出端并产生滑模输出信号；

三阶滑模控制环路的滑模面函数为： $s = k_1(V_{ref} - v_o) + k_2 \frac{d(V_{ref} - v_o)}{dt} + k_3 \int (V_{ref} - v_o) dt$ ；其中  $v_o$  为 LLC 串联谐振直-直变换器的输出电压信号， $V_{ref}$  为基准电压信号， $k_1$  为比例系数， $k_2$  为微分系数， $k_3$  为积分系数。

[0041] 滞环比较器的输入端与三阶滑模控制环路的输出端相连，以将滑模输出信号转化为滞环输出信号；

[0042] 隔离电路的输入端与滞环比较器的输出端相连，以将滞环输出信号隔离并转化为频率切换信号；

[0043] 双频切换控制器的输入端与隔离电路的输出端相连，以接收频率切换信号，并产生两组相位互补的开关驱动信号；双频切换控制器的两输出端分别与两个驱动电路的输入端相连，两个驱动电路对两组开关驱动信号进行信号处理后输出分别驱动 LLC 串联谐振直-直变换器中的两个功率开关管。

[0044] 开关驱动信号的占空比为 50%，信号在两种频率间切换，其切换频率为滞环输出信号变化的频率。

[0045] 上述两类实施方式的滑模控制器的控制方法，包括如下步骤：

[0046] (1) 采样 LLC 串联谐振直-直变换器的输出电压信号，将其与基准电压信号进行比较，并将比较结果转化为滑模输出信号；

[0047] (2) 将滑模输出信号转化为高低电平交替变化的滞环输出信号（其波形如图 5 中的  $v_a$  所示），并将滞环输出信号隔离后转化为同样高低电平交替变化的频率切换信号；

[0048] (3) 根据频率切换信号，产生两组相位互补，占空比为 50% 且在两种频率间切换的开关驱动信号；

[0049] (4) 将两组开关驱动信号进行信号处理后，分别驱动 LLC 串联谐振直-直变换器中的两个功率开关管。（经信号处理后的两组开关驱动信号的波形如图 5 中的  $v_{gs1}$ 、 $v_{gs2}$  所示）

[0050] 当变换器工作状态发生变化时，如输入电压跳变或负载切换，变换器的输出电压信号即发生相应变化，此变化的输出电压信号传递到滑模控制环路，滑模控制环路自动调节使输出状态变量仍然在滑模面  $s(x) = 0$  上下运动，变换器进入另一个工作状态，且状态切换时间极短，在输出电压信号变化的瞬间即将变换器调节至新的工作状态。新工作状态下的滞环输出信号如图 6 中  $v_a$  波形所示，两个功率开关管的驱动信号波形如图 6 中  $v_{gs1}$ 、 $v_{gs2}$  波形所示。

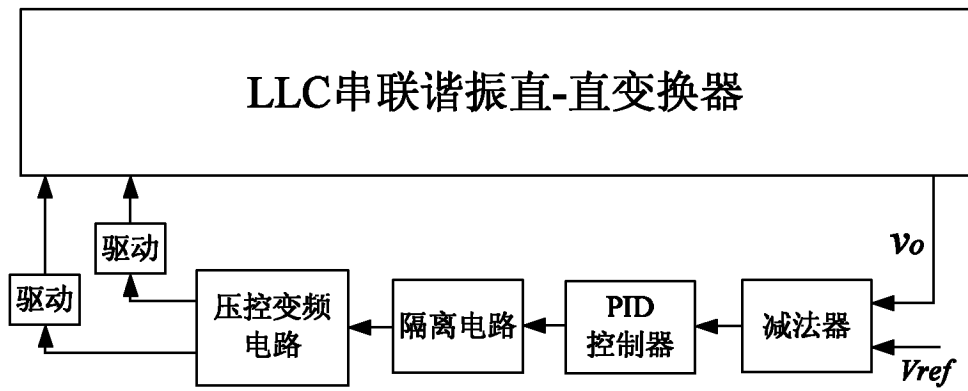


图 1

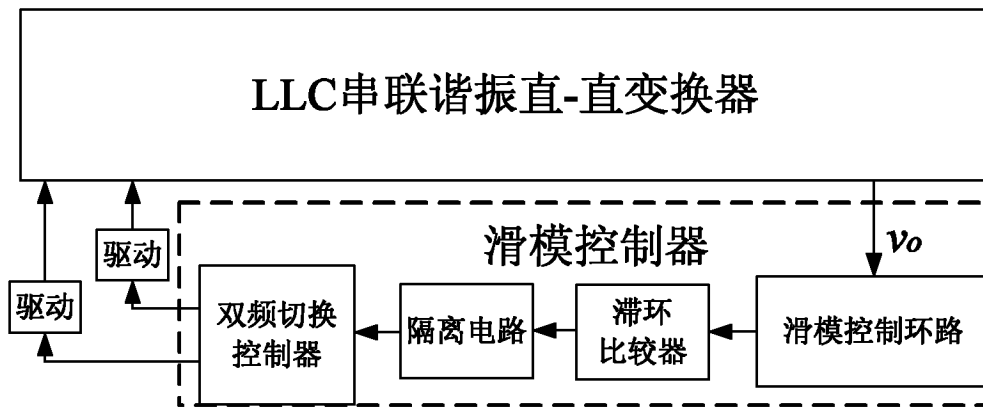


图 2



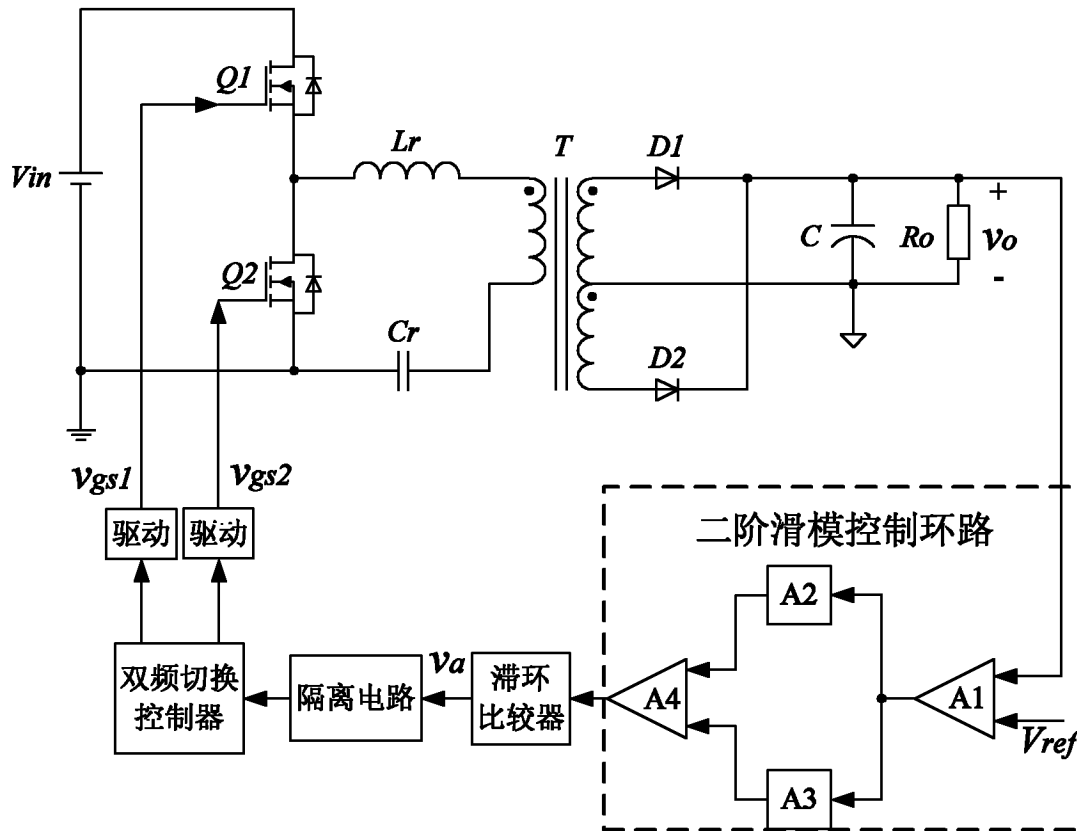


图 3

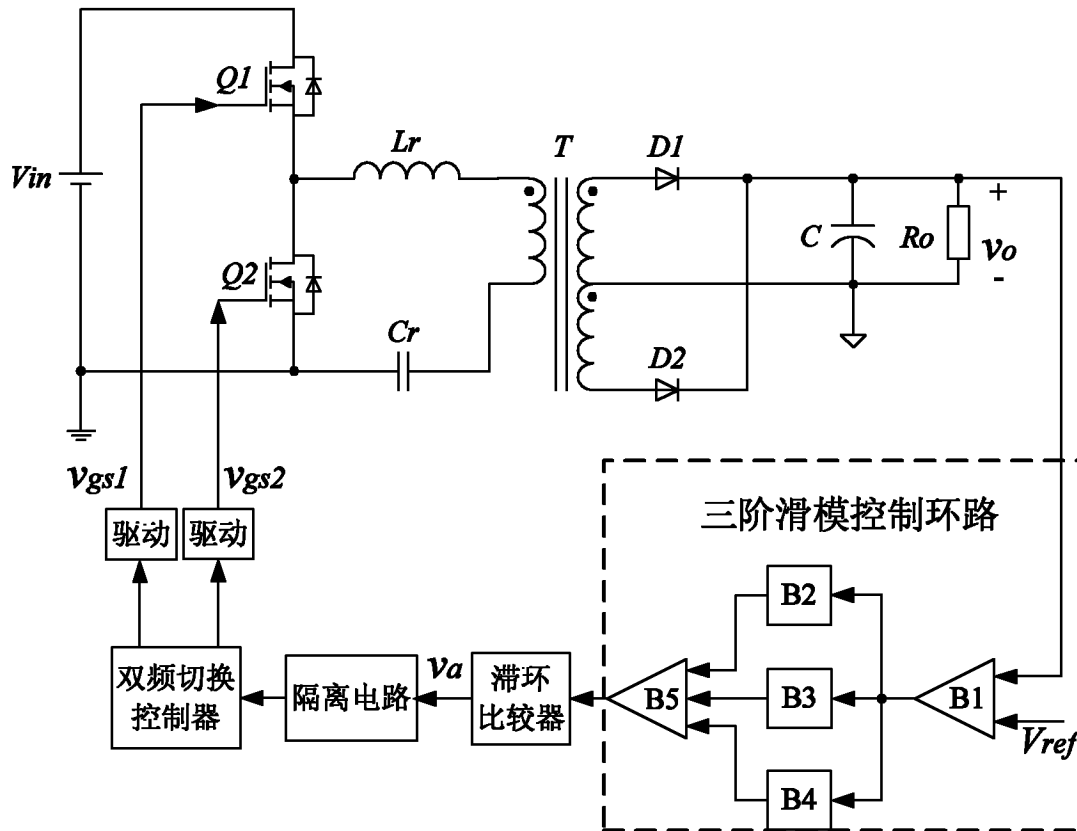


图 4

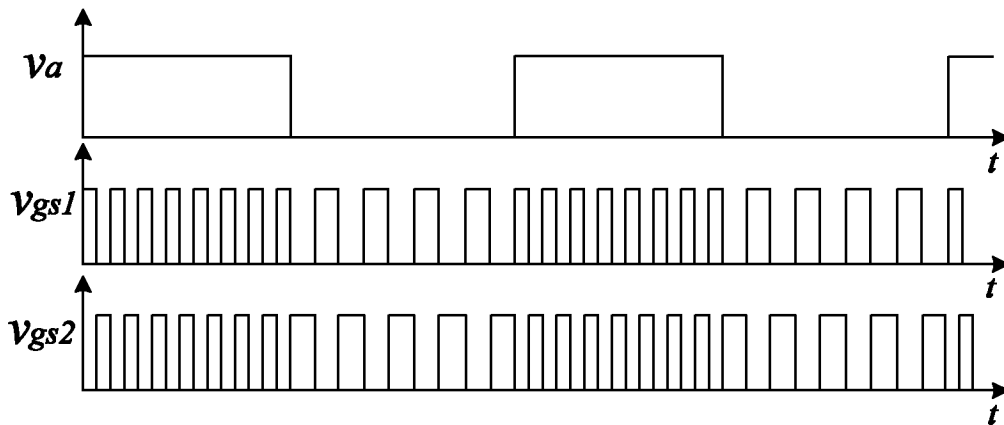


图 5

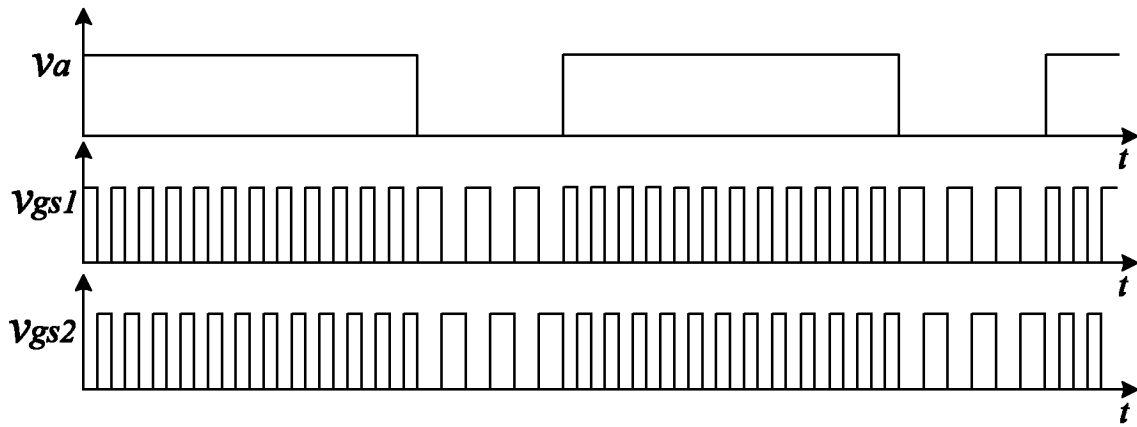


图 6