



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110383663 B

(45)授权公告日 2020.04.24

(21)申请号 201880014577.4

(22)申请日 2018.02.22

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110383663 A

(43)申请公布日 2019.10.25

(30)优先权数据
2017-038586 2017.03.01 JP
2017-048361 2017.03.14 JP

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2019.08.28

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2018/006393 2018.02.22

(87)PCT国际申请的公布数据
W02018/159437 JA 2018.09.07

(73)专利权人 株式会社村田制作所
地址 日本京都府

(72)发明人 伊东淳一 比嘉隼

(74)专利代理机构 中科专利商标代理有限责任
公司 11021
代理人 朴云龙

(51)Int.Cl.
H02M 3/28(2006.01)
H02M 3/335(2006.01)

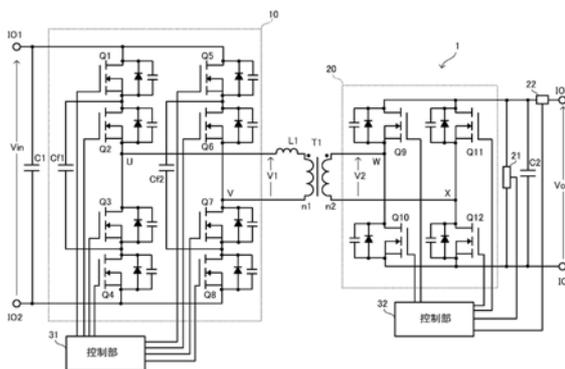
(56)对比文件
CN 103620935 A,2014.03.05,
WO 2016038966 A1,2016.03.17,
WO 2016125292 A1,2016.08.11,
JP 5963125 B2,2016.08.03,
JP 6382739 B2,2018.08.29,
CN 106208709 A,2016.12.07,
审查员 梁雪峰

权利要求书2页 说明书12页 附图26页

(54)发明名称
DC-DC变换器

(57)摘要

本发明具有被变压器(T1)绝缘的第一全桥电路(10)以及第二全桥电路(20)。第一全桥电路(10)具有开关元件(Q1~Q8)、第一浮动电容器(Cf1)以及第二浮动电容器(Cf2)。第一全桥电路(10)以全桥动作模式、半桥动作模式中的至少一者进行动作。而且,在动作模式的切换时,在驱动频率的一个周期内分两次使第一全桥电路(10)的开关相位偏移,并且决定相位的偏移量,使得在动作模式切换的前后第一全桥电路的输出电压正负平衡。



1. 一种DC-DC变换器,具有:

第一全桥电路,具有由第一高压侧开关以及第一低压侧开关构成的第一支路和由第二高压侧开关以及第二低压侧开关构成的第二支路,在所述第一支路以及所述第二支路施加第一直流电压;

第二全桥电路,具有由第三高压侧开关以及第三低压侧开关构成的第三支路和由第四高压侧开关以及第四低压侧开关构成的第四支路,在所述第三支路以及所述第四支路施加第二直流电压;

变压器,具有与所述第一全桥电路的输入输出部连接的一次绕组以及与所述第二全桥电路的输入输出部连接的二次绕组,对所述第一全桥电路与所述第二全桥电路之间进行绝缘;以及

控制部,控制所述第一全桥电路以及所述第二全桥电路,

所述DC-DC变换器的特征在于,

所述第一高压侧开关由与高压侧线连接的第一开关元件以及与该第一开关元件串联连接的第二开关元件构成,

所述第一低压侧开关由与低压侧线连接的第四开关元件以及与该第四开关元件串联连接的第三开关元件构成,

所述第二高压侧开关由与高压侧线连接的第五开关元件以及与该第五开关元件串联连接的第六开关元件构成,

所述第二低压侧开关由与低压侧线连接的第八开关元件以及与该第八开关元件串联连接的第七开关元件构成,

所述第一全桥电路具有:第一浮动电容器,连接在所述第一开关元件和所述第二开关元件的连接点与所述第三开关元件和所述第四开关元件的连接点之间;以及第二浮动电容器,连接在所述第五开关元件和所述第六开关元件的连接点与所述第七开关元件和所述第八开关元件的连接点之间,

所述DC-DC变换器具备:电感器,串联连接在所述第一全桥电路的输入输出部与所述一次绕组之间或者所述第二全桥电路的输入输出部与所述二次绕组之间的至少一者,

所述控制部使所述第一全桥电路以及所述第二全桥电路的各开关元件以相同的驱动频率动作,且进行全桥动作模式、半桥动作模式、或者五电平动作模式中的任一种控制,

在所述全桥动作模式下,控制所述第一全桥电路的各开关元件,使得历经所述驱动频率的半个周期,所述第一全桥电路的输入输出部的电压的峰值的绝对值成为所述第一直流电压,

在所述半桥动作模式下,控制所述第一全桥电路的各开关元件,使得历经所述半个周期,所述第一全桥电路的输入输出部的电压的峰值的绝对值成为所述第一直流电压的一半,

在所述五电平动作模式下,在所述驱动频率的一个周期的期间中,对使所述第一全桥电路的各开关元件进行全桥动作的状态和进行半桥动作的状态进行切换,并从所述第一全桥电路输出五个电平的电压,

所述控制部在动作模式从所述全桥动作模式、所述半桥动作模式以及所述五电平动作模式中的一种动作模式向另一种动作模式切换的周期,在所述驱动频率的基准周期定时使

所述第一高压侧开关以及所述第二低压侧开关的开关相位偏移,在所述驱动频率的基准周期的半个周期定时使所述第一低压侧开关以及所述第二高压侧开关的开关相位偏移,并且决定所述相位的偏移量,使得在所述动作模式切换的前后所述第一全桥电路的输出电压正负平衡。

2. 根据权利要求1所述的DC-DC变换器,其特征在于,

所述控制部基于决定所述第一高压侧开关或者所述第一低压侧开关的开关相位的U相载波以及U相反转载波、和决定所述第二高压侧开关或者所述第二低压侧开关的开关相位的V相载波以及V相反转载波,决定所述第一全桥电路的各开关元件的开关相位,

所述控制部在所述驱动频率的基准周期定时使所述U相载波以及所述V相反转载波的相位偏移,在所述驱动频率的基准周期的半个周期定时使所述U相反转载波以及所述V相载波的相位偏移。

3. 根据权利要求2所述的DC-DC变换器,其特征在于,

所述U相载波、所述U相反转载波、所述V相载波以及所述V相反转载波为基准时钟的计数值,

所述控制部基于所述计数值与基准值的比较对所述第一全桥电路以及所述第二全桥电路进行控制,

所述相位的偏移量通过所述计数值的变更来决定。

4. 根据权利要求2所述的DC-DC变换器,其特征在于,

所述U相载波、所述U相反转载波、所述V相载波以及所述V相反转载波为基准时钟的计数值,

所述控制部基于所述计数值与基准值的比较对所述第一全桥电路以及所述第二全桥电路进行控制,

所述相位的偏移量通过所述基准值的变更来决定。

DC-DC变换器

技术领域

[0001] 本发明涉及DAB (Dual Active Bridge, 双有源桥) 方式的DC-DC变换器。

背景技术

[0002] 在专利文献1公开了一种DAB方式的变换器。在专利文献1记载的变换器在变压器的一次绕组以及二次绕组分别连接有全桥电路,通过适当地控制两个全桥电路的开关相位差,从而进行电力传输。

[0003] 在先技术文献

[0004] 专利文献

[0005] 专利文献1:美国专利第5355294号说明书

发明内容

[0006] 发明要解决的课题

[0007] 在专利文献1记载的变换器中,利用变压器的漏感和半导体器件的寄生电容进行零电压开关 (Zero Voltage Switching: ZVS),由此可降低开关损耗。但是,与输入输出电压比以及变压器匝数比之差成比例地,ZVS范围受到限制,无效电流增加,因此有可能导致效率下降。特别是,例如在输入输出电压比大、与输出端子连接的负载为小负载的情况下,有时对传输电力没有贡献的无效电流会增加,效率变差。

[0008] 此外,在DAB方式的DC-DC变换器中,由于供给电力的过渡性的变化,有时会在电感器电流和变压器的励磁电流叠加直流分量(直流偏差)。例如,在传输电力急剧变化时、切换了动作模式时,会产生上述直流偏差。为了使得即使存在这样的直流偏差,电感器、变压器也不会磁饱和,需要使用磁性体芯大的,即,体积大的电感器、变压器。这成为装置的大型化以及高成本的主要原因。

[0009] 因此,本发明的目的在于,提供一种如下的DC-DC变换器,即,使得即使在输入输出电压比大且负载变动范围宽的情况下也能够实现ZVS动作,并且抑制由于过渡性的动作状态的变化而产生的直流偏差,消除了装置的大型化以及高成本。

[0010] 用于解决课题的技术方案

[0011] (1) 本发明的DC-DC变换器具有:

[0012] 第一全桥电路,具有由第一高压侧开关以及第一低压侧开关构成的第一支路和由第二高压侧开关以及第二低压侧开关构成的第二支路,在所述第一支路以及所述第二支路施加第一直流电压;

[0013] 第二全桥电路,具有由第三高压侧开关以及第三低压侧开关构成的第三支路和由第四高压侧开关以及第四低压侧开关构成的第四支路,在所述第三支路以及所述第四支路施加第二直流电压;

[0014] 变压器,具有与所述第一全桥电路的输入输出部连接的一次绕组以及与所述第二全桥电路的输入输出部连接的二次绕组,对所述第一全桥电路与所述第二全桥电路之间进

行绝缘;以及

[0015] 控制部,控制所述第一全桥电路以及所述第二全桥电路。

[0016] 所述第一高压侧开关由与高压侧线连接的第一开关元件以及与该第一开关元件串联连接的第二开关元件构成,

[0017] 所述第一低压侧开关由与低压侧线连接的第四开关元件以及与该第四开关元件串联连接的第三开关元件构成,

[0018] 所述第二高压侧开关由与高压侧线连接的第五开关元件以及与该第五开关元件串联连接的第六开关元件构成,

[0019] 所述第二低压侧开关由与低压侧线连接的第八开关元件以及与该第八开关元件串联连接的第七开关元件构成。

[0020] 所述第一全桥电路具有:第一浮动电容器,连接在所述第一开关元件和所述第二开关元件的连接点与所述第三开关元件和所述第四开关元件的连接点之间;以及第二浮动电容器,连接在所述第五开关元件和所述第六开关元件的连接点与所述第七开关元件和所述第八开关元件的连接点之间。

[0021] 具备:电感器,串联连接在所述第一全桥电路的输入输出部与所述一次绕组之间或者所述第二全桥电路的输入输出部与所述二次绕组之间的至少一者。

[0022] 而且,所述控制部使所述第一全桥电路以及所述第二全桥电路的各开关元件以相同的驱动频率动作,且进行全桥动作模式、半桥动作模式、或者五电平动作模式中的任一种控制,

[0023] 在所述全桥动作模式下,控制所述第一全桥电路的各开关元件,使得历经所述驱动频率的半个周期,所述第一全桥电路的输入输出部的电压的峰值的绝对值成为所述第一直流电压,

[0024] 在所述半桥动作模式下,控制所述第一全桥电路的各开关元件,使得历经所述半个周期,所述第一全桥电路的输入输出部的电压的峰值的绝对值成为所述第一直流电压的一半,

[0025] 在所述五电平动作模式下,在所述驱动频率的一个周期的期间中,对使所述第一全桥电路的各开关元件进行全桥动作的状态和进行半桥动作的状态进行切换,并从所述第一全桥电路输出五个电平的电压。

[0026] 进而,所述控制部在动作模式从所述全桥动作模式、所述半桥动作模式以及所述五电平动作模式中的一种动作模式向另一种动作模式切换的周期,在所述驱动频率的基准周期定时使所述第一高压侧开关以及所述第二低压侧开关的开关相位偏移,在所述驱动频率的基准周期的半个周期定时使所述第一低压侧开关以及所述第二高压侧开关的开关相位偏移,并且决定所述相位的偏移量,使得在所述动作模式切换的前后所述第一全桥电路的输出电压正负平衡。

[0027] 根据上述结构,在输入到第一全桥电路的电压被施加于第一浮动电容器、第二浮动电容器的情况下和未被施加于第一浮动电容器、第二浮动电容器的情况下,能够使从第一全桥电路输出的电压不同。即,通过使第一全桥电路以全桥动作模式或者半桥动作模式进行动作,从而即使在输入输出电压比大、与输出部连接的负载的变动范围宽的情况下,与在先技术的结构相比,也能够拓宽ZVS范围,由此抑制对传输没有贡献的无效电流的增加,

使DC-DC变换器高效地动作。

[0028] 此外,构成第一全桥电路的第一支路以及第二支路是四个开关元件串联连接而成的,因此与串联连接了两个开关元件的情况相比,施加于各元件的电压低。因此,无需提高各开关元件的元件耐压。其结果是,各开关元件能够使用接通电阻值低的MOS-FET。

[0029] 所述控制部通过在第一全桥电路的驱动频率的一个周期中对全桥动作模式和半桥动作模式进行切换,从而能够从第一全桥电路输出五个电平的电位,因此,特别是,即使是小负载区域,也能够进行ZVS动作,能够提供一种在输入输出电压比大、与输出部连接的负载的变动范围宽的情况下能够更加高效地动作的DC-DC变换器。

[0030] 除此以外,因为在动作模式的切换前后,第一全桥电路的输出电压正负平衡,所以可抑制电感器电流以及变压器的励磁电流的直流偏差。其结果是,可谋求装置的小型化以及低成本化。

[0031] (2) 优选地,所述控制部基于决定所述第一高压侧开关或者所述第一低压侧开关的开关相位的U相载波以及U相反转载波、和决定所述第二高压侧开关或者所述第二低压侧开关的开关相位的V相载波以及V相反转载波,决定所述第一全桥电路的各开关元件的开关相位,在所述驱动频率的基准周期定时使所述U相载波以及所述V相反转载波的相位偏移,在所述驱动频率的基准周期的半个周期定时使所述U相反转载波以及所述V相载波的相位偏移。

[0032] 根据上述结构,与一次变更第一全桥电路与第二全桥电路的相位差的情况相比,能够抑制动作模式的切换时的直流偏差。

[0033] (3) 优选地,所述U相载波、所述U相反转载波、所述V相载波以及所述V相反转载波为基准时钟的计数值,所述控制部基于所述计数值与基准值的比较对所述第一全桥电路以及所述第二全桥电路进行控制,

[0034] 所述相位的偏移量通过所述计数值的变更来决定。

[0035] 根据上述结构,能够简化相位偏移的控制以及相位的偏移量的设定用的结构。

[0036] (4) 也可以是,所述U相载波、所述U相反转载波、所述V相载波以及所述V相反转载波为基准时钟的计数值,所述控制部基于所述计数值与基准值的比较对所述第一全桥电路以及所述第二全桥电路进行控制,

[0037] 所述相位的偏移量通过所述基准值的变更来决定。

[0038] 根据上述结构,能够简化相位偏移的控制以及相位的偏移量的设定用的结构。

[0039] 发明效果

[0040] 根据本发明,即使在输入输出电压比大、与输出部连接的负载变动宽的情况下,也能够通过切换动作模式来拓宽ZVS动作范围,而且可抑制在动作模式的切换时产生的直流偏差,可得到小型化以及低成本的DC-DC变换器。

附图说明

[0041] 图1是本实施方式涉及的DC-DC变换器1的电路图。

[0042] 图2是按每种动作模式表示全桥电路10的八个开关元件的状态与电压 V_u 、 V_v 、 V_1 的关系、第一浮动电容器 C_{f1} 与第二浮动电容器 C_{f2} 的充放电状态的相对关系的图。

[0043] 图3的(A)、(B)、(C)、(D)是示出图2所示的各状态下的流过全桥电路10的电流的路

径的图。

[0044] 图4的(A)、(B)、(C)、(D)是示出图2所示的各状态下的流过全桥电路10的电流的路径的图。

[0045] 图5的(A)、(B)、(C)、(D)是示出图2所示的各状态下的流过全桥电路10的电流的路径的图。

[0046] 图6的(A)、(B)、(C)、(D)是示出图2所示的各状态下的流过全桥电路10的电流的路径的图。

[0047] 图7是示出图2所示的16种状态之中进行全桥动作模式的组合的图。

[0048] 图8是示出图2所示的16种状态之中进行半桥动作模式的组合的图。

[0049] 图9是示出图2所示的16种状态之中进行五电平动作模式的组合的一部分的图。

[0050] 图10是示出图2所示的16种状态之中进行五电平动作模式的组合的一部分的图。

[0051] 图11是示出图2所示的16种状态之中进行五电平动作模式的组合的一部分的图。

[0052] 图12是表示全桥动作模式、半桥动作模式以及五电平动作模式下的开关元件Q1~Q8的接通/断开状态的波形图。

[0053] 图13是全桥电路10的各位置处的电压 V_u 、 V_v 、 V_1 以及流过电感器L1的电流 i_L 的波形图。

[0054] 图14是示出 α 、 $\beta=0$ 的情况下的全桥电路10的电压 V_u 、 V_v 、 V_1 的电压波形的图。

[0055] 图15是示出 $\alpha=\pi/4$ 、 $\beta=\pi/2$ 的情况下的全桥电路10的电压 V_u 、 V_v 、 V_1 的电压波形的图。

[0056] 图16是示出 $\alpha=\beta=\pi/4$ 的情况下的全桥电路10的电压 V_u 、 V_v 、 V_1 的电压波形的图。

[0057] 图17是示出DC-DC变换器1的输出电力 P_{out} 与输入输出电压比的关系的图。

[0058] 图18的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从半桥动作模式切换到全桥动作模式时的各部分的波形图。图18的(B)是在比较例的DC-DC变换器中动作模式从半桥动作模式切换到全桥动作模式时的各部分的波形图。

[0059] 图19是图18的(A)的主要波形的放大图。

[0060] 图20的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从全桥动作模式切换到半桥动作模式时的各部分的波形图。图20的(B)是在比较例的DC-DC变换器中动作模式从全桥动作模式切换到半桥动作模式时的各部分的波形图。

[0061] 图21是图20的(A)的主要波形的放大图。

[0062] 图22的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从全桥动作模式切换到五电平动作模式时的各部分的波形图。图22的(B)是其比较例的波形图。

[0063] 图23的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从五电平动作模式切换到全桥动作模式时的各部分的波形图。图23的(B)是其比较例的波形图。

[0064] 图24的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从半桥动作模式切换到五电平动作模式时的各部分的波形图。图24的(B)是其比较例的波形图。

[0065] 图25的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从五电平动作模式切换到半桥动作模式时的各部分的波形图。图25的(B)是其比较例的波形图。

[0066] 图26是示出在本实施方式的DC-DC变换器中传输电力发生了变化时的相位偏移前后的各部分的波形的图。

[0067] 图27是示出各载波和作为其比较对象的基准值的变化等的波形图。

具体实施方式

[0068] 以下说明的DC-DC变换器是如下的绝缘型双向DC-DC变换器,即,两个全桥电路通过变压器相互绝缘,在两个全桥电路之间双向地传输电力。

[0069] 图1是本实施方式涉及的DC-DC变换器1的电路图。

[0070] DC-DC变换器1具备输入输出端子I01、I02、I03、I04。在输入输出端子I01、I02、I03、I04连接负载以及直流电源。DC-DC变换器1是如下的双向的DC-DC变换器,即,对从输入输出端子I01、I02或者输入输出端子I03、I04中的一方输入的直流电压进行变压,并向另一方输出。

[0071] 在输入输出端子I01、I02连接有输入电容器C1以及全桥电路10。全桥电路10将第一开关元件Q1、第二开关元件Q2、第三开关元件Q3以及第四开关元件Q4的第一串联电路(第一支路)和第五开关元件Q5、第六开关元件Q6、第七开关元件Q7以及第八开关元件Q8的第二串联电路(第二支路)并联连接而构成。

[0072] 由与高压侧线连接的第一开关元件Q1以及与该第一开关元件Q1串联连接的第二开关元件Q2构成了第一高压侧开关。此外,由与低压侧线连接的第四开关元件Q4以及与该第四开关元件Q4串联连接的第三开关元件Q3构成了第一低压侧开关。此外,由与高压侧线连接的第五开关元件Q5以及与该第五开关元件Q5串联连接的第六开关元件Q6构成了第二高压侧开关。进而,由与低压侧线连接的第八开关元件Q8以及与该第八开关元件Q8串联连接的第七开关元件Q7构成了第二低压侧开关。

[0073] 第一开关元件Q1~第八开关元件Q8为n型MOS-FET,形成有体二极管以及寄生电容。此外,第一开关元件Q1~第八开关元件Q8的栅极与控制部31连接,从控制部31被施加栅极电压,进行开关控制。另外,以下,第一开关元件Q1~第八开关元件Q8简称为开关元件Q1~Q8。

[0074] 以往的一般的全桥电路是将串联连接了两个开关元件的串联电路进行并联连接而构成的。相对于此,在本实施方式中,构成全桥电路10的第一串联电路以及第二串联电路分别是将四个开关元件串联连接而成的,因此与串联连接了两个开关元件的构造相比,施加于各元件的电压低。因此,无需提高各开关元件的元件耐压。一般来说,耐压高的开关元件的接通电阻值大,因此各开关元件能够使用接通电阻值低的MOS-FET。

[0075] 全桥电路10具备第一浮动电容器Cf1和第二浮动电容器Cf2。第一浮动电容器Cf1连接在第一开关元件Q1和第二开关元件Q2的连接点与第三开关元件Q3和第四开关元件Q4的连接点之间。第二浮动电容器Cf2连接在第五开关元件Q5和第六开关元件Q6的连接点与第七开关元件Q7和第八开关元件Q8的连接点之间。

[0076] 全桥电路10相当于本发明涉及的“第一全桥电路”。第一浮动电容器相当于本发明涉及的“第一浮动电容器”,第二浮动电容器相当于本发明涉及的“第二浮动电容器”。

[0077] 在输入输出端子I03、I04连接有输入电容器C2以及全桥电路20。全桥电路20将串联连接的第九开关元件Q9以及第十开关元件Q10的串联电路(第三支路)和串联连接的第十一开关元件Q11以及第十二开关元件Q12的串联电路(第四支路)并联连接而构成。这些第九开关元件Q9~第十二开关元件Q12为n型MOS-FET,形成有体二极管以及寄生电容。此外,第

九开关元件Q9~第十二开关元件Q12的栅极与控制部32连接,从控制部32被施加栅极信号,进行开关控制。全桥电路20相当于本发明涉及的“第二全桥电路”。

[0078] 进而,在输入输出端子I03、I04设置有输出电压检测电路21以及负载电流检测电路22。

[0079] 在全桥电路10与全桥电路20之间连接有变压器T1。变压器T1具有一次绕组n1和二次绕组n2。一次绕组n1的一端经由电感器L1连接于第二开关元件Q2和第三开关元件Q3的连接点U,另一端连接于第六开关元件Q6和第七开关元件Q7的连接点V。二次绕组n2的一端连接于第九开关元件Q9和第十开关元件Q10的连接点W,另一端连接于第十一开关元件Q11和第十二开关元件Q12的连接点X。在本实施方式中,一次绕组n1和二次绕组n2的匝数比设为N:1。

[0080] 在像这样构成的DC-DC变换器1中,控制部31利用各开关元件Q1~Q8的寄生电容与电感器(谐振线圈)L1的谐振,以零电压开关来控制全桥电路10。即,在开关元件的接通断开切换时的死区时间的期间中,使流过电感器L1的电流流过开关元件的寄生电容,将寄生电容放电,以零电压开启开关元件。由此,能够降低开关损耗、开关噪声等。另外,电感器L1也可以设置在变压器T1的二次侧。也可以不使用电感器L1,利用变压器T1的漏感与各开关元件Q1~Q8的寄生电容的谐振进行零电压开关。

[0081] 在像这样构成的DC-DC变换器1的输入输出端子I01、I02施加直流电压 V_{in} 。控制部31对全桥电路10的各开关元件Q1~Q8进行开关控制。在变压器T1的一次绕组n1施加0、 $\pm V_{in}/2$ 、 $\pm V_{in}$ 这五个电平的电压 V_1 。若在一次绕组n1施加电压 V_1 ,则在二次绕组n2感应出电压。控制部32对全桥电路20进行开关控制,从输入输出端子I03、I04输出0、 $V_{in}/2N$ 、 V_{in}/N 的直流电压 V_{out} 。即,全桥电路10是输出五个电压电平的五电平电路。此外,全桥电路20是输出三个电压电平的三电平电路。

[0082] 另外,因为DC-DC变换器1是双向型的DC-DC变换器,所以在从输入输出端子I03、I04输入直流电压的情况下,对全桥电路10、20进行开关控制,从输入输出端子I01、I02输出直流电压。

[0083] 图2是按每种动作模式示出全桥电路10的八个开关元件的状态与电压 V_u 、 V_v 、 V_1 的关系、第一浮动电容器 C_{f1} 与第二浮动电容器 C_{f2} 的充放电状态的相对关系的图。电压 V_u 为开关元件Q2、Q3的连接点U的电压。电压 V_v 为开关元件Q6、Q7的连接点V的电压。电压 V_1 为施加于变压器T1的一次绕组n1的、来自全桥电路10的输出电压,是连接点U与连接点V的电位差。图3的(A)、(B)、(C)、(D)、图4的(A)、(B)、(C)、(D)、图5的(A)、(B)、(C)、(D)、图6的(A)、(B)、(C)、(D)是示出图2所示的各状态下的流过全桥电路10的电流的路径的图。

[0084] 本实施方式涉及的全桥电路10以全桥动作模式、半桥动作模式以及五电平动作模式中的任一种进行动作。所谓全桥动作模式,是设为电压 $V_1 = \pm V_{in}$ 的动作模式。在该全桥动作模式下,电流路径不经由第一浮动电容器以及第二浮动电容器中的任一者。所谓半桥动作模式,是设为电压 $V_1 = \pm V_{in}/2$ 的动作模式。在该半桥动作模式下,电流路径仅经由第一浮动电容器以及第二浮动电容器中的任一者。所谓五电平动作模式,是将全桥动作模式和半桥动作模式进行组合而设为电压 $V_1 = 0, \pm V_{in}/2, \pm V_{in}$ 的动作模式。

[0085] ($V_1 = V_{in}$)

[0086] 在开关元件Q1、Q2、Q7、Q8接通(ON)、开关元件Q3、Q4、Q5、Q6断开(OFF)的状态下,以

图3的(A)所示的路径流过电流。该情况下的输出电压 V_1 为 V_{in} 。在该情况下,电压 $V_u = V_{in}$,电压 $V_v = 0$,电压 $V_1 = V_u - V_v = V_{in}$ 。

[0087] ($V_1 = -V_{in}$)

[0088] 在开关元件Q3、Q4、Q5、Q6接通、开关元件Q1、Q2、Q7、Q8断开的状态下,以图3的(B)所示的路径流过电流。在该情况下,在变压器T1的一次绕组n1施加极性与图3的(A)的情况相反的电压,电压 $V_u = 0$,电压 $V_v = V_{in}$,电压 $V_1 = V_u - V_v = -V_{in}$ 。

[0089] ($V_1 = 0$)

[0090] 在开关元件Q1、Q3、Q6、Q8接通、开关元件Q2、Q4、Q5、Q7断开的状态下,以图3的(C)所示的路径流过电流。在该情况下,电压 $V_u = V_{in} - V_{c1}$ 。在此, V_{c1} 为第一浮动电容器Cf1的充电电压。若设 $V_{c1} = V_{in}/2$,则电压 $V_u = V_{in}/2$ 。此外,电压 $V_v = V_{c2}$ 。在此, V_{c2} 为第二浮动电容器Cf2的充电电压。若设 $V_{c2} = V_{in}/2$,则电压 $V_u = V_{in}/2$ 。而且,电压 $V_1 = V_u - V_v = 0$ 。

[0091] 此外,在开关元件Q2、Q4、Q5、Q7接通、开关元件Q1、Q3、Q6、Q8断开的状态下,以图3的(D)所示的路径流过电流。在该情况下,电压 $V_u = V_{in} - V_{c1} = V_{in}/2$,电压 $V_v = V_{in} - V_{c2} = V_{in}/2$,电压 $V_1 = V_u - V_v = 0$ 。

[0092] 除此以外,在开关元件Q2、Q4、Q6、Q8接通、开关元件Q1、Q3、Q5、Q7断开的情况下,以图4的(A)以及图4的(B)所示的路径流过电流。在该情况下,也成为电压 $V_1 = 0$,但是电流流过的方向在图4的(A)和图4的(B)中变得相反。这根据第一浮动电容器Cf1与第二浮动电容器Cf2的相对的充放电状态而不同。

[0093] 进而,在开关元件Q1、Q2、Q5、Q6接通、开关元件Q3、Q4、Q7、Q8断开的情况下,如图4的(C)所示,也成为电压 $V_1 = 0$,在开关元件Q3、Q4、Q7、Q8接通、开关元件Q1、Q2、Q5、Q6断开的情况下,如图4的(D)所示,也成为电压 $V_1 = 0$ 。

[0094] ($V_1 = V_{in}/2$)

[0095] 在开关元件Q1、Q3、Q7、Q8接通、开关元件Q2、Q4、Q5、Q6断开的状态下,以图5的(A)所示的路径流过电流。在该情况下,电压 $V_u = V_{in} - V_{c1} = V_{in}/2$,电压 $V_v = 0$,电压 $V_1 = V_u - V_v = V_{in}/2$ 。此外,在开关元件Q2、Q4、Q7、Q8接通、开关元件Q1、Q3、Q5、Q6断开的状态下,以图5的(B)所示的路径流过电流。在该情况下,电压 $V_u = V_{c1} = V_{in}/2$,电压 $V_v = 0$,电压 $V_1 = V_u - V_v = V_{in}/2$ 。另外,电压 V_u 是在图5的(A)的状态时充电到第一浮动电容器Cf1的电压 V_{c1} 。

[0096] 此外,在开关元件Q1、Q2、Q6、Q8接通、开关元件Q3、Q4、Q5、Q7断开的状态下,以图5的(C)所示的路径流过电流。进而,在开关元件Q1、Q2、Q5、Q7接通、开关元件Q3、Q4、Q6、Q8断开的情况下,以图5的(D)所示的路径流过电流,也成为电压 $V_1 = V_{in}/2$ 。另外,该情况下的电压 V_u 是在图5的(C)的状态时充电到第二浮动电容器Cf2的电压 V_{c2} 。

[0097] ($V_1 = -V_{in}/2$)

[0098] 在开关元件Q3、Q4、Q5、Q7接通、开关元件Q1、Q2、Q6、Q8断开的状态下,以图6的(A)所示的路径流过电流。在该情况下,电压 $V_u = 0$,电压 $V_v = V_{in} - V_{c2} = V_{in}/2$,电压 $V_1 = V_u - V_v = -V_{in}/2$ 。此外,在开关元件Q3、Q4、Q6、Q8接通、开关元件Q1、Q2、Q5、Q7断开的状态下,以图6的(B)所示的路径流过电流。在该情况下,电压 $V_u = 0$,电压 $V_v = V_{c2} = V_{in}/2$,电压 $V_1 = V_u - V_v = -V_{in}/2$ 。另外,电压 V_v 是在图6的(A)的状态时充电到第二浮动电容器Cf2的电压 V_{c2} 。

[0099] 进而,在开关元件Q2、Q4、Q5、Q6接通、开关元件Q1、Q3、Q7、Q8断开的状态下,以图6的(C)所示的路径流过电流,成为电压 $V_1 = -V_{in}/2$ 。进而,在开关元件Q1、Q3、Q5、Q6接通、开

关元件Q2、Q4、Q7、Q8断开的状态下,以图6的(D)所示的路径流过电流,成为电压 $V1 = -V_{in}/2$ 。另外,在该情况下,电压 V_v 是在图6的(C)的状态时充电到第一浮动电容器 C_{f1} 的电压 V_{c1} 。

[0100] 像这样,全桥电路10以全桥动作模式、半桥动作模式以及五电平动作模式中的一种进行动作。在五电平动作模式下,五个电压电平的输出期间根据成为电压 $V_u = V_{in}/2$ 的期间与电压 V_u 、 V_v 的相位差来决定。

[0101] 在以全桥动作模式进行动作的情况下,在驱动频率的一个周期内,电压 $V1$ 进行 $V1 \rightarrow -V1 \rightarrow V1 \rightarrow -V1 \rightarrow \dots$ 这样的转变。图7是图2所示的16种状态之中满足上述的条件的组合的例子。也就是说,交替地重复状态(7)和状态(8)。

[0102] 在以半桥动作模式进行动作的情况下,在驱动频率的一个周期内,电压 $V1$ 进行 $V1/2 \rightarrow -V1/2 \rightarrow V1/2 \rightarrow -V1/2 \rightarrow \dots$ 这样的转变。图8是图2所示的16种状态之中满足上述的条件的组合的例子。也就是说,在半桥动作模式下,如图8所示,具有12种组合。在以五电平动作模式进行动作的情况下,在驱动频率的一个周期内,电压 $V1$ 进行 $0 \rightarrow V_{in}/2 \rightarrow V_{in} \rightarrow V_{in}/2 \rightarrow 0 \rightarrow -V_{in}/2 \rightarrow -V_{in} \rightarrow -V_{in}/2 \rightarrow 0$ 这样的转变。将图2所示的16种状态之中满足上述的条件的组合的例子示于图9、图10以及图11。图9、图10以及图11是示出在五电平动作模式下图2所示的动作模式的“一个开关周期内”的转变式样的图。

[0103] 图12是表示全桥动作模式、半桥动作模式以及五电平动作模式下的开关元件Q1~Q8的接通/断开状态的波形图。

[0104] 图13是全桥电路10的各位置处的电压 V_u 、 V_v 、 $V1$ 以及流过电感器L1的电流 i_L 的波形图。在图13中,相位0相当于后面叙述的基准载波峰定时(peak timing),相位 π 相当于后面叙述的基准载波谷定时(bottom timing)。

[0105] 图13所示的 α 是在一个周期中成为电压 $V_u = V_{in}/2$ 的期间。此外, β 为电压 V_u 、 V_v 的相位差。成为电压 $V1 = 0$ 的期间为 $2\alpha - \beta$,成为电压 $V1 = V_{in}/2$ 的期间为 2β ,成为电压 $V1 = V_{in}$ 的期间为 $\pi - 2\alpha - \beta$ 。通过这些 α 、 β 的值来决定五个电平的各电压的输出期间。

[0106] 在图13还示出全桥电路20的开关元件Q9~Q12的开关定时。控制部32使开关元件Q9、Q12和开关元件Q10、Q11以50%的占空比进行接通断开。 δ 为全桥电路10、20的开关相位差。DC-DC变换器1的传输电力通过 α 、 β 、 δ 来控制。特别是,即使在相同的动作模式下,通过改变 δ ,从而第二全桥电路20的接通占空比也会变化,因此控制部32通过调节 δ 而将输出电压保持为规定值。

[0107] 此外,在对全桥电路10进行开关控制而使得 α 、 $\beta = 0$ 的情况下,成为电压 $V1 = \pm V_{in}$ 。图14是示出 α 、 $\beta = 0$ 的情况下的全桥电路10的电压 V_u 、 V_v 、 $V1$ 的电压波形的图。如图14所示,全桥电路10以全桥动作模式进行动作。

[0108] 此外,在对全桥电路10进行开关控制而使得 $\alpha = \pi/4$ 、 $\beta = \pi/2$ 的情况下,成为电压 $V1 = \pm V_{in}/2$ 。图15是示出 $\alpha = \pi/4$ 、 $\beta = \pi/2$ 的情况下的全桥电路10的电压 V_u 、 V_v 、 $V1$ 的电压波形的图。如图15所示,全桥电路10以半桥动作模式进行动作。

[0109] 进而,在对全桥电路10进行开关控制而使得 $\alpha = \beta = \pi/4$ 的情况下,如图16所示,电压 $V1$ 以在 $\pm V_{in}$ 、 $\pm V_{in}/2$ 、0之间呈阶梯状转变的五电平动作模式进行动作。

[0110] 本实施方式涉及的DC-DC变换器1输出三个电压电平,因此能够根据连接在DC-DC变换器1的负载的负载变动而使DC-DC变换器1高效率地动作。在一般的绝缘型的二电平DC-DC变换器的情况下,ZVS范围由输入输出电压比和变压器的匝数比限制。因此,在输入输出

电压比大的情况下,在二电平DC-DC变换器连接了小负载的负载时,会偏离ZVS动作范围,因此有可能无法进行ZVS动作。其结果是,对传输电力没有贡献的无效电流增加,DC-DC变换器的传输效率变差。相对于此,在本实施方式中,根据负载变动来决定DC-DC变换器1的动作模式,由此能够高效率地动作。以下,对决定全桥电路10的动作模式的方法进行说明。

[0111] 图17是示出DC-DC变换器1的输出电力 P_{out} 与输入输出电压比的关系的图。输入输出电压比能够用 NV_{out}/V_{in} 表示。另外, N 为变压器T1的一次绕组 n_1 与二次绕组 n_2 的匝数比($N:1$)。区域(1)为全桥动作模式的控制范围,区域(2)为半桥动作模式的控制范围,区域(3)为五电平动作模式的控制范围。

[0112] 例如,在 $NV_{out}/V_{in}=1.0$ 的情况下,DC-DC变换器1的动作模式设为全桥动作模式。在 $NV_{out}/V_{in}<0.6$ 的情况下,且在除上述的区域(3)以外的区域中,DC-DC变换器1的动作模式设为半桥动作模式。在 $NV_{out}/V_{in}<1.0$ 且不适用上述的区域(1)、(2)的区域中,DC-DC变换器1的动作模式设为五电平动作模式。

[0113] 像这样,通过设为与输入输出电压比以及输出电力 P_{out} 相应的动作模式,从而能够在宽的负载变动范围进行ZVS动作,因此能够抑制无效电流,能够使DC-DC变换器1高效率地动作。此外,即使在以往的二电平DC-DC变换器中不能进行零电压开关的区域(3)中,在本实施方式中,也变得能够进行零电压开关,能够进行宽的负载变动范围的零电压开关。

[0114] 另外,例如,在半桥动作模式下,也可以代替使开关元件Q1、Q3、Q7、Q8和开关元件Q2、Q4、Q5、Q6交替地接通断开的方法而进行使开关元件Q1、Q2、Q6、Q8和开关元件Q3、Q4、Q5、Q7交替地接通断开的开关控制。在该情况下,在第二浮动电容器 C_{f2} 流过电流,由此成为电压 $V1 = \pm V_{in}/2$ 。

[0115] 接着,示出动作模式的切换时的相位偏移控制。

[0116] 图18的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从半桥动作模式切换到全桥动作模式时的各部分的波形图。图18的(B)是在比较例的DC-DC变换器中动作模式从半桥动作模式切换到全桥动作模式时的各部分的波形图。图19是图18的(A)的主要波形的放大图。

[0117] 此外,图20的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从全桥动作模式切换到半桥动作模式时的各部分的波形图。图20的(B)是在比较例的DC-DC变换器中动作模式从全桥动作模式切换到半桥动作模式时的各部分的波形图。图21是图20的(A)的主要波形的放大图。

[0118] 另外,在图18的(A)、(B)、图19、图20的(A)、(B)中,电压 $V2$ 为第二全桥电路20的输入电压。此外,在图19、图21中,基准载波的峰定时为驱动频率的基准周期定时,基准载波的谷定时为驱动频率的基准周期的半个周期定时。

[0119] 在图18的(A)、(B)、图19、图20的(A)、(B)、图21中,U相载波以及U相反转载波是决定第一高压侧开关Q1、Q2或者第一低压侧开关Q3、Q4的开关相位的值,V相载波以及V相反转载波是决定第二高压侧开关Q5、Q6或者第二低压侧开关Q7、Q8的开关相位的值。此外,W相载波是决定第三高压侧开关Q9以及第四低压侧开关Q12的开关相位的值,X相载波是决定第三低压侧开关Q10以及第四高压侧开关Q11的开关相位的值。

[0120] 比较例的DC-DC变换器构成为在动作模式的切换时使U相载波、U相反转载波、V相载波、V相反转载波进行相位偏移。

[0121] 在图18的(A)、(B)、图20的(A)、(B)中,U相载波、U相反转载波、V相载波、V相反转载波分别是基准时钟的计数值,在此,将这些值表示为三角波状的波形。此外,在三角波状的波形叠加表示的水平方向的虚线是与这些载波进行大小比较的基准值。

[0122] 如图19、图21所示,本实施方式的DC-DC变换器1的动作模式的切换在基准载波的峰定时进行。而且,U相载波在该基准载波的峰定时进行相位偏移。此外,U相反转载波在基准载波的谷定时进行相位偏移。

[0123] 上述载波的相位偏移通过将上述基准时钟的计数值与对应于相位偏移量的值相加或相减来进行。

[0124] 在图19所示的例子中,在从半桥动作模式(HB)切换到全桥动作模式(FB)时,U相载波向滞后方向进行 $\gamma/2$ 的相位偏移,V相反转载波向超前方向进行 $\gamma/2$ 的相位偏移。此外,U相反转载波向滞后方向进行 $\gamma/2$ 的相位偏移,V相载波向超前方向进行 $\gamma/2$ 的相位偏移。

[0125] 在图21所示的例子中,在从全桥动作模式(FB)切换到半桥动作模式(HB)时,U相载波向超前方向进行 $\gamma/2$ 的相位偏移,V相反转载波向滞后方向进行 $\gamma/2$ 的相位偏移。此外,U相反转载波向超前方向进行 $\gamma/2$ 的相位偏移,V相载波向滞后方向进行 $\gamma/2$ 的相位偏移。

[0126] 在此, γ 是伴随着动作模式的切换而产生的、相对于U相与V相之间的开关相位差的新的相位偏移量。像这样,通过使各载波在驱动频率的一个周期内分两次(每隔半个周期)进行相位偏移,从而动作模式切换时的第一全桥电路10的输出电压V1的正负的电压时间积之差变小。即,能够抑制动作模式切换时的直流偏差。

[0127] 对图18的(A)的电感器电流*i*_L和图18的(B)的电感器电流*i*_L进行比较可知,抑制了纹波以及直流偏差。同样地,对图20的(A)的电感器电流*i*_L和图20的(B)的电感器电流*i*_L进行比较可知,抑制了直流偏差。

[0128] 不仅是从全桥动作模式(FB)切换到半桥动作模式(HB)时或者从半桥动作模式(HB)切换到全桥动作模式(FB)时,而且如以后所示,在其它动作模式之间的切换时,也同样能够抑制直流偏差。

[0129] 图22的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从全桥动作模式切换到五电平动作模式时的各部分的波形图。图22的(B)是在比较例的DC-DC变换器中动作模式从全桥动作模式切换到五电平动作模式时的各部分的波形图。

[0130] 图23的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从五电平动作模式切换到全桥动作模式时的各部分的波形图。图23的(B)是在比较例的DC-DC变换器中动作模式从五电平动作模式切换到全桥动作模式时的各部分的波形图。

[0131] 图24的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从半桥动作模式切换到五电平动作模式时的各部分的波形图。图24的(B)是在比较例的DC-DC变换器中动作模式从半桥动作模式切换到五电平动作模式时的各部分的波形图。

[0132] 图25的(A)是在本实施方式的DC-DC变换器中动作模式从五电平动作模式切换到半桥动作模式时的各部分的波形图。图25的(B)是在比较例的DC-DC变换器中动作模式从五电平动作模式切换到半桥动作模式时的各部分的波形图。

[0133] 另外,在图22的(A)、(B)、图23的(A)、(B)、图24的(A)、(B)、图25的(A)、(B)中,电压V₂为第二全桥电路20的输入电压。

[0134] 接着,示出在动作模式不变的状态下传输电力发生了变化时的相位偏移控制。

[0135] 图26是示出在本实施方式的DC-DC变换器中传输电力发生了变化时的相位偏移前后的各部分的波形的图。如该图所示,在基准载波的峰定时进行U相载波、V相反转载波、W相载波的相位偏移,在基准载波的谷定时进行U相反转载波、V相载波、X相载波的相位偏移。

[0136] 接着,示出基于使载波的相位偏移的方法以外的方法的相位偏移方法的例子。

[0137] 图27是示出各载波和作为其比较对象的基准值的变化等的波形图。在此,特别示出用于使第一高压侧开关Q1、Q2以及第一低压侧开关Q3、Q4的开关相位偏移的部分。在图27中,U相载波以基准载波峰定时为基准而生成,U相反转载波以基准载波谷定时为基准而生成。U相载波以及U相反转载波为基准时钟的计数值,在此,将这些值表示为三角波状的波形。在这些三角波状的波形叠加表示的矩形波状的虚线是与这些载波进行大小比较的基准值。

[0138] 关于第二高压侧开关(Q5、Q6)、第二低压侧开关(Q7、Q8)的开关相位的偏移也是同样的。

[0139] 像这样,也可以通过使基准值与载波的周期同步地变动,从而使第一高压侧开关Q1、Q2以及第一低压侧开关Q3、Q4的开关相位偏移。

[0140] 决定上述的动作模式的切换时的相位偏移的偏移量以及传输电力变更时的相位偏移的偏移量,使得在相位偏移控制的前后第一全桥电路的输出电压正负平衡。换言之,进行相位偏移,使得在动作模式切换的前后,积蓄在电感器的能量接近正负同量。此外,这也意味着,在动作模式切换的前后,向流过电感器L1的电流转变为减少的方向进行相位偏移。

[0141] 虽然在以上所示的例子中,DC-DC变换器1的全桥电路10设为以全桥动作模式、半桥动作模式、以及五电平动作模式中的任一种进行动作的结构,但是全桥电路10也可以是以全桥动作模式或者半桥动作模式进行动作的结构。即使在该情况下,也无需设置全桥电路和半桥电路这两个电路,因此也能够抑制大型化。

[0142] 另外,虽然在上述的实施方式中,全桥动作模式下的施加于变压器的第一绕组的两端的电压设为直流电压 V_{in} ,半桥动作模式下的施加于变压器的第一绕组的两端的电压设为直流电压的一半($V_{in}/2$),但是它们也可以包含一些误差。例如,还包含如下情况,即,直流电压 V_{in} 、 $V_{in}/2$ 由于FET的寄生电容的偏差、制造误差等而变动。

[0143] 虽然在图1所示的例子中,在变压器T1的一次侧连接了电感器L1,但是也可以在二次侧连接电感器。此外,也可以在一次侧和二次侧的双方连接电感器。

[0144] 附图标记说明

[0145] C1:输入电容器;

[0146] C2:输入电容器;

[0147] Cf1:第一浮动电容器;

[0148] Cf2:第二浮动电容器;

[0149] I01、I02、I03、I04:输入输出端子;

[0150] L1:电感器;

[0151] n1:一次绕组;

[0152] n2:二次绕组;

[0153] Q1~Q12:开关元件;

[0154] Q1、Q2:第一高压侧开关;

- [0155] Q3、Q4: 第一低压侧开关;
- [0156] Q5、Q6: 第二高压侧开关;
- [0157] Q7、Q8: 第二低压侧开关;
- [0158] Q9: 第三高压侧开关;
- [0159] Q10: 第三低压侧开关;
- [0160] Q11: 第四高压侧开关;
- [0161] Q12: 第四低压侧开关;
- [0162] T1: 变压器;
- [0163] U: 连接点;
- [0164] V: 连接点;
- [0165] W: 连接点;
- [0166] X: 连接点;
- [0167] 1: DC-DC变换器;
- [0168] 10: 第一全桥电路;
- [0169] 20: 第二全桥电路;
- [0170] 21: 输出电压检测电路;
- [0171] 22: 负载电流检测电路;
- [0172] 31、32: 控制部。

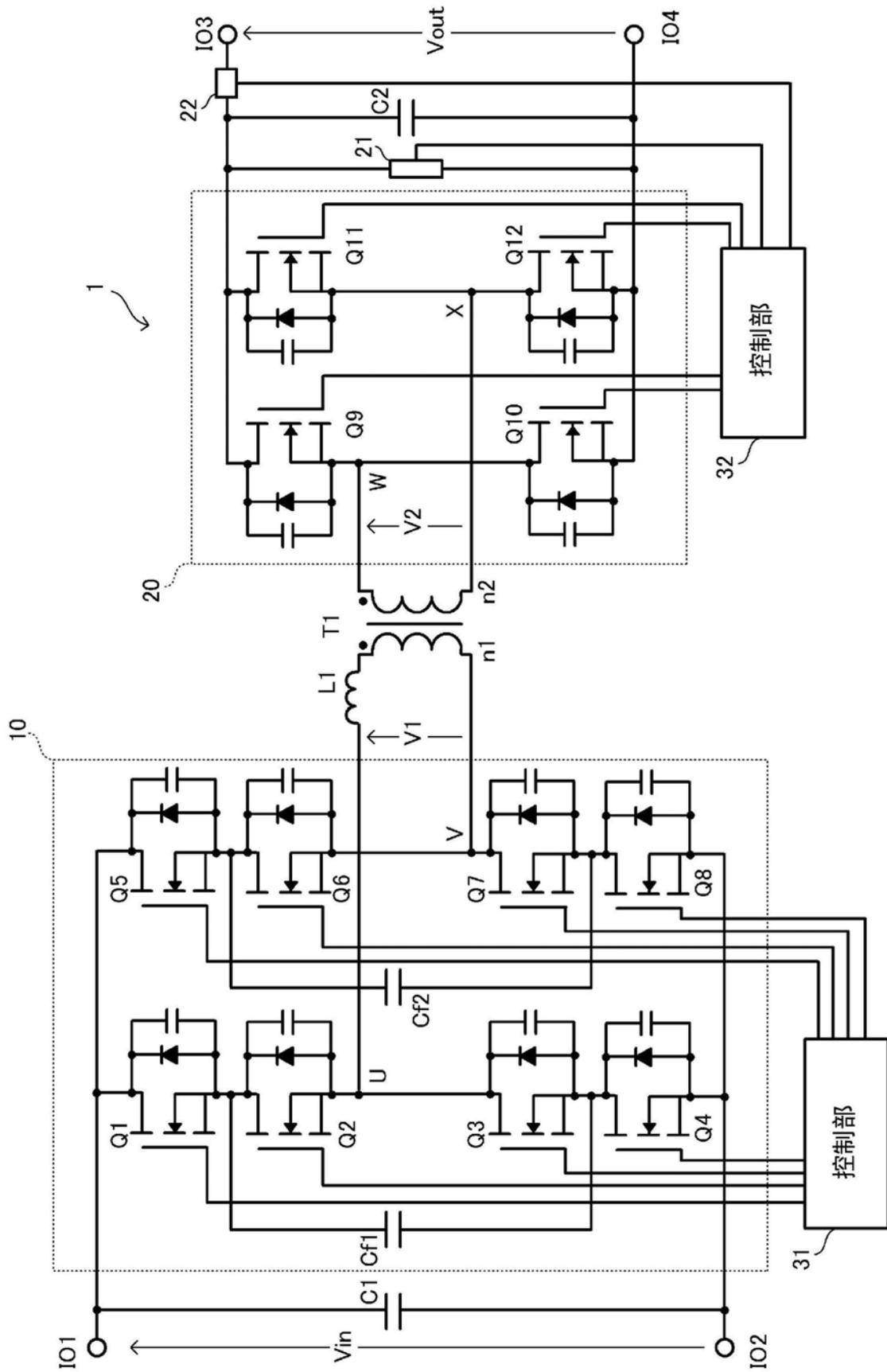


图1

| 状态 | V1 | Vu | Vv | Cf1 | Cf2 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q6 | Q7 | Q8 | |
|-----|--------|--------|-------|-------|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0电平 | 0 | Vin/2 | Vin/2 | 充电 | 充电 | 接通 | 断开 | 接通 | 断开 | 断开 | 接通 | 断开 | 接通 | |
| | | Vin/2 | Vin/2 | 充电 | 充电 | 断开 | 接通 | 断开 | 接通 | 接通 | 断开 | 接通 | 断开 | |
| | | Vin/2 | Vin/2 | 放电 | 充电 | 断开 | 接通 | 断开 | 接通 | 断开 | 断开 | 接通 | 断开 | |
| | | Vin/2 | Vin/2 | 充电 | 放电 | 断开 | 接通 | 断开 | 接通 | 断开 | 断开 | 接通 | 断开 | |
| 全桥 | Vin | 0 | Vin | 无变化 | 无变化 | 接通 | 接通 | 断开 | 断开 | 断开 | 断开 | 断开 | 断开 | |
| | | 0 | Vin | 无变化 | 无变化 | 断开 | 断开 | 接通 | 接通 | 断开 | 断开 | 接通 | 接通 | |
| | | Vin | 0 | 无变化 | 无变化 | 接通 | 接通 | 断开 | 断开 | 断开 | 断开 | 接通 | 接通 | |
| | | 0 | Vin | 无变化 | 无变化 | 断开 | 断开 | 接通 | 接通 | 断开 | 断开 | 断开 | 断开 | |
| 半桥 | Vin/2 | 0 | Vin/2 | 无变化 | 充电 | 接通 | 接通 | 断开 | 断开 | 断开 | 接通 | 断开 | 接通 | |
| | | 0 | Vin/2 | 无变化 | 放电 | 接通 | 接通 | 断开 | 断开 | 断开 | 断开 | 接通 | 断开 | |
| | | 0 | Vin/2 | 充电 | 无变化 | 接通 | 断开 | 接通 | 断开 | 断开 | 断开 | 接通 | 接通 | |
| | | 0 | Vin/2 | 放电 | 无变化 | 断开 | 接通 | 断开 | 接通 | 断开 | 断开 | 接通 | 接通 | |
| | -Vin/2 | -Vin/2 | 0 | Vin/2 | 无变化 | 充电 | 断开 | 断开 | 接通 | 接通 | 断开 | 断开 | 接通 | 断开 |
| | | | 0 | Vin/2 | 无变化 | 放电 | 断开 | 断开 | 接通 | 接通 | 断开 | 断开 | 接通 | 断开 |
| | | | 0 | Vin/2 | 充电 | 无变化 | 断开 | 断开 | 接通 | 接通 | 断开 | 断开 | 接通 | 断开 |
| | | | 0 | Vin/2 | 放电 | 无变化 | 断开 | 断开 | 接通 | 接通 | 断开 | 断开 | 接通 | 断开 |

图2

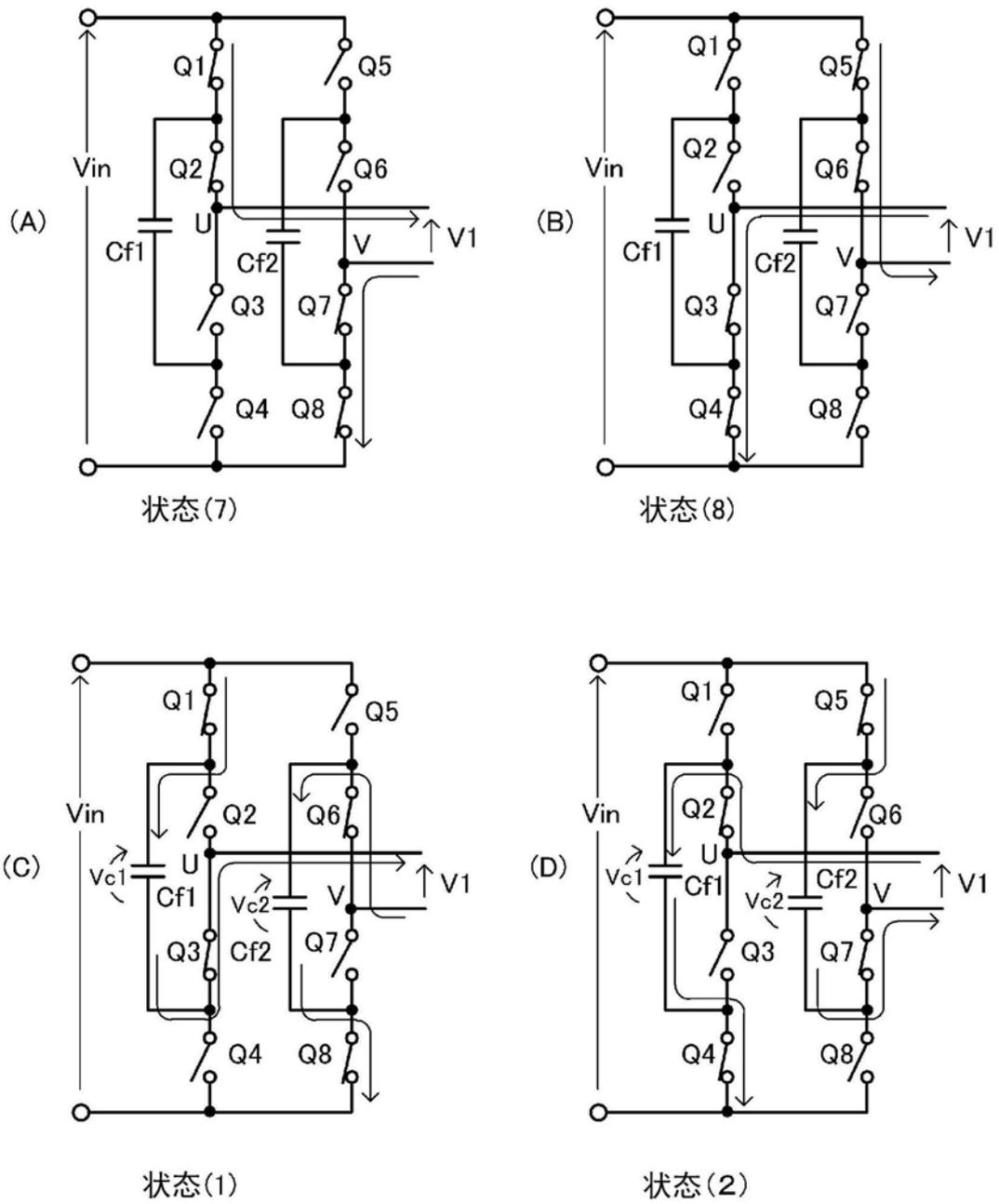


图3

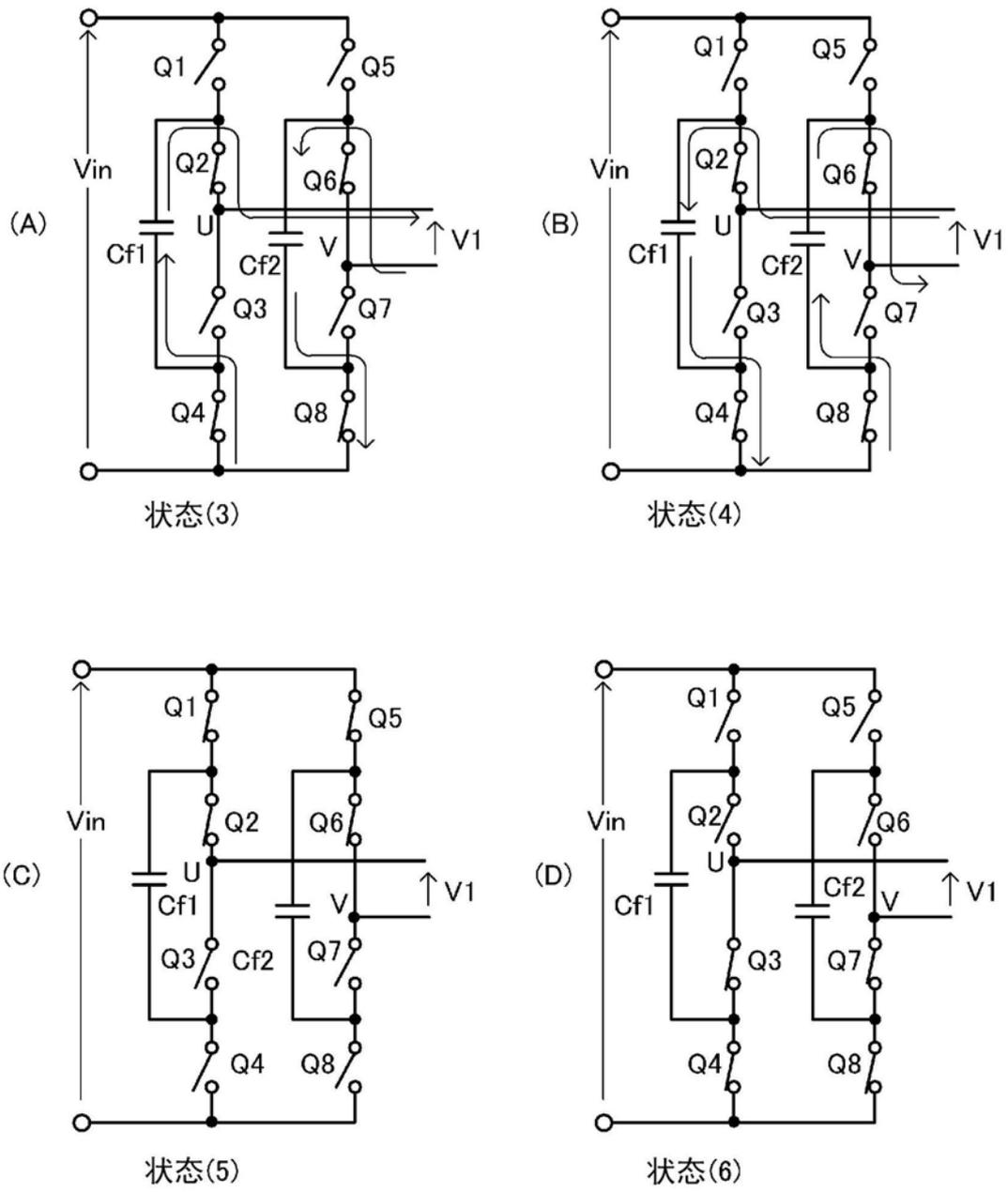


图4

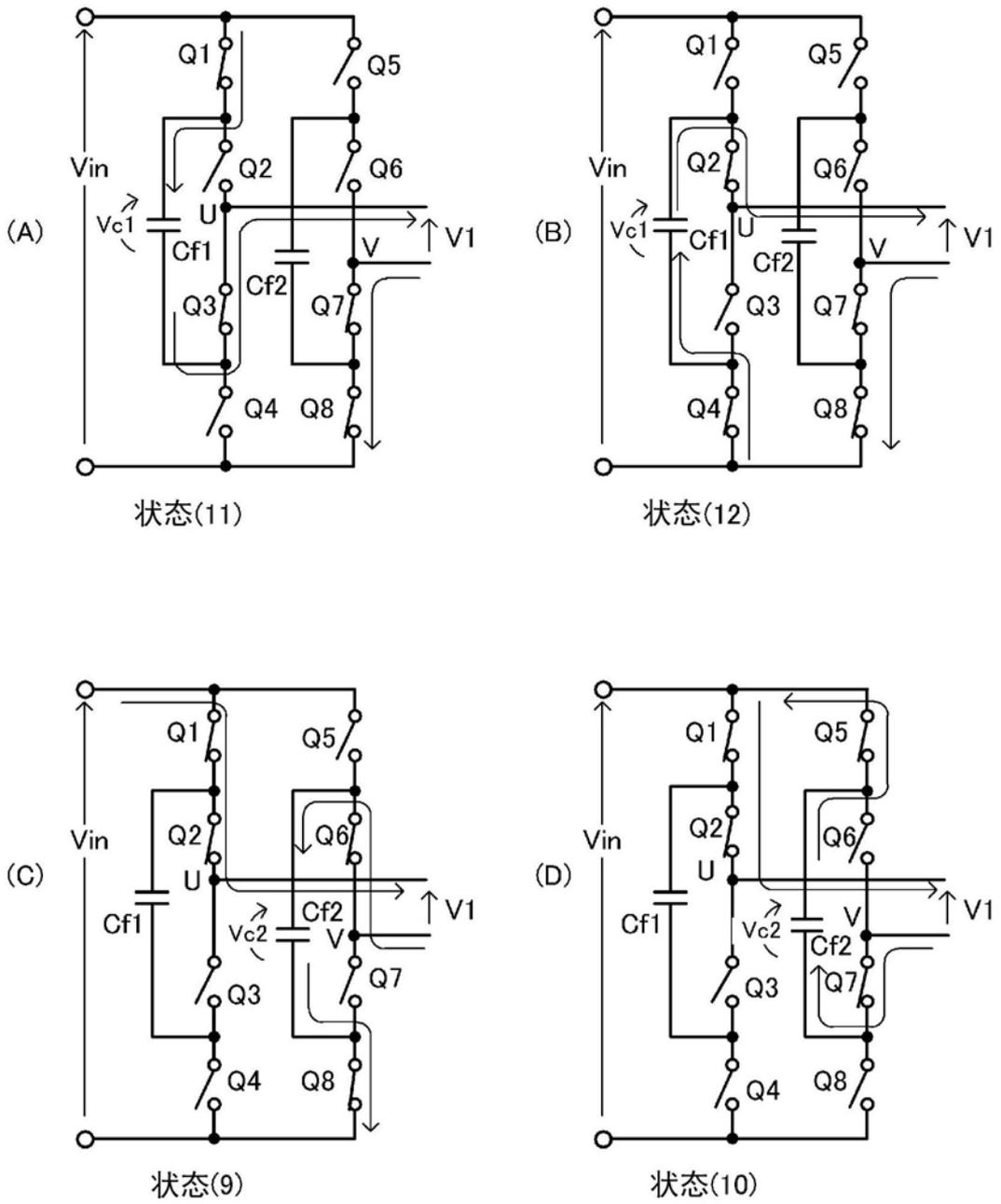


图5

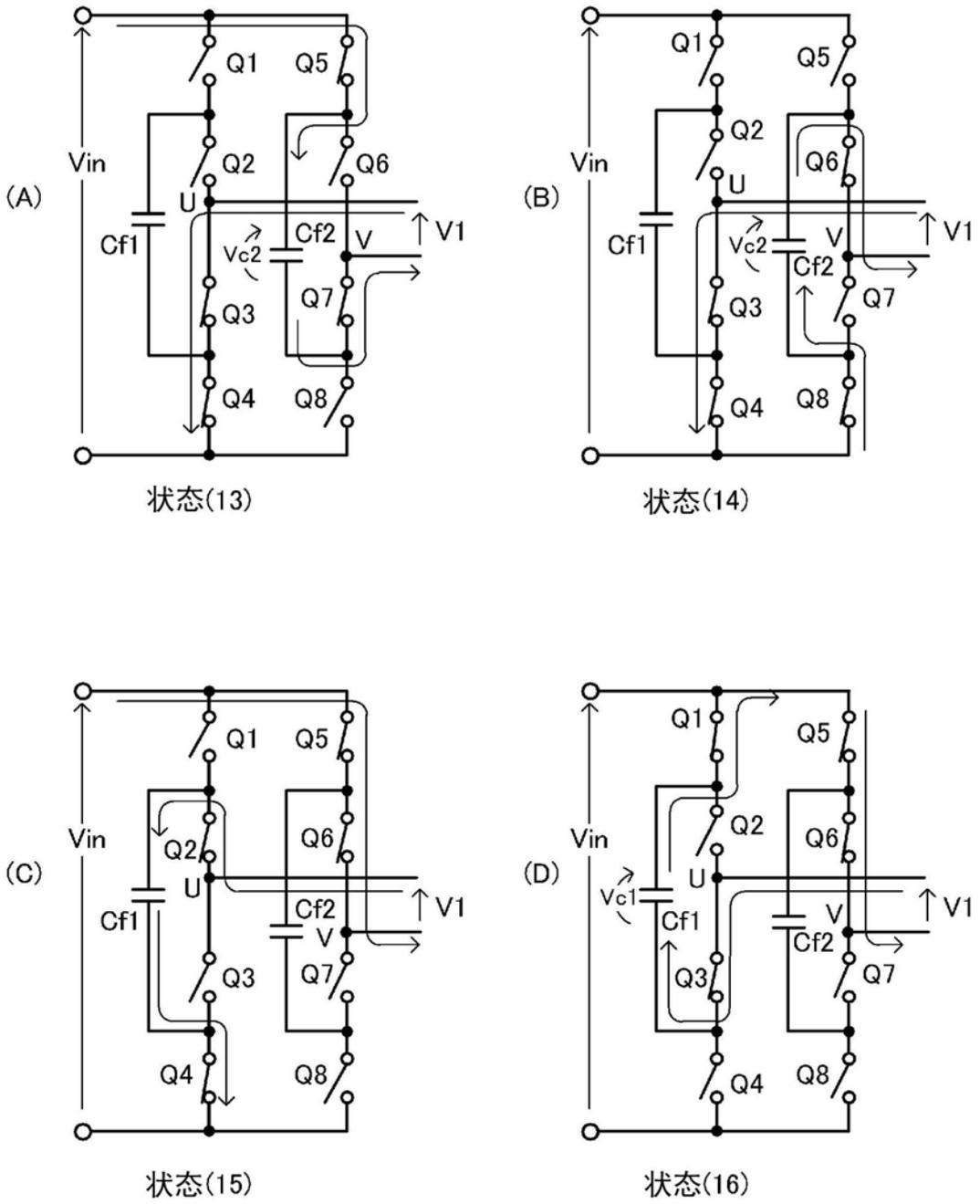


图6

| | | |
|---|-----|-----|
| | A | B |
| 1 | (7) | (8) |

图7

| | A | B |
|----|------|------|
| 1 | (9) | (14) |
| 2 | (9) | (16) |
| 3 | (10) | (13) |
| 4 | (10) | (14) |
| 5 | (10) | (15) |
| 6 | (10) | (16) |
| 7 | (11) | (14) |
| 8 | (11) | (16) |
| 9 | (12) | (13) |
| 10 | (12) | (14) |
| 11 | (12) | (15) |
| 12 | (12) | (16) |

图8

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|----|---------|------|-----|------|---------|------|-----|------|---------|
| 1 | (1)或(2) | (10) | (7) | (9) | (5)或(6) | (14) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 2 | (1)或(2) | (10) | (7) | (9) | (5)或(6) | (14) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 3 | (1)或(2) | (10) | (7) | (9) | (5)或(6) | (14) | (8) | (16) | (5)或(6) |
| 4 | (1)或(2) | (10) | (7) | (9) | (5)或(6) | (16) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 5 | (1)或(2) | (10) | (7) | (9) | (5)或(6) | (16) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 6 | (1)或(2) | (10) | (7) | (9) | (5)或(6) | (16) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 7 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (1)或(2) | (14) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 8 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (1)或(2) | (14) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 9 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (1)或(2) | (14) | (8) | (16) | (5)或(6) |
| 10 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (1)或(2) | (16) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 11 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (1)或(2) | (16) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 12 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (1)或(2) | (16) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 13 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (5)或(6) | (13) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 14 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (5)或(6) | (13) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 15 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (5)或(6) | (13) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 16 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (5)或(6) | (15) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 17 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (5)或(6) | (15) | (8) | (16) | (5)或(6) |
| 18 | (1)或(2) | (10) | (7) | (12) | (5)或(6) | (15) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 19 | (1)或(2) | (12) | (7) | (11) | (5)或(6) | (14) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 20 | (1)或(2) | (12) | (7) | (11) | (5)或(6) | (14) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 21 | (1)或(2) | (12) | (7) | (11) | (5)或(6) | (14) | (8) | (16) | (5)或(6) |
| 22 | (1)或(2) | (12) | (7) | (11) | (5)或(6) | (16) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 23 | (1)或(2) | (12) | (7) | (11) | (5)或(6) | (16) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 24 | (1)或(2) | (12) | (7) | (11) | (5)或(6) | (16) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 25 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (1)或(2) | (14) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 26 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (1)或(2) | (14) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 27 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (1)或(2) | (14) | (8) | (16) | (5)或(6) |
| 28 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (1)或(2) | (16) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 29 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (1)或(2) | (16) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 30 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (1)或(2) | (16) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 31 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (5)或(6) | (13) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 32 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (5)或(6) | (13) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 33 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (5)或(6) | (13) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 34 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (5)或(6) | (15) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 35 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (5)或(6) | (15) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 36 | (1)或(2) | (12) | (7) | (10) | (5)或(6) | (15) | (8) | (16) | (5)或(6) |

图9

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|----|---------|------|-----|------|---------|------|-----|------|---------|
| 37 | (5)或(6) | (9) | (7) | (11) | (5)或(6) | (14) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 38 | (5)或(6) | (9) | (7) | (11) | (5)或(6) | (14) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 39 | (5)或(6) | (9) | (7) | (11) | (5)或(6) | (14) | (8) | (16) | (5)或(6) |
| 40 | (5)或(6) | (9) | (7) | (11) | (5)或(6) | (16) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 41 | (5)或(6) | (9) | (7) | (11) | (5)或(6) | (16) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 42 | (5)或(6) | (9) | (7) | (11) | (5)或(6) | (16) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 43 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (1)或(2) | (14) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 44 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (1)或(2) | (14) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 45 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (1)或(2) | (14) | (8) | (16) | (5)或(6) |
| 46 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (1)或(2) | (16) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 47 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (1)或(2) | (16) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 48 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (1)或(2) | (16) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 49 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (5)或(6) | (13) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 50 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (5)或(6) | (13) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 51 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (5)或(6) | (13) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 52 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (5)或(6) | (15) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 53 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (5)或(6) | (15) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 54 | (5)或(6) | (9) | (7) | (10) | (5)或(6) | (15) | (8) | (16) | (5)或(6) |
| 55 | (5)或(6) | (11) | (7) | (9) | (5)或(6) | (14) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 56 | (5)或(6) | (11) | (7) | (9) | (5)或(6) | (14) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 57 | (5)或(6) | (11) | (7) | (9) | (5)或(6) | (14) | (8) | (16) | (5)或(6) |
| 58 | (5)或(6) | (11) | (7) | (9) | (5)或(6) | (16) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 59 | (5)或(6) | (11) | (7) | (9) | (5)或(6) | (16) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 60 | (5)或(6) | (11) | (7) | (9) | (5)或(6) | (16) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 61 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (1)或(2) | (14) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 62 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (1)或(2) | (14) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 63 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (1)或(2) | (14) | (8) | (16) | (5)或(6) |
| 64 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (1)或(2) | (16) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 65 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (1)或(2) | (16) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 66 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (1)或(2) | (16) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 67 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (5)或(6) | (13) | (8) | (14) | (5)或(6) |
| 68 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (5)或(6) | (13) | (8) | (14) | (1)或(2) |
| 69 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (5)或(6) | (13) | (8) | (15) | (5)或(6) |
| 70 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (5)或(6) | (15) | (8) | (13) | (5)或(6) |
| 71 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (5)或(6) | (15) | (8) | (16) | (1)或(2) |
| 72 | (5)或(6) | (11) | (7) | (12) | (5)或(6) | (15) | (8) | (16) | (5)或(6) |

图10

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 73 | (3) | (10) | (7) | (9) | (4) | (13) | (8) | (14) | (3) |
| 74 | (3) | (10) | (7) | (9) | (4) | (13) | (8) | (16) | (4) |
| 75 | (3) | (10) | (7) | (9) | (4) | (16) | (8) | (13) | (4) |
| 76 | (3) | (10) | (7) | (9) | (4) | (16) | (8) | (15) | (3) |
| 77 | (3) | (10) | (7) | (11) | (3) | (14) | (8) | (13) | (4) |
| 78 | (3) | (10) | (7) | (11) | (3) | (14) | (8) | (15) | (3) |
| 79 | (3) | (10) | (7) | (11) | (3) | (15) | (8) | (14) | (3) |
| 80 | (3) | (10) | (7) | (11) | (3) | (15) | (8) | (16) | (4) |
| 81 | (3) | (11) | (7) | (10) | (3) | (14) | (8) | (13) | (4) |
| 82 | (3) | (11) | (7) | (10) | (3) | (14) | (8) | (15) | (3) |
| 83 | (3) | (11) | (7) | (10) | (3) | (15) | (8) | (14) | (3) |
| 84 | (3) | (11) | (7) | (10) | (3) | (15) | (8) | (16) | (4) |
| 85 | (3) | (11) | (7) | (12) | (4) | (13) | (8) | (14) | (3) |
| 86 | (3) | (11) | (7) | (12) | (4) | (13) | (8) | (16) | (4) |
| 87 | (3) | (11) | (7) | (12) | (4) | (16) | (8) | (13) | (4) |
| 88 | (3) | (11) | (7) | (12) | (4) | (16) | (8) | (15) | (3) |
| 89 | (4) | (9) | (7) | (10) | (3) | (14) | (8) | (13) | (4) |
| 90 | (4) | (9) | (7) | (10) | (3) | (14) | (8) | (15) | (3) |
| 91 | (4) | (9) | (7) | (10) | (3) | (15) | (8) | (14) | (3) |
| 92 | (4) | (9) | (7) | (10) | (3) | (15) | (8) | (16) | (4) |
| 93 | (4) | (9) | (7) | (12) | (4) | (13) | (8) | (14) | (3) |
| 94 | (4) | (9) | (7) | (12) | (4) | (13) | (8) | (16) | (4) |
| 95 | (4) | (9) | (7) | (12) | (4) | (16) | (8) | (13) | (4) |
| 96 | (4) | (9) | (7) | (12) | (4) | (16) | (8) | (15) | (3) |
| 97 | (4) | (12) | (7) | (9) | (4) | (13) | (8) | (14) | (3) |
| 98 | (4) | (12) | (7) | (9) | (4) | (13) | (8) | (16) | (4) |
| 99 | (4) | (12) | (7) | (9) | (4) | (16) | (8) | (13) | (4) |
| 100 | (4) | (12) | (7) | (9) | (4) | (16) | (8) | (15) | (3) |
| 101 | (4) | (12) | (7) | (11) | (3) | (14) | (8) | (13) | (4) |
| 102 | (4) | (12) | (7) | (11) | (3) | (14) | (8) | (15) | (3) |
| 103 | (4) | (12) | (7) | (11) | (3) | (15) | (8) | (14) | (3) |
| 104 | (4) | (12) | (7) | (11) | (3) | (15) | (8) | (16) | (4) |

图11

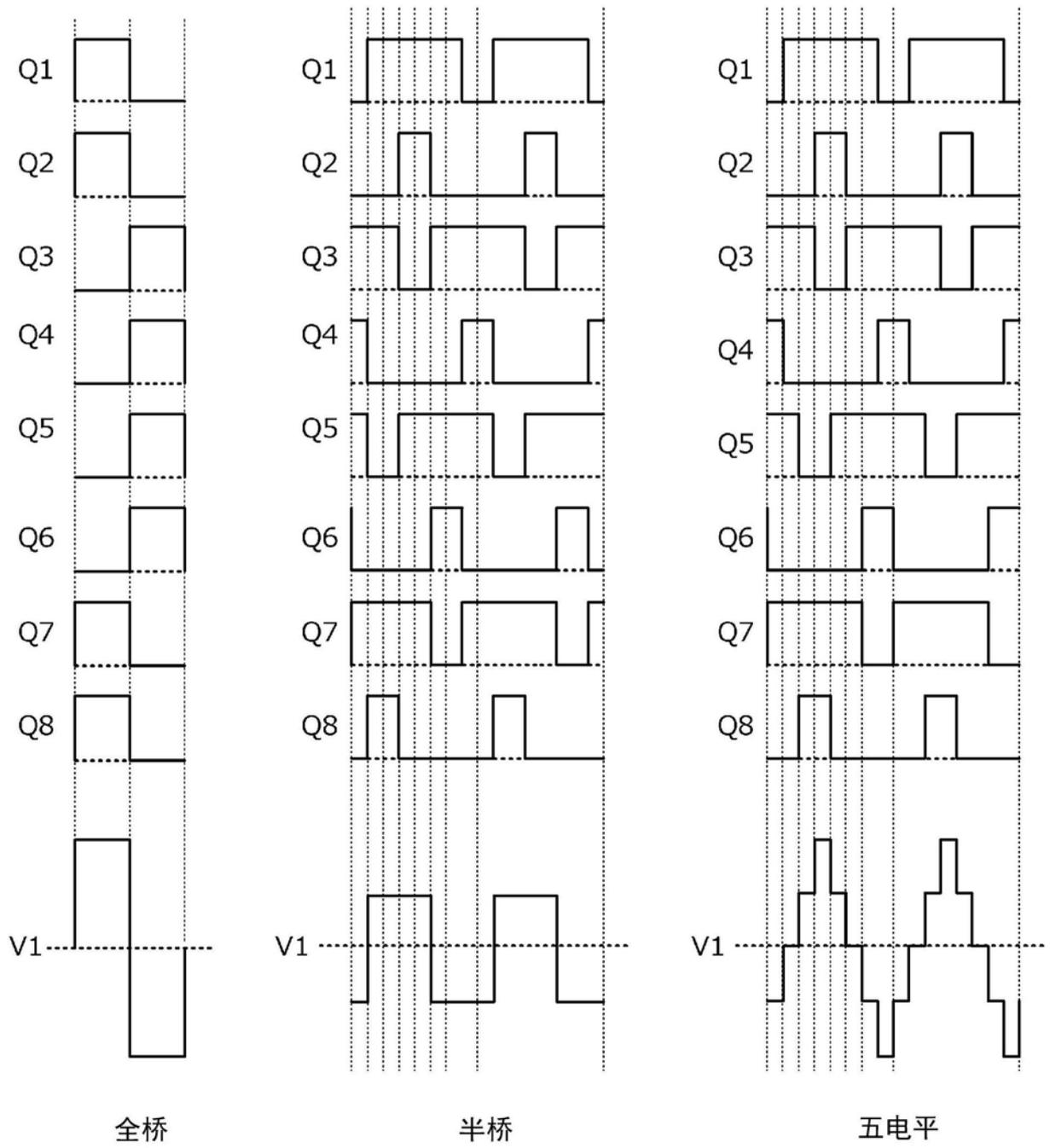


图12

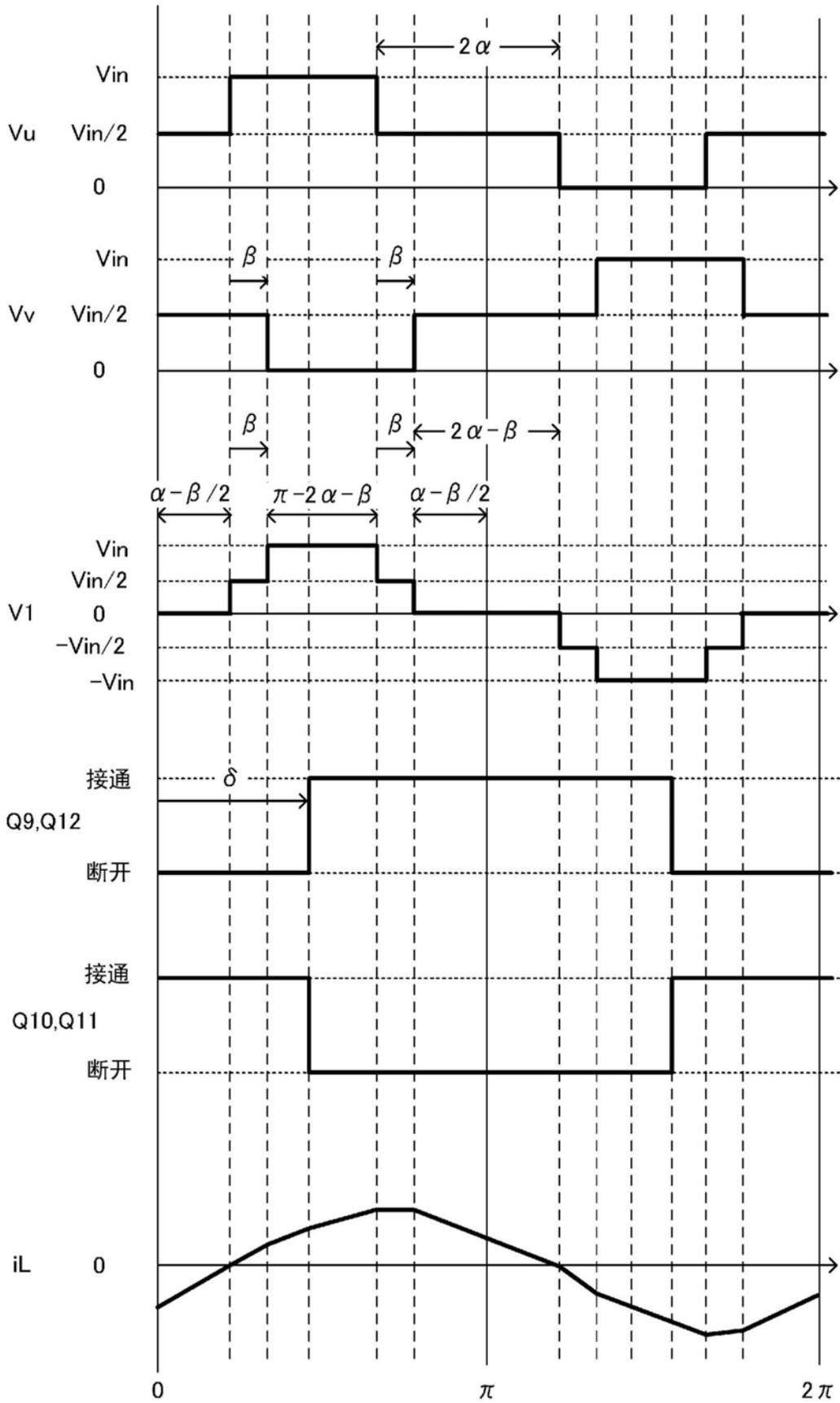


图13

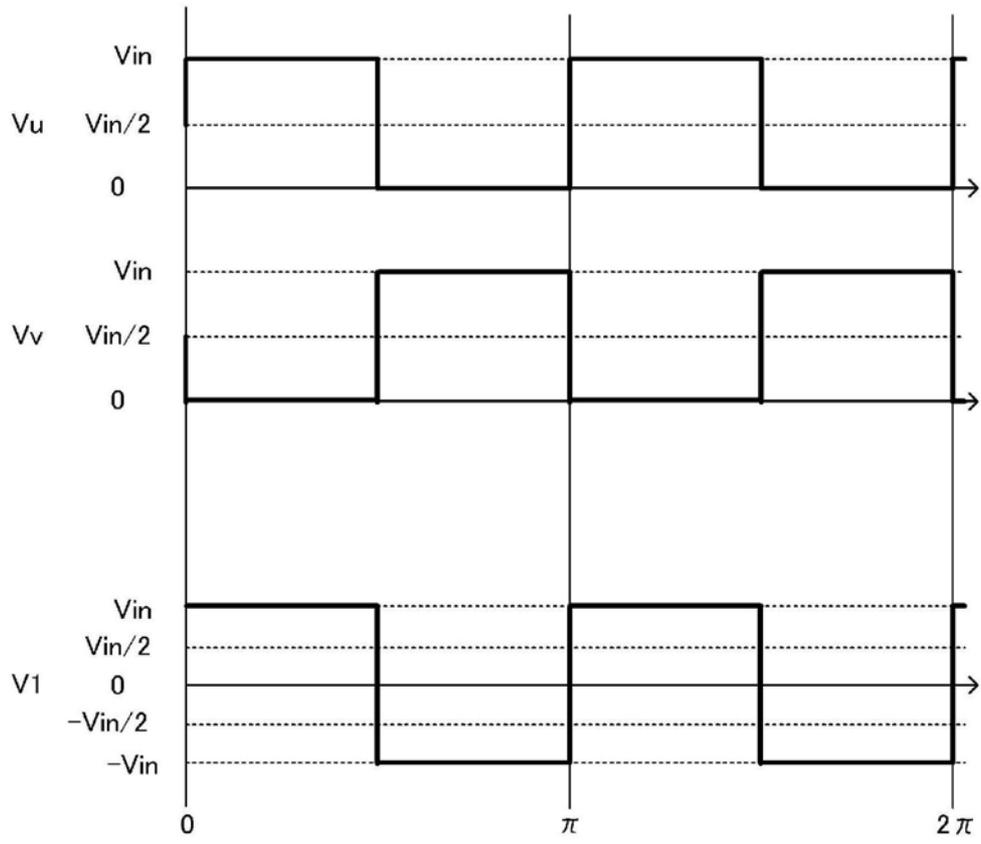


图14

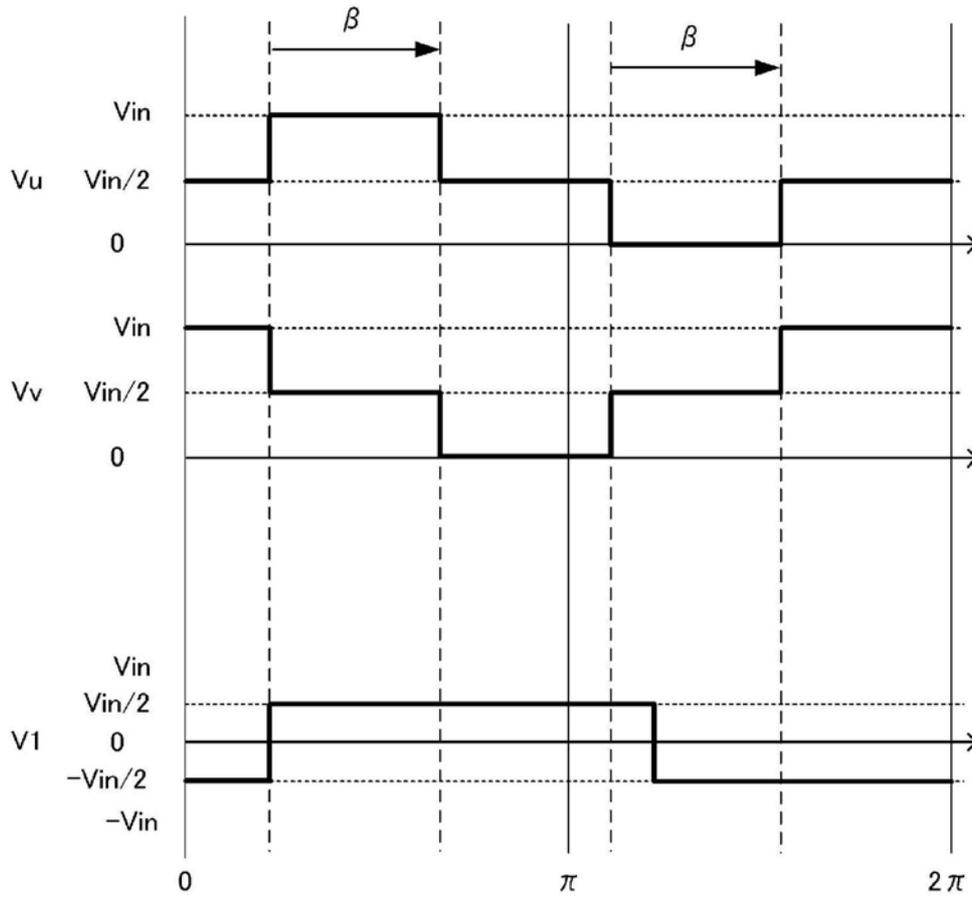


图15

$$\alpha = \beta = \pi / 4$$

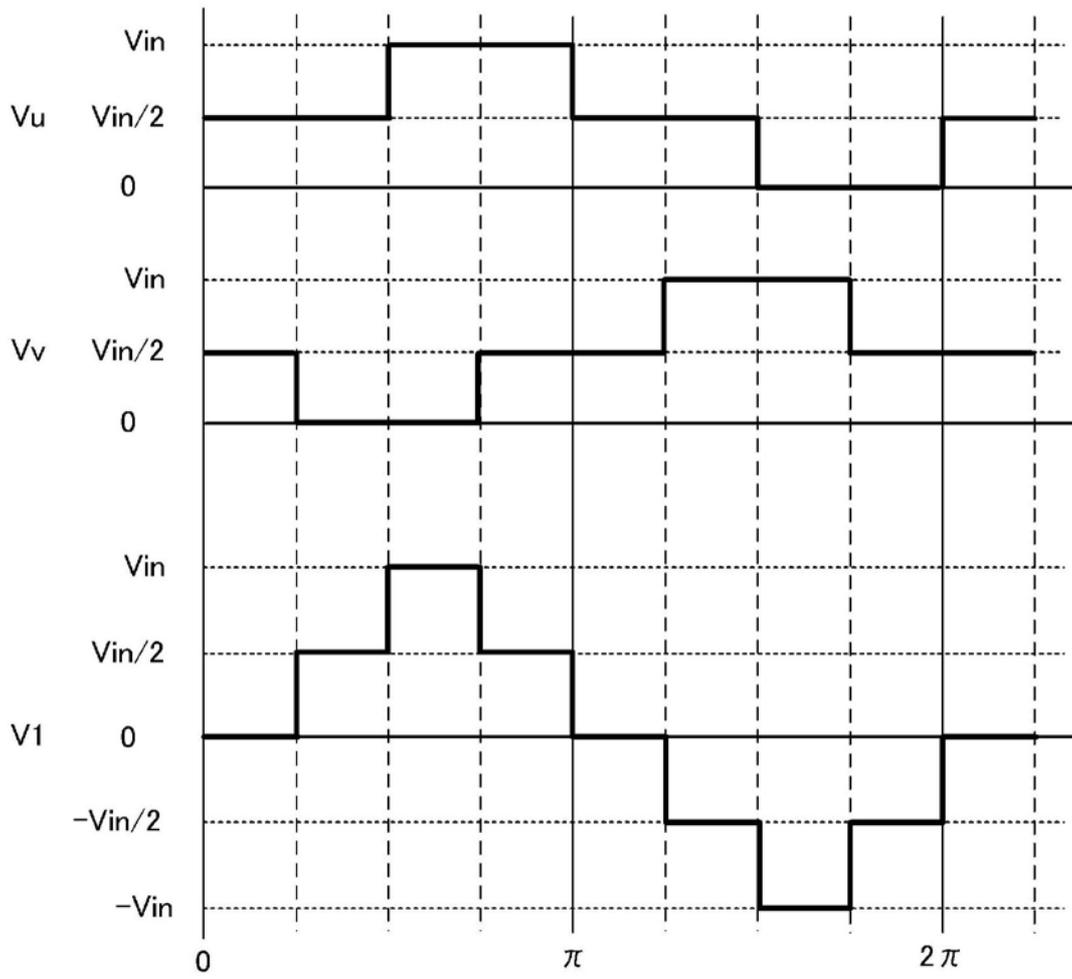


图16

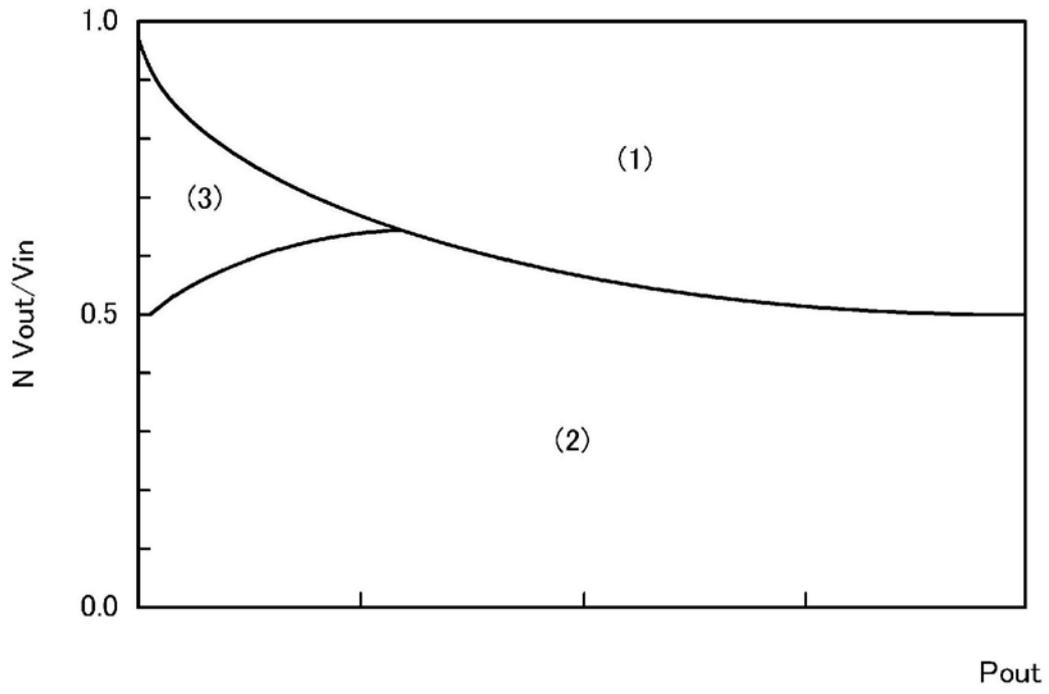


图17

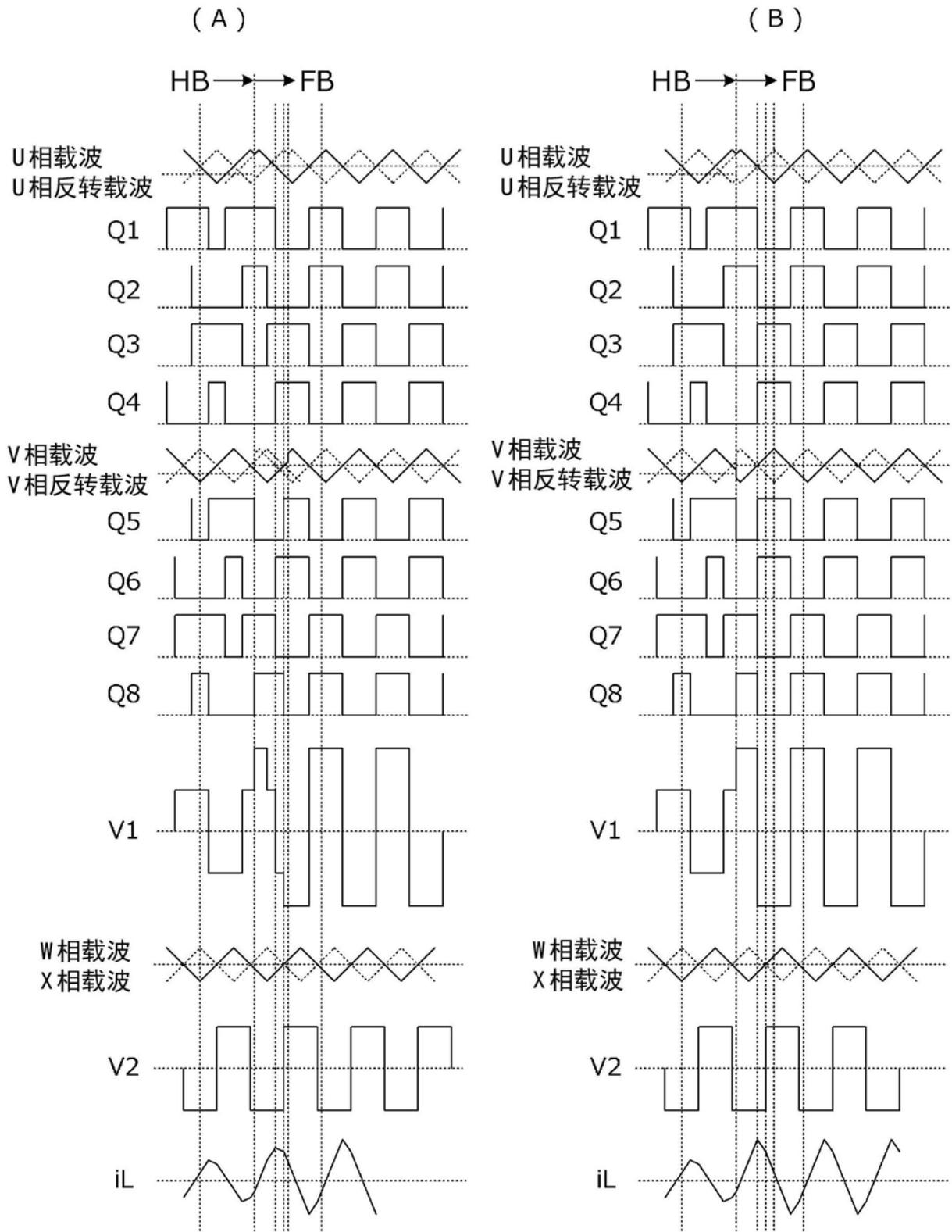


图18

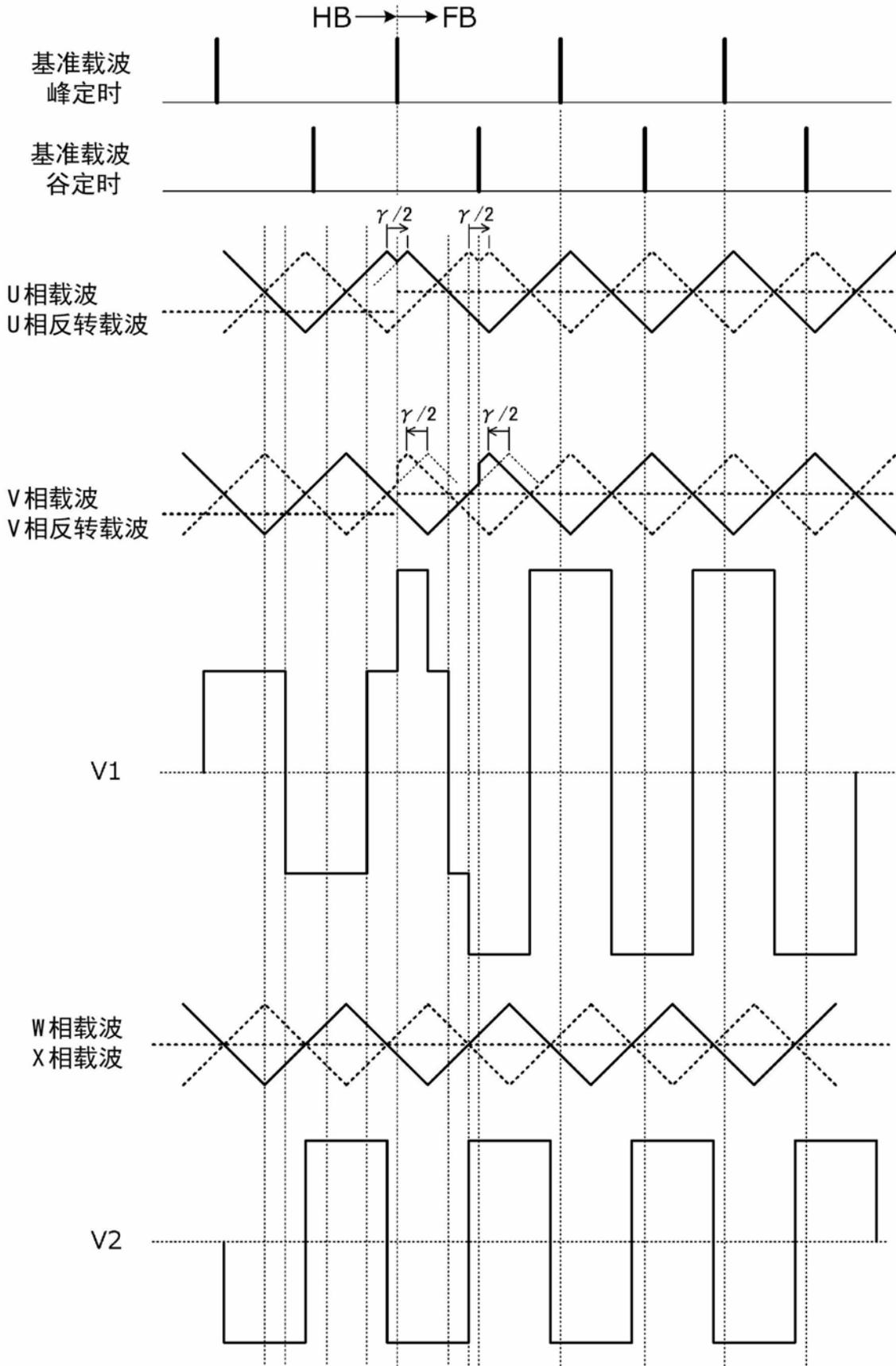


图19

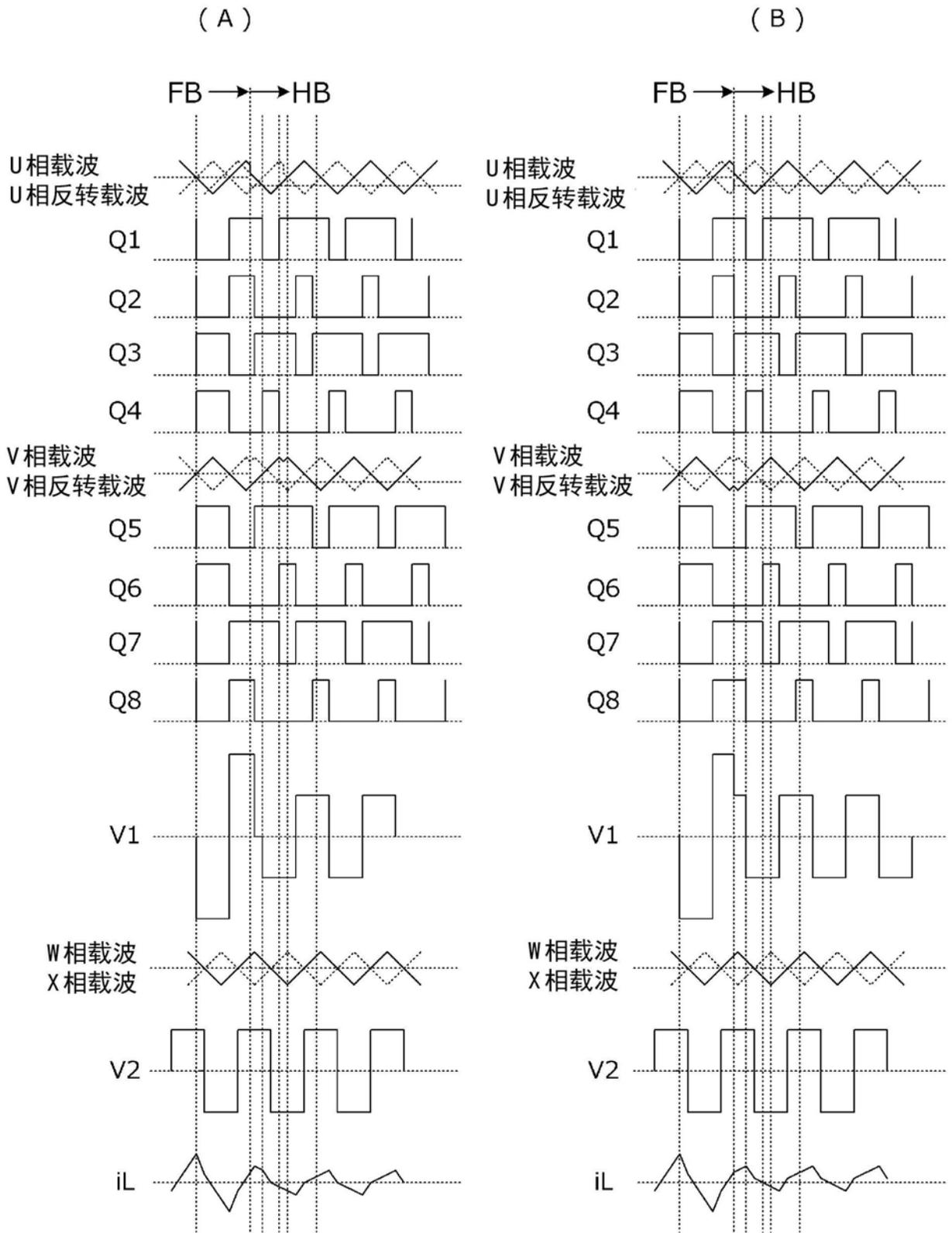


图20

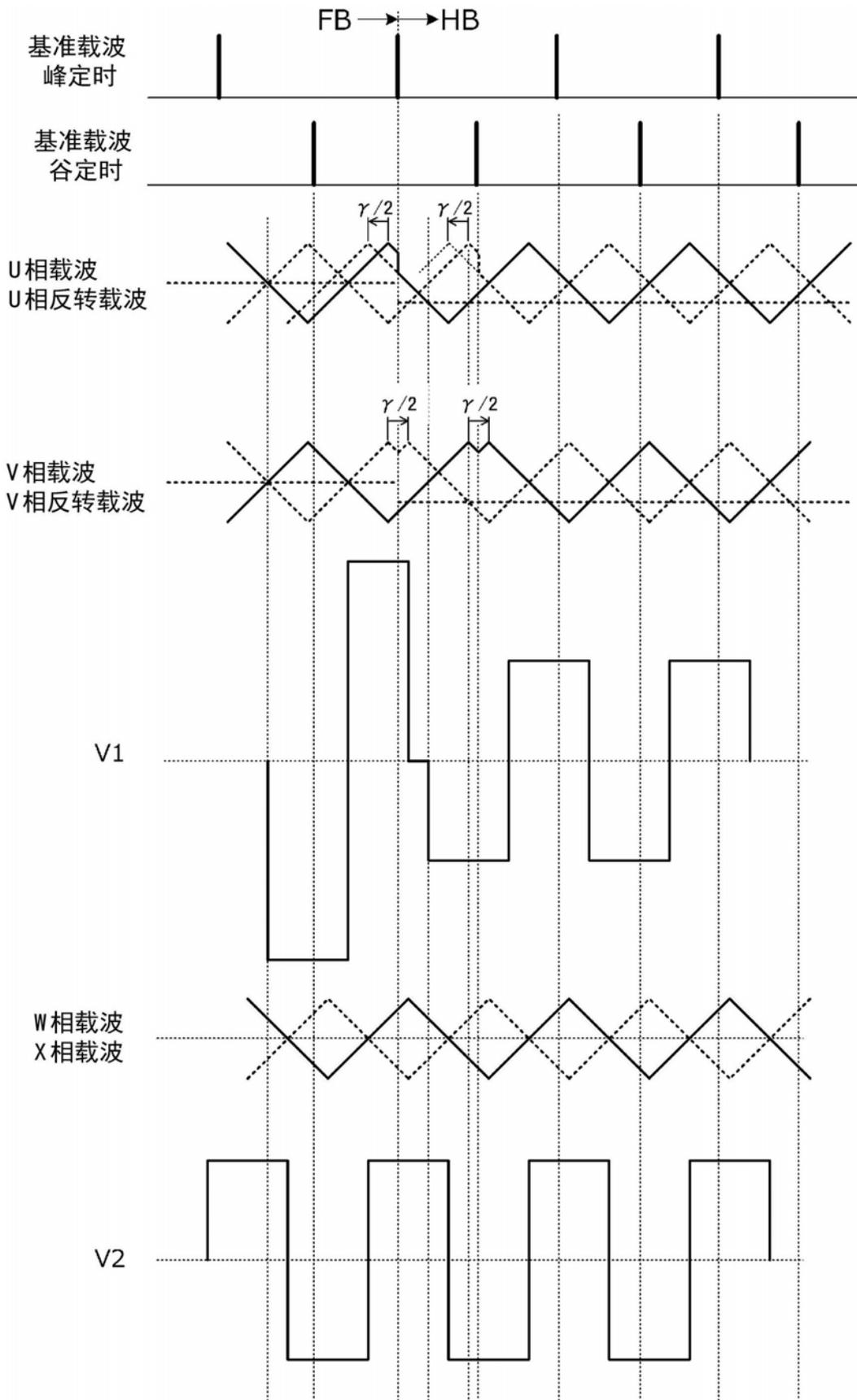


图21

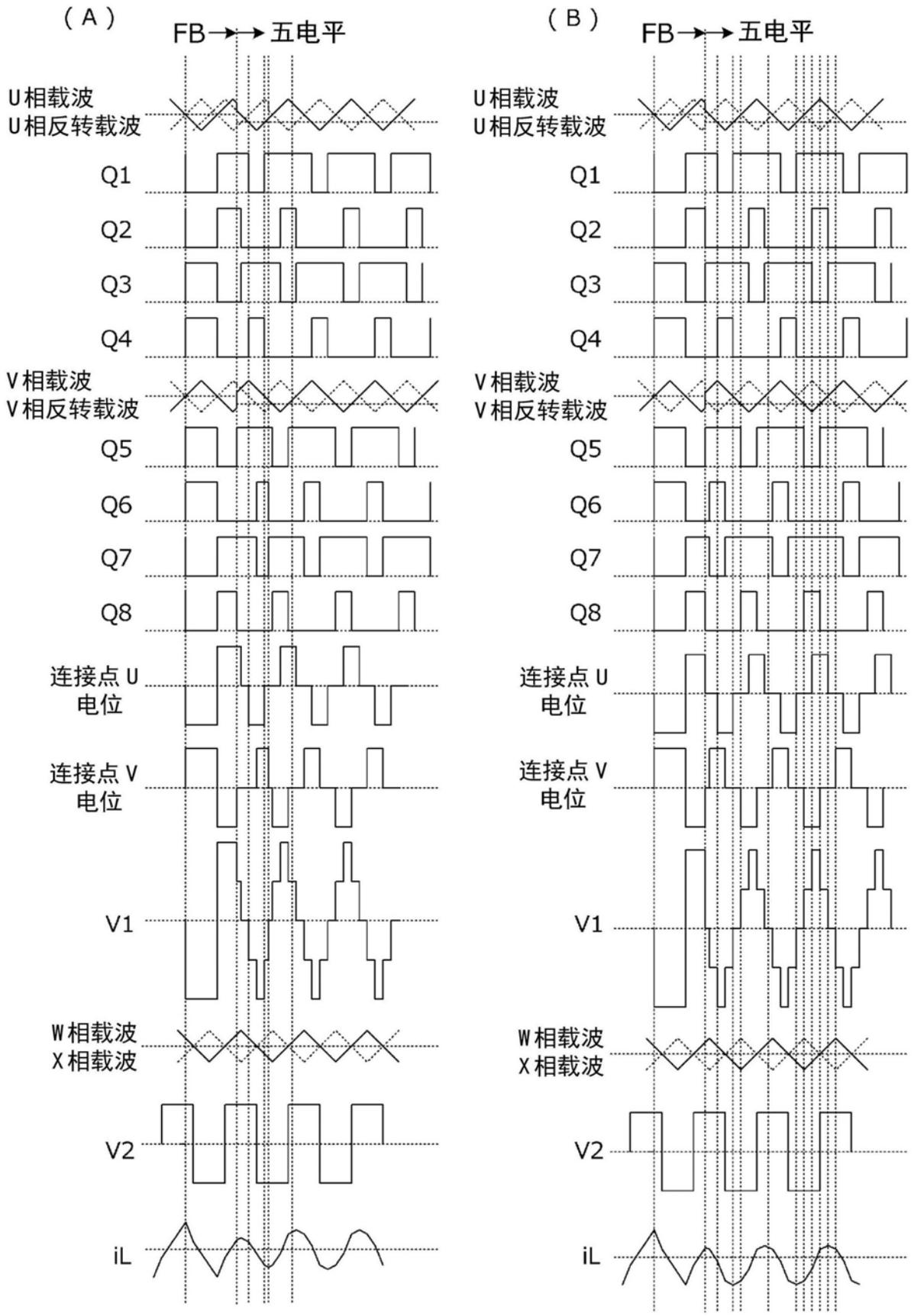


图22

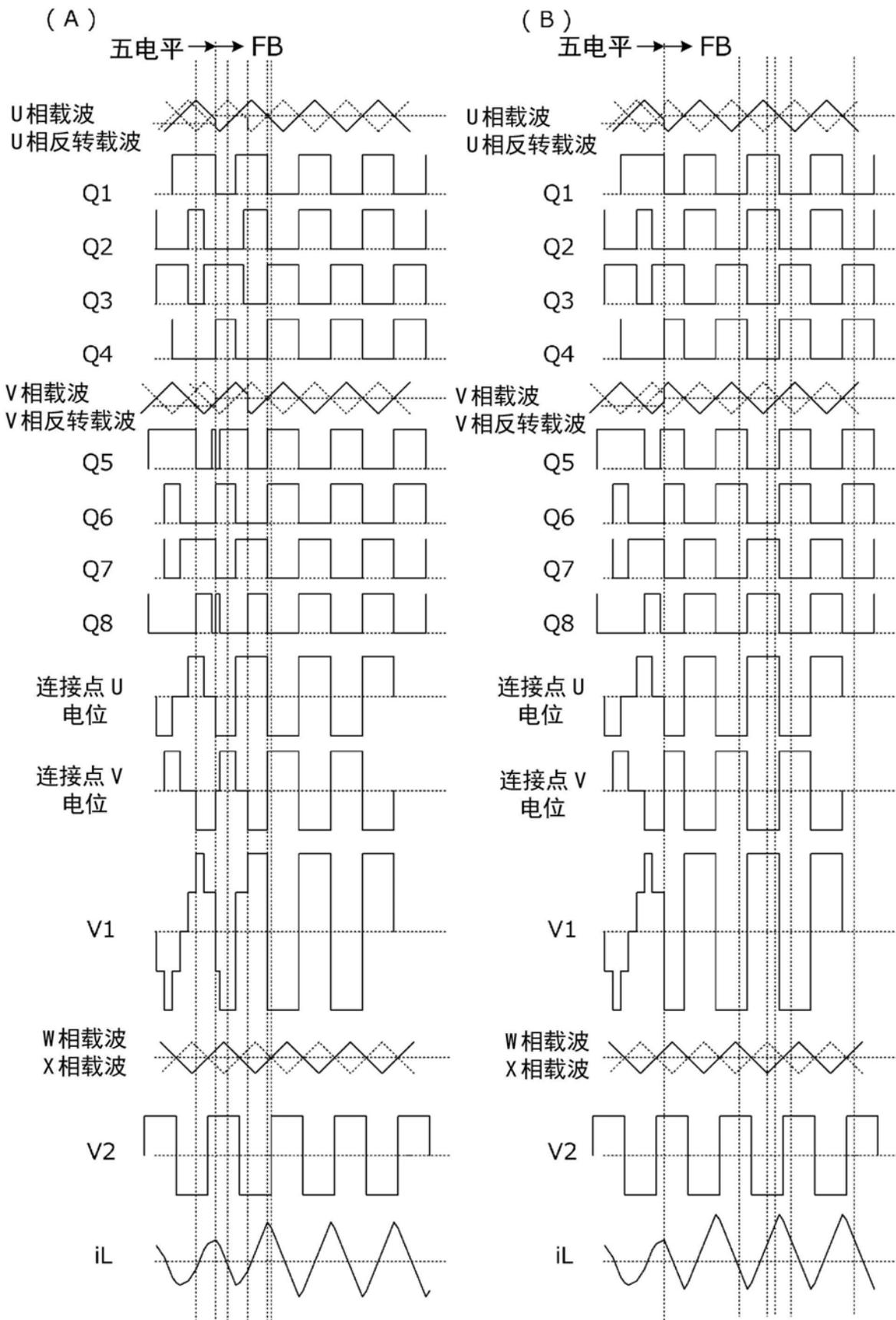


图23

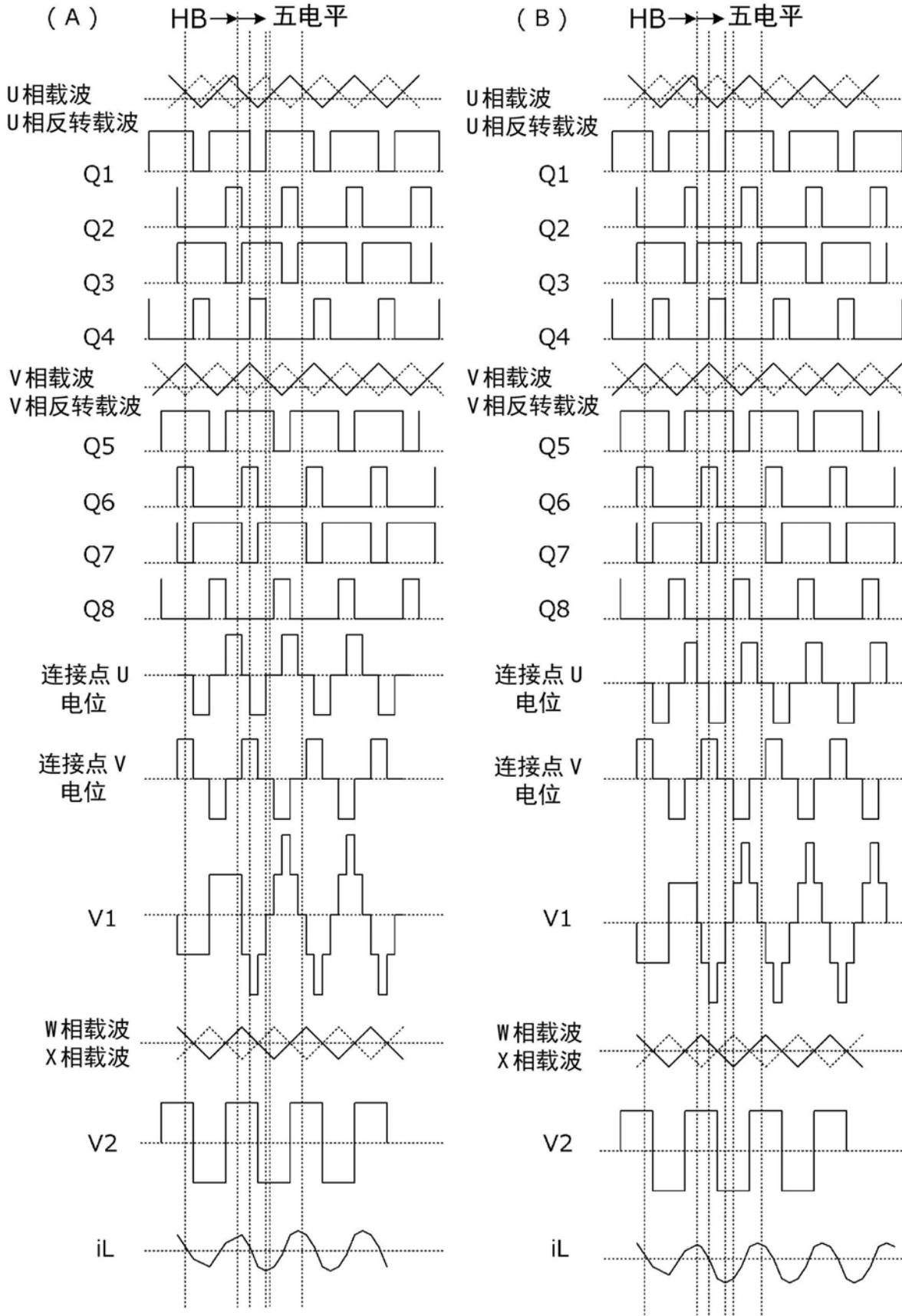


图24

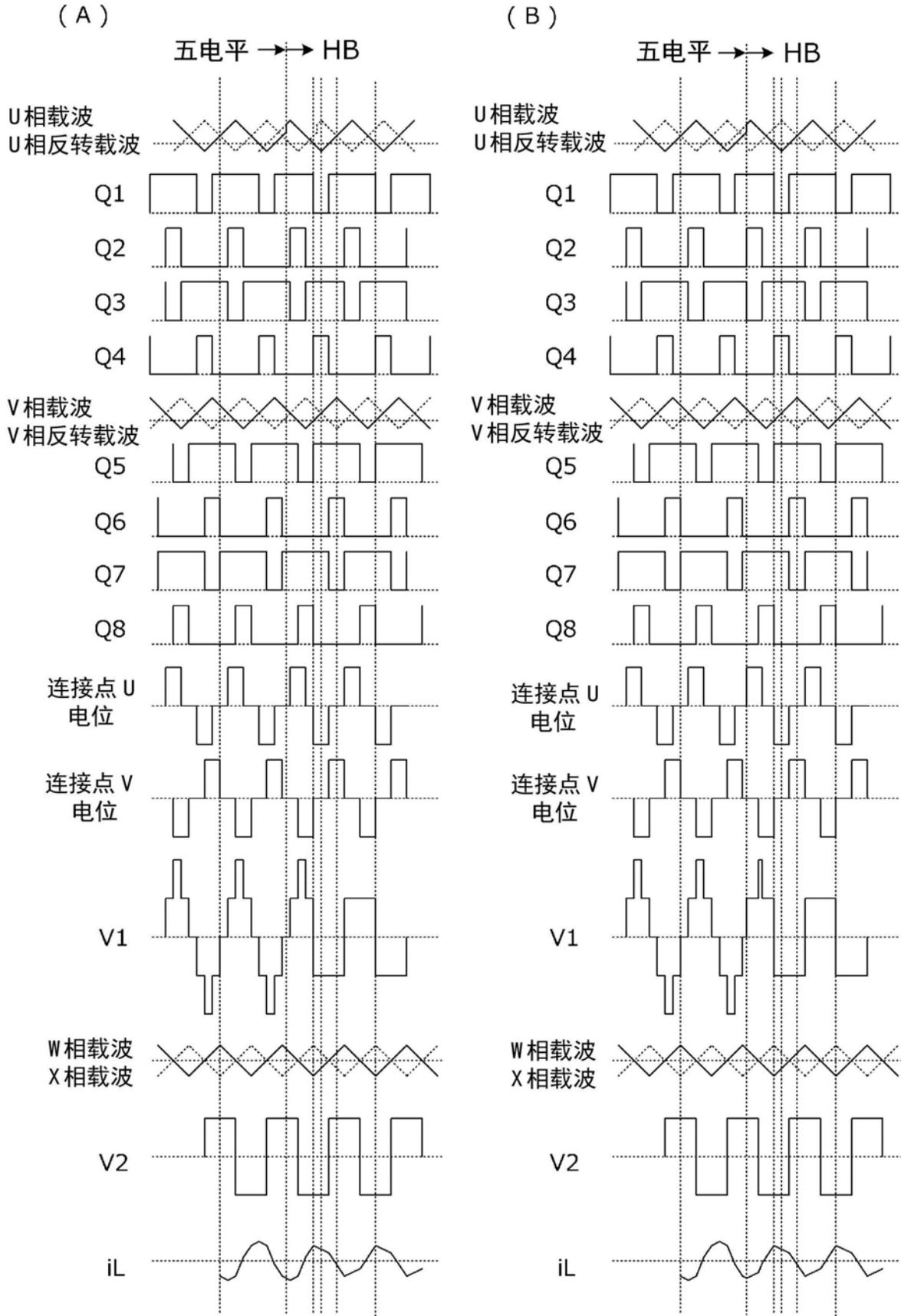


图25

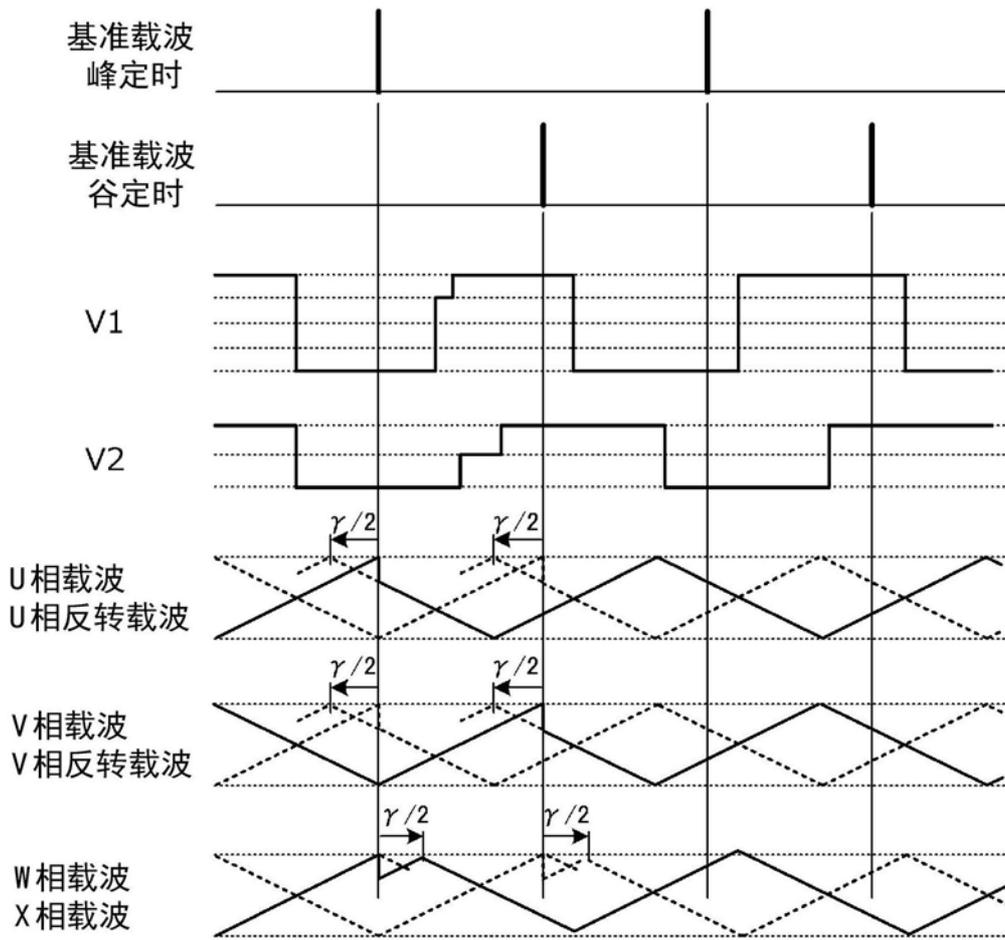


图26

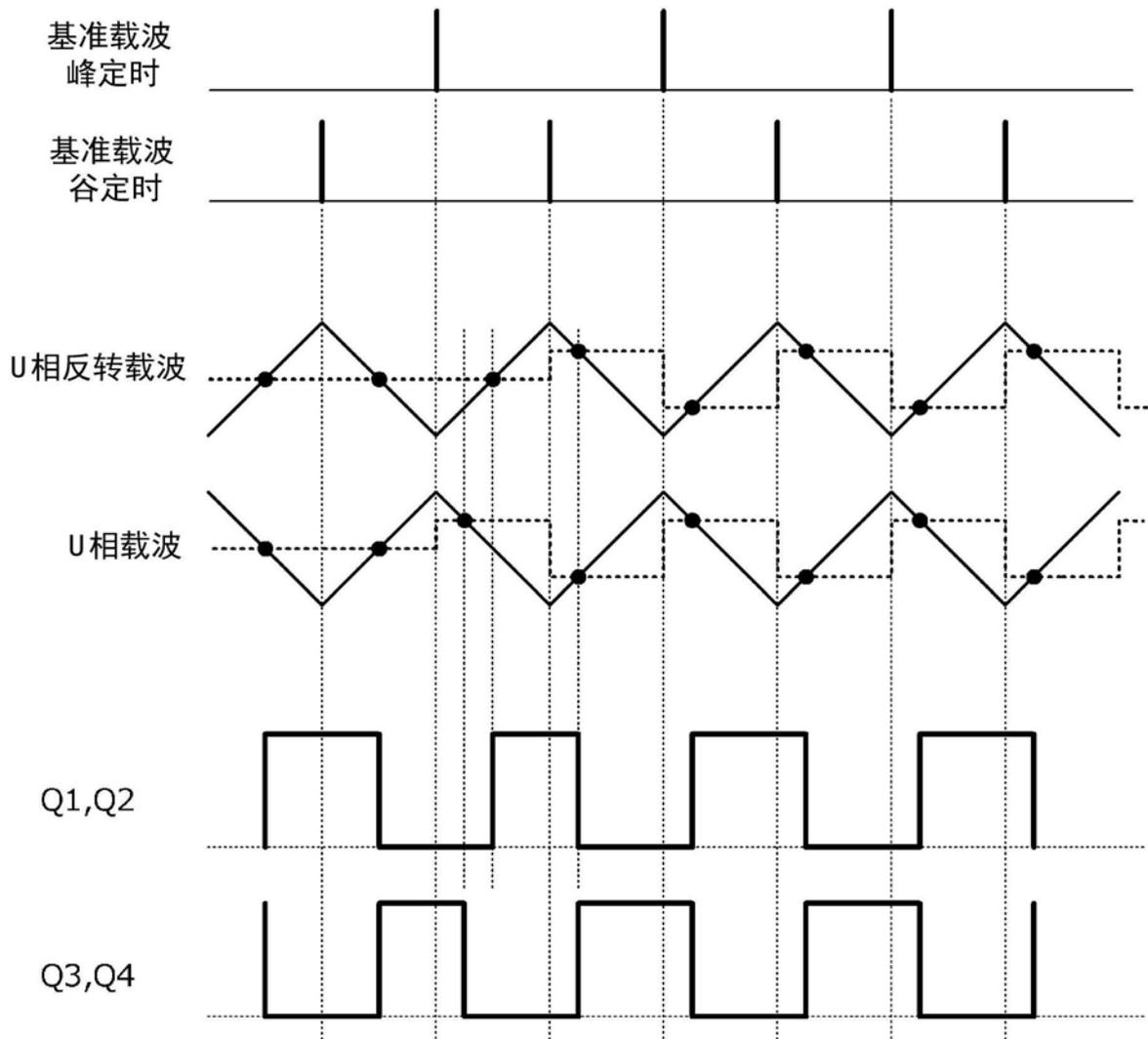


图27