



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114846632 A

(43) 申请公布日 2022.08.02

(21) 申请号 202080074517.9

(22) 申请日 2020.10.23

(30) 优先权数据

2019904009 2019.10.25 AU

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2022.04.24

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/NZ2020/050132 2020.10.23

(87) PCT国际申请的公布数据

W02021/080443 EN 2021.04.29

(71) 申请人 维多利亚林克有限公司

地址 新西兰惠灵顿

(72) 发明人 罗德尼·艾伦·巴德考克

克里斯托弗·威廉·班比 耿建昭

(74) 专利代理机构 北京康信知识产权代理有限公司 11240

专利代理师 刘梅

(51) Int.Cl.

H01L 39/16 (2006.01)

G01R 33/035 (2006.01)

H01F 6/06 (2006.01)

H02H 7/00 (2006.01)

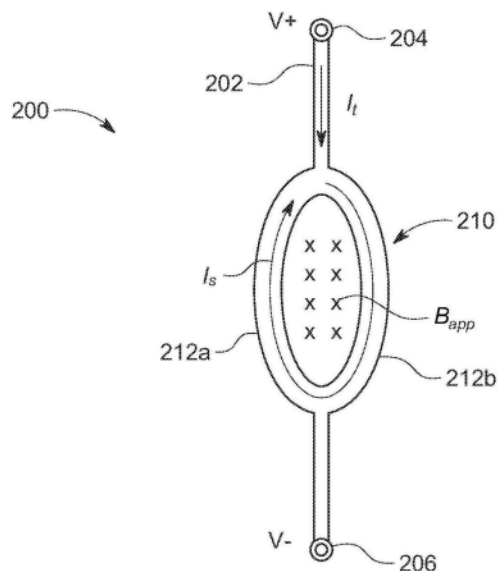
权利要求书2页 说明书15页 附图12页

(54) 发明名称

一种超导开关

(57) 摘要

本发明涉及一种超导电开关。该开关包括以环路形式的超导材料的两个并联分支以及磁场发生器，磁场发生器在基本上平行于环路的轴线的方向上产生通过环路的时变磁场。磁场发生器被选择性地激活和停用以使电开关在低电阻状态和较高电阻状态之间切换。在低电阻状态下，没有磁场通过环路，并且传输电流流过环路。在较高电阻状态下，通过环路的磁场感应出屏蔽电流，使得传输电流和屏蔽电流之和大致等于临界电流或大于超导材料的临界电流。该开关可用于例如整流器或故障限流器中。



1. 一种电开关,包括:

超导材料的环路,

其中,所述环路包括第一分支和第二分支,所述第一分支和所述第二分支在第一端子和第二端子之间并联电连接,并且其中,所述环路具有基本上垂直于所述环路的平面的轴线,并且

其中,所述环路被配置为在所述第一端子和所述第二端子之间传送传输电流;以及
磁场发生器,

其中,所述磁场发生器被配置为产生通过所述环路的时变磁场,其中,通过所述环路的磁场的方向大致平行于所述环路的所述轴线、或者具有大致平行于所述环路的所述轴线的分量,

其中,所述磁场发生器被配置为选择性地激活和停用,以使所述电开关在低电阻状态和较高电阻状态之间切换,并且

其中,在所述低电阻状态下,所述磁场发生器不产生通过所述环路的变化磁场,并且所述传输电流流过两个端子之间的所述环路,并且在所述较高电阻状态下,所述磁场发生器产生通过所述环路的变化磁场,从而在所述环路中感应出屏蔽电流,使得所述第一分支和所述第二分支中的一个或多个分支中的所述传输电流和所述屏蔽电流之和接近所述超导材料的临界电流、基本上等于所述临界电流、或大于所述临界电流。

2. 根据权利要求1所述的电开关,其中,所述超导材料包括高温超导体。

3. 根据前述权利要求中任一项所述的电开关,其中,所述超导材料包括稀土钡铜氧化物(ReBCO)。

4. 根据前述权利要求中任一项所述的电开关,其中,所述超导材料被包括为带的一部分。

5. 根据前述权利要求中任一项所述的电开关,其中,所述电开关还包括接头,其中,所述接头将所述第一分支和/或所述第二分支连接到所述第一端子和/或所述第二端子。

6. 根据权利要求5所述的电开关,其中,所述接头包括非超导材料。

7. 根据前述权利要求中任一项所述的电开关,其中,所述第一分支包括一个或多个超导材料的线圈。

8. 根据前述权利要求中任一项所述的电开关,其中,所述第二分支包括一个或多个超导材料的线圈。

9. 根据从属于权利要求7的权利要求8所述的电开关,其中,所述第一分支的线圈与所述第二分支的线圈绕相同的轴线缠绕。

10. 根据权利要求9或从属于权利要求7的权利要求8所述的电开关,其中,所述第一分支的线圈沿第一旋转方向缠绕,并且所述第二分支的线圈沿第二旋转方向缠绕,其中,所述第一旋转方向不同于所述第二旋转方向。

11. 根据前述权利要求中任一项所述的电开关,其中,所述磁场发生器包括交流电源。

12. 根据前述权利要求中任一项所述的电开关,其中,所述磁场发生器通过芯与超导材料的所述环路磁耦合。

13. 根据权利要求12所述的电开关,其中,所述芯是包含铁或铁氧体的磁性或铁质芯。

14. 根据权利要求13所述的电开关,其中,所述芯包括磁性材料的闭合环路。

15. 根据前述权利要求中任一项所述的电开关, 其中, 所述磁场发生器包括磁场发生器线圈, 所述磁场发生器线圈包括一匝或多匝导体。

16. 根据权利要求15所述的电开关, 其中, 所述导体包括非超导材料。

17. 根据前述权利要求中任一项所述的电开关, 其中, 当所述磁场发生器被停用时, 所述磁场发生器基本上不产生磁场、或产生恒定磁场。

18. 根据前述权利要求中任一项所述的电开关, 其中, 在所述较高电阻状态下, 所述超导材料的分支是超导的。

19. 一种整流器, 包括控制机构和至少一个根据前述权利要求中任一项所述的电开关, 所述控制机构被配置为在低电阻状态和较高电阻状态之间控制至少一个所述电开关中的每一个, 以对来自交流电流源的电流进行整流。

20. 根据权利要求19所述的整流器, 其中, 所述整流器包括变压器, 所述变压器包括初级侧和次级侧, 其中, 至少一个所述电开关连接到所述变压器的所述次级侧。

21. 根据权利要求20所述的整流器, 其中, 所述控制机构基于所述变压器中的交流电流的流动方向, 在所述低电阻状态和所述较高电阻状态之间控制至少一个所述电开关中的每一个。

22. 根据权利要求19至21中任一项所述的整流器, 其中, 所述整流器是半波整流器。

23. 根据权利要求19至21中任一项所述的整流器, 其中, 所述整流器是全波整流器。

24. 根据权利要求19至23中任一项所述的整流器, 其中, 磁场发生器的激活在分支中感应出屏蔽电流, 所述屏蔽电流引起超导材料中的电阻耗散增加而不失超。

25. 一种故障限流器, 包括控制机构和至少一个根据权利要求1至19中任一项所述的电开关, 所述控制机构被配置为在检测到故障时使至少一个所述电开关处于较高电阻状态。

26. 根据权利要求25所述的故障限流器, 其中, 磁场发生器的激活在分支中感应出屏蔽电流, 所述屏蔽电流引起超导材料的失超。

一种超导开关

技术领域

[0001] 本技术涉及电开关。本技术可作为超导开关得到具体的应用；然而，这不应当被认为是对本发明的限制。

背景技术

[0002] 在超导电路中，通常难以引入具有类似低电阻或零电阻导电路径的部件。引入非超导部件会导致电路性能降低，使得整个电路的效率降低。此外，当电阻添加到大电流超导电路中时，需要更大的冷却来抵消电阻部件的加热。

[0003] 将电阻部件引入超导电路的另一个问题是，如果去掉电流源，则在所述电路中流动的任何DC电流将立即衰减。相反，在超导电路中，电流根据电路的时间常数 (L/R) 衰减。换言之，超导电路的优点在于在电源关闭之后很长时间仍能够支持DC电流流动。与电路中的正常导电接头相关联的任何非零电阻确定这些超导电路中的电流衰减速率。

[0004] 因此，需要能够提供可在超导电路中有效工作而不会显著降低其性能的部件或器件。

[0005] 在这些超导电路中使用的一种类型的部件是可变电阻电流开关。然而，现有的电流开关器件存在许多已知的缺点。例如，热控开关通常响应慢，不适合在高速开关应用中使用。电流控制的开关通常施加超过超导临界电流的电流脉冲，因此这些类型的开关器件容易退化。现有的磁场控制开关器件是由高强度磁场控制的，但是当工作时，这些磁场控制开关器件的每单位长度的电阻小，并且开关速率通常受到所施加的场线圈的大电感的限制。

[0006] 发明目的

[0007] 本技术的一个目的是提供一种电开关。可替代地，本技术的一个目的是提供一种电开关，其能够在较高电阻状态和较低电阻状态之间可控地切换。

[0008] 可替代地，本技术的一个目的是提供一种超导电开关。

[0009] 可替代地，本发明的目的是提供一种超导电开关，其比至少一些现有的超导电开关更小、更高效、更低成本、切换更快和/或具有更高的开关电阻。

[0010] 可替代地，本技术的一个目的是提供一种包括超导电开关的整流器。

[0011] 可替代地，本技术的一个目的是提供一种使用超导电开关的故障限流器。

[0012] 可替代地，本技术的一个目的是至少向公众提供一个有用的选择。

发明内容

[0013] 根据本技术的第一方面，提供了一种电开关。

[0014] 根据本技术的第二方面，提供了一种电开关，其被配置为将在其端子之间流动的电流所经历的电阻从低电阻状态切换到较高电阻状态。

[0015] 根据本技术的另一方面，提供了一种电开关，其包括：

[0016] 超导材料环路，其中，所述环路包括第一分支和第二分支，第一分支和第二分支在第一端子和第二端子之间并联电连接，并且其中，所述环路具有基本上垂直于所述环路的

平面的轴线;以及

[0017] 磁场发生器,其被配置为产生通过环路的时变磁场,通过环路的磁场的方向大致平行于环路的轴线,或者具有大致平行于环路的轴线的分量,

[0018] 其中,环路被配置为在第一端子和第二端子之间传送传输电流,

[0019] 其中,磁场发生器被配置为选择性地激活和停用以在低电阻状态和较高电阻状态之间切换电开关,

[0020] 其中,在低电阻状态下,磁场发生器不产生通过环路的变化磁场并且传输电流流过两个端子之间的环路,并且在较高电阻状态下,磁场发生器产生通过环路的变化磁场,在环路中感应出屏蔽电流,使得在一个或多个分支中的传输电流和屏蔽电流之和接近临界电流、或者大于或基本上等于超导材料的临界电流。

[0021] 优选地,超导材料为高温超导体。使用高温超导体可以有利地允许在较高温度下使用本技术,这可以降低电开关的成本并增加可行工作温度的范围。例如,超导材料可以包括稀土钡铜氧化物(ReBCO)、或任何其它合适的高温超导体。例如,稀土组分可以包括钇(Y)、钆(Gd)、钐(Sm)、钕(Nd)或任何其它合适的元素。在该技术的可替代实施例中,超导材料可以是二硼化镁(MgB_2)或铋锶钙铜氧化物(BSCCO)或传统低温超导体,诸如铌钛合金(NbTi)。

[0022] 优选地,超导材料包括为带的一部分,例如带可以包括沉积在金属衬底和/或陶瓷层上的超导体薄膜。在一些情况下,然后用本领域技术人员应当已知的另一金属外保护层涂覆该薄膜。然而,这不应当被认为是对本技术的限制。例如,超导材料可以包括嵌入在金属基体中的一根或多根细丝、或超导材料的导线。

[0023] 在优选实施例中,电开关可以包括开关中超导元件之间的一个或多个接头,诸如在每个端子处超导材料分支的接头。此外,可以在超导材料分支之间提供接头。这些接头可以由非超导材料构成,或者具有非零电阻;例如,接头可以由在电路工作温度下具有非零电阻的正常导电金属焊料形成,诸如铅-锡(PbSn)或铟-银(InAg)合金。在本技术的一些实施例中,开关可以被构造成使得在分支之间没有接头,例如可以通过拆分超导材料或带的连续条带以形成两个整体连接的分支,而形成分支。

[0024] 优选地,超导材料的分支还可各自包括一个或多个超导材料的线圈。例如,第一分支可以包括至少一个线圈,第二分支可以包括至少一个线圈。超导线圈的使用可以有利地使磁场发生器和环路之间的耦合更大。在可替代实施例中,可以不使用线圈。

[0025] 应当理解,超导材料的每个线圈可以包括一个或多个匝。这些匝可以围绕公共轴线定位。提供围绕公共轴线的一个或多个匝可以有利地允许更简单的结构和/或在变化磁场的发生器和超导材料之间具有更大的耦合。

[0026] 在使用线圈的情况下,有利的是,环路的每个分支中的线圈以相反的旋转方向缠绕(即,一个线圈采用右手螺旋形式,另一个线圈采用左手螺旋形式)。例如,两个分支中的第一分支中的线圈可以沿顺时针方向缠绕,而两个分支中的第二分支中的线圈可以沿逆时针方向缠绕。换言之,第一分支中的线圈可以沿第一旋转方向缠绕,第二分支中的线圈可以沿第二旋转方向缠绕,其中第一旋转方向不同于第二旋转方向。这种布置可以有利地进一步促使在环路中产生屏蔽电流。此外,通过反向缠绕线圈,可以抵消开关端子之间的总电感或使其最小。

[0027] 优选地,磁场发生器可以包括交流电源形式的电源,诸如AC电流源或AC电压源。例如,磁场发生器可以包括交流电源,该交流电源通过导体的一个或多个匝与超导材料的环路磁耦合。

[0028] 优选地,磁场发生器可以通过芯磁耦合到超导材料的环路。在优选实施例中,芯是含有铁或铁氧体的磁性或铁质芯,但是在可替代实施例中,芯可以是非磁性或空气芯,这对于本领域技术人员来说是已知的。当开关在高频下使用时,使用铁氧体芯可能是特别有利的。

[0029] 在使用磁芯的实施例中,磁芯由磁性材料的闭合环路构成可能是有利的。使用闭合环路可以更好地使磁场发生器产生的磁场磁耦合到超导材料的分支。

[0030] 优选地,磁场发生器可以包括由导体的一个或多个匝组成的磁场发生器线圈。该发生器线圈可以被布置成通过将来自交流电源的电流经由一个或多个匝耦合到芯而在芯中产生磁场。例如,发生器线圈可以包括缠绕在芯周围的一个或多个匝。通过将超导材料环绕芯的至少一部分,在芯中产生的磁场可以磁耦合到超导材料的环路。此外,在将线圈添加到本文所述的超导材料的环路的情况下,这些线圈可用于将磁场耦合到超导环路中。换言之,线圈可以缠绕在磁芯上,以增加磁场发生器与超导环路之间的磁耦合。

[0031] 在该技术的其它形式中,磁场发生器线圈可以位于超导材料的环路和/或线圈内。可替代地,发生器线圈可以缠绕在超导材料的环路和/或线圈上。在又一个可替代实施例中,发生器线圈可以沿着环路和/或线圈的公共轴线定位。在前述的每一种布置中,发生器线圈和超导环路和/或线圈优选彼此同轴。换言之,发生器线圈被布置成使得发生器线圈的轴线大致平行于超导环路的轴线和/或环路的线圈的轴线,并且由发生器线圈通过环路和/或线圈产生的磁场的方向通常平行于环路的轴线。还应当理解,在不使用线圈的本技术的实施例中,上述布置可以仅应用于环路。

[0032] 优选地,用于发生器线圈中的导体可以是非超导材料,诸如铜或铝。非超导材料的使用可以有利地允许低成本磁场发生器。然而,这不应当被认为是对本技术的限制,并且在可替代实施例中,发生器线圈可以包括一个或多个超导体,诸如钇钡铜氧化物(YBCO)。

[0033] 优选地,磁场发生器被配置为在基本上平行于环路的轴线的方向上产生通过环路的时变磁场。与使磁场穿过环路的一个或多个导体相比,使时变磁场沿具有基本平行分量的方向穿过环路可以有利地更高效。

[0034] 在本技术的一个或多个实施例中,在电开关的端子之间穿过的传输电流可以是直流电流(DC)。在可替代实施例中,可以使用交流电流(AC)。

[0035] 优选地,磁场发生器可以被配置为使得:当磁场发生器被激活时,其在分支中感应到足以在超导材料中引起电阻耗散而不失超(quenching)的屏蔽电流。应当理解,当温度超过临界温度时,超导材料发生失超。因此,如果有足够的冷却以保持超导材料低于临界温度,则超导材料中的总电流可以超过超导体的临界电流而不失超。换言之,如果超导材料中的局部散热超过了热量可以除去的速率,那么它就有可能失超。例如,在本技术的一种或多种应用中,在未失超状态下操作超导体可能是有益的。特别是在需要快速开关速度的应用中,诸如整流器中的开关部件。

[0036] 在本技术的可替代实施例中,磁场发生器可以被配置成使得:当磁场发生器被激活时,它在分支中感应出足够大的屏蔽电流,使得分支中的总能量耗散足以使超导材料失

超。虽然超导材料的失超是系统冷却的函数,但是应当理解,在一个或多个实施例中,超导材料的失超可以被配置为当传输电流和屏蔽电流之和等于或大于超导材料的临界电流时发生。当电开关用于故障限流器时,这种失超状态可能是特别有利的,因为可以产生更高的限流电阻。

[0037] 优选地,当磁场发生器被停用时,磁场发生器可以基本上不产生磁场或产生恒定磁场,或者产生不足以感应出使分支电阻增加的屏蔽电流的磁场。

[0038] 优选地,当处于低电阻状态时,超导材料的分支可以是超导的。例如,超导材料的分支在低电阻状态下具有基本为零的电阻可能是有利的。应当理解,超导材料的分支之间的连接可以具有本文所述的一些非零电阻,同时仍然结合在本技术的形式中。

[0039] 优选地,当磁场发生器工作时,分支可以处于仍然是超导的较高电阻状态。例如,有利的是,超导材料的分支是超导的,同时仍然具有比超导材料在低电阻状态下的电阻高的电阻。然而,这不应当被认为是对本发明的限制,例如,在较高电阻状态下,超导材料的分支可以是非超导的,例如超导材料可能已经失超,或者电流可能超过超导体的临界电流。

[0040] 根据本技术的另一方面,本发明提供了一种整流器,其包括本文所述的电开关和控制机构,该控制机构被配置为在低电阻状态和较高电阻状态之间控制至少一个电开关中的每一个,以便对来自交流电流源的电流进行整流。

[0041] 优选地,整流器包括变压器,该变压器包括初级侧和次级侧,其中至少一个电开关连接到变压器的次级侧。控制机构可以基于变压器中的交流电流的流动方向对至少一个电开关中的每一个在低电阻状态和较高电阻状态之间进行控制。例如,控制机构可以被配置为基于变压器的初级侧中的交流电流的流动方向来控制至少一个电开关。

[0042] 在一个实施例中,整流器可以是半波整流器。在可替代实施例中,整流器可以是全波整流器。

[0043] 优选地,整流器可以包括根据本技术的一个或多个开关。

[0044] 根据本技术的另一方面,提供了一种故障限流器,其包括如本文所述的电开关和控制机构,该控制机构被配置为在检测到故障时使至少一个电开关处于较高电阻状态。

[0045] 优选地,故障限流器可以包括根据本技术的一个或多个开关。

[0046] 从前面的描述中应当清楚,本技术可以提供优于传统开关的一个或多个优点,包括:

[0047] • 更高的开关电阻,即在较高电阻状态下具有更高的电阻(超导或非超导),而在低电阻状态下保持超导;

[0048] • 更紧凑的开关,特别是在发生器线圈和超导线圈同轴对齐的实施例中;

[0049] • 由于在超导环路中产生了电阻,因此能够使用与以前的开关相比使用更小的磁芯工作的开关;

[0050] • 更高效的开关,其还能够降低低温系统中的总损耗;

[0051] • 与现有的超导体开关相比,具有更低的成本、更简单的结构;

[0052] • 与现有的开关相比,能够更快地在低电阻状态和较高电阻状态之间切换的开关;

[0053] • 与现有的开关相比,允许更小的磁场发生器电流和电压的开关。特别是在开关是无感的或具有低电感的实施例中;

[0054] • 由于不需要在垂直于超导体表面的方向上施加磁场,因此可以用较小的磁场发生器线圈尺寸进行操作的开关结构;

[0055] • 由于磁场不需要穿透超导材料,因此可以使用较小的外加磁场进行操作的开关;以及

[0056] • 能够减轻或减少超导体中局部热点出现的开关。

[0057] 本领域的技术人员在阅读了下面的描述之后,应当在其所有新颖方面中考虑的技术的其它方面将变得显而易见,下面的描述提供了该技术的实际应用的至少一个示例。

附图说明

[0058] 下面将参考以下附图,仅以示例的方式描述本技术的一个或多个实施例,而不旨在对其进行限制,其中:

[0059] 图1示出了高温超导体的示例性电场-电流曲线图;

[0060] 图2A示出了根据本技术的开关的第一实施例;

[0061] 图2B示出了处于低电阻状态的图2A的开关;

[0062] 图2C示出了处于较高电阻状态的图2A的开关;

[0063] 图3示出了根据本技术的开关的另一个实施例;

[0064] 图4示出了根据本技术将磁场发生器耦合到开关的方法;

[0065] 图5示出了一曲线图,该曲线图比较了在存在和不存在变化磁场的情况下在超导开关的端子两端测量的电压;

[0066] 图6示出了根据本技术将磁场发生器耦合到开关的一种可替代方法;

[0067] 图7示出了采用根据本技术的开关的全波整流器的简化示意图;

[0068] 图8示出了采用根据本技术的开关的半波整流器的简化示意图;

[0069] 图9示出了采用根据本技术的开关来构造全波整流器的一种方法;

[0070] 图10示出了根据图9的实施例构造的全波整流器的示例性电流和电压波形;以及

[0071] 图11示出了采用根据本技术的开关的故障限流器的简化示意图。

具体实施方式

[0072] 背景

[0073] 为了帮助理解本技术,读者应当熟悉超导术语,包括:

[0074] • 超导体的临界温度;以及

[0075] • 超导体的临界电流。

[0076] 然而,为了读者的利益,我们在下面简要讨论这些概念。

[0077] 超导体的临界温度通常定义为这样的温度:低于该温度时,超导体的电导率降至零或接近零。换言之,当超导体的温度低于临界温度时,超导体被称为处于超导状态,当温度高于临界温度时,超导体被称为处于非超导状态。许多超导体具有接近绝对零的临界温度;例如,已知汞的临界温度为4.1K。然而也已知一些材料可以具有高得多的临界温度,例如30至125K;例如,二硼化镁的临界温度约为39K,而钇钡铜氧化物(YBCO)的临界温度约为92K。这些超导体通常被称作高温超导体(HTS)。

[0078] 高温超导体线或带的临界电流通常定义为在超导体线/带中流动的电流,该电流

导致沿着线的电场降低 $100\mu\text{V}/\text{m}$ ($=1\mu\text{V}/\text{cm}$)。应当理解,临界电流是所使用的超导材料和超导材料的物理布置的函数。例如,较宽的带/线可以具有比由相同材料构成的较细的带/线更高的临界电流。然而,应当理解,在整个说明书中,参考超导体/超导材料的临界电流是为了简化讨论。

[0079] 在超导体/超导材料中,如果电流 I 大约等于临界电流 I_c ,则超导体的电阻不为零,但很小。然而,如果 I 远大于临界电流 I_c ,则超导体的电阻变得足够大以引起散热,该散热可将超导体加热到其临界温度以上的温度,这进而使其不再是超导的。这种情况有时被称作“失超”,并且可能对超导体本身造成损害。一些故障限流器利用超导体的失超效应,实现大电阻到电源电路的快速一次性切换。这些故障限流器通常能够被复位和重复使用,但是由于超导材料需要重新冷却到其临界温度以下,因此这通常是一个缓慢的过程。

[0080] 图1示出了描绘高温超导体的内部电场-电流曲线的示例图。应当理解,该图中所示的电场通过以下等式与电阻相关:

[0081]
$$E = \frac{IR}{L}$$

[0082] 其中:

[0083] • E 是电场;

[0084] • I 是通过超导体的电流;

[0085] • R 是线的电阻;以及

[0086] • L 是线的长度。

[0087] 因此,图1的曲线与超导体的每单位长度的电阻相关,并且由于所描绘的曲线是非线性的,因此所得到的超导体的电阻与电流是非线性的。

[0088] 在该图中可以看出,在超导体的临界电流(I_c)以下,超导体中的电场强度基本上为零。随着超导体中的电流接近临界电流,超导体中的电场开始增大。在临界电流时,超导体中的电场为 $100\mu\text{V}/\text{m}$ 。将超导体中的电流进一步增加到临界电流以上,导致导体中的电场强度迅速增加。

[0089] 应当理解,贯穿本说明书,将参考超导开关及其部件的相对电阻。本领域技术人员应当理解,超导材料处于超导状态时的电阻可以为零或基本为零,因此,这些电阻更通常地用给定电流下存在于超导材料两端的电场来表示。然而,在整个本说明书中,为了简化前述讨论,已经参考了相对电阻、低电阻和较高电阻状态。

[0090] 本技术的形式

[0091] 图2A是根据本技术的开关200的示意图。

[0092] 开关200包括连接在第一端子204和第二端子206之间的超导材料202。在描述本说明书中的技术时,包括其部件的开关被称作“超导的(superconducting)”。对于本领域的技术人员应当显而易见的是,该术语并不旨在限制本技术的范围,并且应当理解,在某些条件下,该开关及其部件可能不处于超导状态,即开关可以被描述为超导性的(superconductive)而不是超导的(superconducting)。然而,为了一致性,在本说明书中,该开关及其部件可以被描述为“超导的”。

[0093] 在本发明的优选实施例中,超导材料202包括稀土钡铜氧化物(ReBCO)带,例如钇钡铜氧化物带或钆钡铜氧化物带。然而,这不应当被认为是对本发明的限制,并且应当理

解,本发明与包括高温超导体的其它超导材料相容,并且带的使用不应当被认为是限制。

[0094] 在使用中,传输电流 I_t 被选择性地施加以在第一端子204和第二端子206之间流动。换言之,传输电流 I_t 可根据需要关闭或开启。

[0095] 应当理解,为了简化上述讨论,在图2A中,第一端子204被示为正端子,而第二端子206被示为负端子。类似地,传输电流 I_t 示出为从第一(正)端子204流向第二(负)端子206,如对于常规定义的直流(DC)电压所预期的。然而,如从前述讨论中应当显而易见的是,DC电压的使用不应当被认为是对本技术的限制。还应当理解,在DC电流的情况下,由于超导材料202的低电阻、零电阻或接近零电阻,超导材料经受的损耗可忽略。在使用AC电流的情况下,由于寄生效应,损耗通常会更高,虽然总损耗仍显著小于等效的非超导材料。

[0096] 两个端子204、206之间的超导材料202形成为环路210的方式,环路210包括两个电并联的超导分支212a、212b。

[0097] 可以通过使用本领域技术人员已知的方法将两种或更多种超导材料接合在一起,来形成这些超导分支212a、212b,所述方法包括提供非零接头电阻的方法。可替代地,可以使用任何提供基本零电阻的接头的方法来形成分支212a、212b,诸如通过将超导带拆分成两个并行分支。

[0098] 在使用中,使用连接在第一端子204和第二端子206之间的电路(未示出)在第一端子204和第二端子206之间施加传输电流。该电路可以包括电源,诸如电压源或电流源、变压器或本领域技术人员应当知道的任何其它合适的电路。然后,沿垂直于环路210平面的方向(或者具有垂直于环路210平面的分量),即平行于环路210的轴线,该轴线垂直于环路210的平面,选择性地向环路210或环路210内施加时变磁场 $B_{app}(t)$ 。在图2A中,时变磁场被施加到环路210,使得磁场穿过环路210。沿基本上或至少部分垂直于环路平面的方向提供时变磁场可以是有利的,以便减少否则将由于磁场穿透或试图穿透超导材料202而引起的损耗。

[0099] 该时变磁场 $B_{app}(t)$ 引起屏蔽电流(I_s) 在环路210的分支212a、212b之间绕流,以抵抗环路210中的磁通变化。该屏蔽电流 I_s 加上在环路210周围流动的传输电流,结果总电流增加。电流的这种增加可能导致超导材料的电阻略微增加(例如当电流小于临界电流 I_c 时,如图1所示),或超导材料的电阻显著增加(例如当电流 I_c 接近、大于或等于超导体的临界电流时,如图1所示)。

[0100] 现在参考图2B,图2B示出了图2A的开关200在没有时变磁场或存在非时变磁场或弱时变磁场的情况下如何动作。从图2B中可以看出,流过环路210的电流基本上等于传输电流。随着时变磁场的施加,或者磁场的幅值增大或减小,屏蔽电流 I_s 围绕环路210流动,如图2C所示。如果任一个分支212a、212b中的传输电流 I_t 和屏蔽电流 I_s 之和接近或超过超导体的临界电流,则分支212a、212b的有效电阻增加。结果,可以施加时变磁场以使开关在低电阻状态和较高电阻状态之间切换。

[0101] 开关200的低电阻状态可被认为等效于开关200的闭合状态,而较高电阻状态类似于开关200的断开状态。然而,应当理解,较高电阻状态不是机械开关常见的电开路,而是表示环路保持在超导状态的较高电阻导电状态,除非随后还加热到高于 T_c 。

[0102] 在一些实施例中,低电阻状态可以是超导状态,其中环路210的分支212a、212b的电阻接近或基本为零。也就是说,在优选实施例中,开关的低电阻状态使环路210的至少一部分处于超导状态。然而,这不应当被认为是对本技术的限制,并且在可替代实施例中,低

电阻状态可以是部分超导状态。例如,一个或多个低电阻接头通过正常导电金属焊接接头形成在环路的超导元件之间。

[0103] 类似地,高电阻状态可以是超导状态,其中环路210的分支212a、212b的电阻接近于零,但大于低电阻状态下的电阻。在本技术的一种应用中,处于高电阻状态的环路210的分支212a、212b的电阻可以是基本上非零的。例如,环路210可以处于非超导状态或部分超导状态。

[0104] 因此,应当理解,本技术提供了一种开关,当该开关暴露于时变磁场或当时变磁场的幅值变化时,该开关能够在低电阻状态和较高电阻状态之间切换。这有利地允许构造比传统的电流开关更可靠地更快切换的非接触式开关。其它潜在的优点包括产生开关元件的能力,该开关元件是:

- [0105] • 比传统的开关更紧凑,这将从上述讨论中变得显而易见;
- [0106] • 比热开关更快的切换,特别是在开关的较高电阻状态为超导状态的应用中;
- [0107] • 与现有的交流电场控制开关相比,能够实现更高的关断电阻;
- [0108] • 由于从超导体中排除了磁场,因此超导体中的耗散降低,因此比传统的开关更高效;
- [0109] • 由于该开关是非接触的并且具有较低的耗散,因此比现有的开关更可靠;以及
- [0110] • 较低的电感,其允许磁场发生器的较低功率驱动源。

[0111] 图3示出了根据本技术的开关300的另一个实施例。与前述实施例类似,超导材料202被布置在包括两个电并联分支312a、312b的环路310中。然而,在该实施例中,每个分支312a、312b包括超导材料的线圈314a、314b,并且每个线圈包括一个或多个匝。

[0112] 参考附图和前面的描述应当理解,本技术的环路包括两个或更多个电并联的导电路径。相反,本技术的线圈各自具有由一个或多个匝组成的单一导电路径。

[0113] 在使用中,沿垂直于环路310和/或线圈314a、314b的平面(或具有垂直于环路310和/或线圈314a、314b的平面的分量)的方向通过环路310在线圈314a和314b的两端选择性地施加时变磁场 B_{app} 。这导致屏蔽电流 I_s 围绕由两个并联连接的分支312a、312b形成的闭合环路310流动。根据前述实施例,该屏蔽电流可用于选择性地使开关300在低电阻和较高电阻状态之间切换。

[0114] 可能希望第一分支312a包括沿顺时针方向缠绕的一个或多个线圈314a,而第二分支312b包括沿逆时针方向缠绕的一个或多个线圈314b,反之亦然。这种布置可用于确保第一线圈314a中的屏蔽电流沿与第二线圈314b中的屏蔽电流相同的方向感应,从而促使屏蔽电流围绕环路310流动。此外,线圈314a、314b的使用可以有利地使实际上更容易地均衡每个分支312a、312b的电感。例如,通过使用具有一个或多个匝的线圈314a、314b,每个分支312a、312b之间的几何差异成为每个分支中电流匝数的较小分数。

[0115] 这种布置的另一个潜在优点是,由于每个分支中的开关长度较长,因此它可以允许比先前的实施例更高的开关电阻。

[0116] 图4是示出图3的开关300的一种实际应用的示意图。在该实施例中,可以通过引导磁通量通过芯406来改善变化磁场发生器402和开关404之间的耦合。以这种方式,图4的布置类似于本领域技术人员应当熟知的变压器的布置。

[0117] 芯406优选地是高磁导率的芯,诸如铁芯,然而,这不应当被认为是对本技术的限

制,这将从前面的讨论中变得显而易见。

[0118] 为了简化起见,磁场发生器402被示为经由线圈410磁耦合到芯的AC源,线圈410包括一个或多个匝。然而,这不应当被认为是对本技术的限制,并且可以使用例如通过切换DC电流源来产生变化磁场的可替代方法。

[0119] 为了简化上述讨论,并且为了将磁场发生器的线圈410与开关402的线圈414a、414b区分开,这里将磁场发生器的线圈410称为磁场发生器线圈410,或者简单地称为发生器线圈。

[0120] 还应当理解,磁场发生器线圈410可以由任何合适的导电材料构成,该导电材料包括超导材料(诸如YBCO)或非超导材料(诸如铜和铝)。在一个优选实施例中,发生器线圈410由铜构成。这可以有利地提供比使用超导发生器线圈410的类似开关成本更低的开关。

[0121] 为了继续进行变压器类比,发生器线圈410可以被认为是变压器的初级侧,而开关的线圈414a、414b可以被认为是变压器的次级侧。

[0122] 然而,与传统变压器不同,开关404的超导线圈414a、414b以相反的旋转方向缠绕在铁芯406上,并且彼此并联电连接。结果,如果线圈414a和414b各自具有相同的匝数,则次级绕组线圈短路,并且由线圈414a和414b包围的净磁通近似为零。芯406的目的是将所施加的磁场耦合到形成环路416的一对线圈414a和414b。这导致在环路416中产生屏蔽电流,以抵抗来自磁场发生器402的磁通变化。

[0123] 在使用中,磁场发生器402可以选择性地启用,或者根据需要改变幅值,以使开关404在低电阻状态和较高电阻状态之间转换。

[0124] 在低电阻状态下,磁场发生器402不在芯406中产生变化的磁场,或者在芯406中产生弱磁场,传输电流 I_t 倾向于在两个并行分支412a、412b之间均匀地共享。在这种状态下,这些分支412a、412b具有零或接近零的电阻,此外,由于线圈414a、414b以反向旋转的方向缠绕,因此在端子204和206上存在的电感很小。此外,由于线圈414a、414b沿反向旋转方向缠绕且并联连接,因此从线圈414a、414b感应到芯406中的磁通也基本上为零或非常小。

[0125] 当磁场发生器402被激活,或者所施加的磁场的幅值增大或减小时,屏蔽电流 I_s 如上所述形成在超导线的环路416中。如果分支414a、414b中的一个或两个中的传输电流 I_t 和屏蔽电流 I_s 之和接近、等于或超过超导材料的临界电流,则在分支中将存在非零电阻。因此,可以激活磁场发生器402,或者可替代地改变磁场发生器的幅值,以使开关404在低电阻和较高电阻状态之间切换。

[0126] 图5示出了根据本技术的一种形式的开关的端子204、206两端的电压的测量示例。在该图中,开关两端的电压是在开关的端子204、206之间测量的电压。磁场发生器电流反映由磁场发生器402施加到发生器线圈410的电流的幅值。

[0127] 为了完整起见,注意到使用电流源在端子204、206上施加大约80安培的DC电流。超导线圈414a、414b各自由4mm宽的YBCO带的单匝组成,发生器线圈使用200匝铜线。

[0128] 可以看出,在没有变化的磁场(大约80.5秒之后)的情况下,在端子204、206两端测量的电压基本上为零。换言之,在没有时变磁场的情况下,超导材料是超导的。这表示开关的低电阻状态。相反,当施加变化磁场时(在80.5秒之前),在两端测量的电压波动,表示超导材料的电阻变化。此外,当施加这种变化磁场时,观察到端子两端的峰值电压。这表示开关的较高电阻状态。应当理解,取决于开关的预期应用,开关的这种较高电阻状态可以表示

超导或非超导状态。

[0129] 图6示出了根据本技术的开关600的又一实施例。在该实施例中,变化磁场发生器402的发生器线圈410与开关600的线圈414a、414b同轴对齐。这可以有利地改善发生器线圈410和开关600的超导线圈414a、414b之间的磁场耦合。

[0130] 在所示实施例中,开关600的超导线圈414a、414b的匝与发生器线圈410的匝交错。然而,这不应当被认为是对本技术的限制。例如,超导线圈414a、414b可轴向定位在发生器线圈410的内部。可替代地,发生器线圈410可以轴向地位于超导线圈414a、414b的内部。在又一个替代方案中,发生器线圈410可以与线圈414a、414b纵向间隔开。还可以设想,第一超导线圈414a可以位于第二超导线圈414b的可替代位置;例如,第一超导线圈414a可以位于发生器线圈410的下方,第二超导线圈414b位于发生器线圈410的上方。

[0131] 发生器线圈410和超导线圈414a、414b同轴对齐的另一个优点是可以使用非磁芯或空气芯602。这可以有利地减小开关的寸、重量和成本。对于本领域技术人员来说,使用空气芯的其它优点,诸如在不使芯饱和的情况下驱动更高屏蔽电流的能力,也是显而易见的。

[0132] 本技术的应用

[0133] 图7和图8分别示出了根据本技术的形式的全波整流器700和半波整流器800的示例性电路图。这些示例代表了本技术的开关的应用,而决不意味着被认为是对技术范围的限制。对于本领域技术人员来说,开关的其它应用应当是显而易见的,特别地,本技术的超导开关可以是现有电流开关的改进,并且可以应用于超导磁体、磁共振成像(MRI)、核磁共振(NMR)、磁通泵、故障限流器和磁能存储系统。可选地,本发明的开关可用于在广泛的应用中取代传统的开关,例如AC场开关、半导体开关和/或机械开关。

[0134] 在这些实施例中,开关 S_1 、 S_2 已被象征性地表示以简化前述讨论。然而,应当理解,这些开关 S_1 、 S_2 可以使用本文所述的任何方法来构造。此外,为了简化前述讨论,假设两个开关符号表示根据本技术的超导开关。然而,应当理解,所示的一个或多个开关可以替代地是传统开关,诸如AC场开关、诸如晶体管的半导体开关、诸如继电器或电阻器的机械开关。

[0135] 首先参考图7,可以看出,整个电路拓扑结构是已知的全波整流器700的拓扑结构。变压器704具有包括至少一个线圈的初级侧702a和包括至少一个线圈的次级侧702b。交流电源被提供给初级侧702a。两个开关 S_1 、 S_2 连接到变压器704的次级侧702b。负载706与开关 S_1 、 S_2 并联连接在第一端子708和第二端子710之间。第一端子708例如经由公共中心抽头连接而连接到变压器704的次级侧702b的中间绕组。

[0136] 该电路的一般原理对于本领域的技术人员应当是众所周知的,但是为了清楚起见,我们简要地概述该操作。

[0137] 在使用中,交流电流 I_1 被施加到变压器704的初级侧702a。该电流在变压器的次级侧702b感应出电流 I_2 。初级侧702a电流与次级侧702b电流的比率是变压器704的初级侧702a上的匝数与变压器704的次级侧702b上的匝数比的函数,这对于本领域技术人员是已知的。

[0138] 整流器700包括控制机构(未示出)。控制机构被配置为控制开关 S_1 、 S_2 中的每一个的状态,以对交流电流源进行整流。例如,控制机构控制开关 S_1 、 S_2 中的每一个,使得每个开关的状态基于变压器704的初级侧702a或次级侧702b中的交流电流的流动方向。由于交流电流的流向取决于电流的相位,因此控制机构以定时方式控制开关 S_1 、 S_2 中的每一个的状

态。

[0139] 当变压器704的次级侧702b中的电流沿第一方向流动时(例如当电流为正时),第一开关 S_1 被置于其低电阻状态,而第二开关 S_2 被置于其较高电阻状态。这导致围绕电路的上半部的较低阻抗路径,并且导致电流从第一端子708通过负载706流到第二端子710。在该状态下,第一开关 S_1 与负载串联,而第二开关 S_2 与负载并联。该负载可以是本领域技术人员已知的任何合适的负载。例如,它可以是负载线圈或电阻元件。在又一个实施例中,负载可以很大或基本上开路的,以便简单地提供开路电压。

[0140] 本技术的一个应用是将超导线圈作为负载附接。该超导线圈可以使用正常导电的焊接接头连接,同时仍然结合在本技术的形式中。

[0141] 当变压器704的次级侧702b中的电流沿第二方向流动时(例如,当电流为负时),第一开关 S_1 被置于较高电阻状态,而第二开关 S_2 被置于低电阻状态。在该状态下,第一开关 S_1 与负载并联,而第二开关 S_2 与负载串联。这导致围绕电路下半部的较低阻抗路径,并导致电流从第一端子708通过负载706流到第二端子710。

[0142] 以这种方式,不管感应到变压器704的第二侧702b中的电流的方向如何,电流总是沿单一方向从正端通过负载流到负端。因此,变压器704的初级侧702a的交流电流被全波整流为通过负载706的直流电流。

[0143] 在示例中,控制机构可以被配置为使得:在将开关 S_1 、 S_2 从较高电阻状态转换到低电阻状态时,或反之亦然,控制机构可以首先将两个开关 S_1 、 S_2 暂时都转换到较高电阻状态,以便减少否则可能存在于切换过程中的任何短路或“撬棒(crowbar)”电流。

[0144] 应当理解,全波整流器可以以这种方式构造,使得次级侧702b上的电流路径基本上是超导的。这可以有利地提供比现有设计更紧凑或更高效的全波整流器。还应当理解,整流器还可以包括非超导部件,同时保持基本上超导的次级侧电流路径。例如,变压器的初级侧702a可以使用诸如铜或铝的非超导材料来构造,并且开关 S_1 、 S_2 的发电机线圈(未示出)也可以使用本文所述的非超导部件。此外,可以使用诸如金属焊料的非超导材料来形成包括超导元件的本技术的任何部件之间的接头,同时仍然结合在本技术的形式中。

[0145] 应当理解,在整流器应用中,在高电阻和低电阻状态之间的切换时间短可能是重要的。在这些应用中,优选超导材料保持在其临界温度之下,因为超导材料的失超在切换之后会引入热时滞,在热时滞期间超导材料必须冷却回到其工作温度。

[0146] 现在参考图8,可以看出,总体的电路拓扑结构是已知的半波整流器800的拓扑结构。变压器704具有包括至少一个线圈的初级侧702a和包括至少一个线圈的次级侧702b。交流电流源被提供给初级侧702a。两个开关 S_1 、 S_2 如图所示连接到变压器704的次级侧702b。负载706并联连接到其中一个开关的两端,在图8的示例中为开关 S_2 。负载连接在第一端子708和第二端子710之间。

[0147] 该电路的一般原理对于本领域的技术人员应当是众所周知的,但是为了清楚起见,我们简要地概述该操作。

[0148] 与前面的实施例一样,变压器704的初级侧702a由交流电流 I_1 驱动,该交流电流 I_1 在变压器的次级绕组702b中感应出交流电流 I_2 。

[0149] 整流器800包括控制机构(未示出)。控制机构被配置为控制开关 S_1 、 S_2 中的每一个的状态,以对交流电流源进行整流。例如,控制机构控制开关 S_1 、 S_2 中的每一个,使得每个开

关的状态基于变压器704的初级侧702a或次级侧702b中的交流电流的流动方向。由于交流电流的流向取决于电流的相位,因此控制机构以定时方式控制每个开关 S_1 、 S_2 的状态。

[0150] 当次级侧电流 I_2 沿第一方向流动(即电流为正)时,第一开关 S_1 被置于其低电阻状态,第二开关 S_2 被置于其较高电阻状态。因此,低电阻路径形成在环路的外部周围,从变压器702b的次级侧,通过开关 S_1 ,并从第一端子708跨过负载706到达第二端子710。当电流的极性改变(例如从正向改变到负向)时,开关 S_1 切换到其高电阻状态,并且开关切换到其低电阻状态。 S_1 的较高电阻状态阻止了来自变压器的电流流动,从而提供了阻断负极性电流流动的措施。同时, S_2 的低电阻状态为负载中的电流提供了一条路径,即使在衰减的同时也能继续流动。因此,流过负载的电流被半波整流。

[0151] 本领域的技术人员将认识到,合适的控制机构使开关 S_1 、 S_2 的状态能够以图7和图8所示的技术形式如所描述的进行控制。例如,开关 S_1 、 S_2 可以使它们各自的变化磁场发生器与变压器电流(初级或次级)的极性同步地被激活,以便实现低电阻和较高电阻状态。这可以使用本领域中任何已知的控制机制来实现,包括使用半波整流电流信号作为激活磁场发生器的手段。该半波整流电流信号可以作为变压器704上的另一次级绕组提供,或者使用本领域技术人员已知的任何其它方法提供。

[0152] 然而,应当理解,磁场发生器不需要与变压器电流同步地被激活。例如,在变压器电流的过零点附近具有一些死区时间(dead-time)(S_1 或 S_2 都不激活/处于低电阻状态)可能是有利的。

[0153] 还应当理解,在提供多个开关的实施例,例如本文所述的半波800和全波700整流器,单个磁场发生器可以被配置成在一个或多个开关中产生屏蔽电流。例如,磁场发生器可以具有两个或更多个发生器线圈,每个发生器线圈被配置为在各个开关中的每一个上产生变化的磁场。然后,磁场发生器可以被配置为基于要调节的电流的极性来交替地驱动哪个发生器线圈。在此类实施例中,整流器的控制机构包括控制磁场发生器以这种方式操作的机构。在整流器应用中使用单个磁场发生器可以有利地减小所得到的整流器的尺寸、成本和/或复杂性。

[0154] 现在参考图9,图9示出了如何根据本技术构造图7的全波整流器900的示例。在该实施例中,提供了一种驱动变压器902,它为电路产生驱动电流或传输电流 I_t/I_2 。在一个优选实施例中,驱动变压器902是降压变压器,换言之,可能希望驱动变压器902在其初级侧904a上具有比其次级侧904b更多的匝数,以便实现在超导电路中使用的大电流。例如,该驱动变压器902可以具有介于300:1到600:1之间的匝数比。在所示的实施例中,变压器具有大约900个初级匝数和两个次级匝数,比例为450:1。此外,由于需要相对较少匝数的昂贵超导材料,因此减少驱动变压器902的次级侧904b上的匝数可以降低成本。使用大匝数比也可用于使用正常传导的初级电流产生大的超导AC次级电流。使用较少数量的初级匝数来实现这一目的,降低了初级中的电阻损耗,同时保持了较小的尺寸。在有利于减少磁通泄漏的可替代应用中,增加次级上的匝数可能是有利的。

[0155] 应当理解,该驱动变压器902基本上为图7的变压器704的镜像。

[0156] 在该图中还示出了第一开关906和第二开关908。每个开关包括耦合芯910a、910b和变化磁场发生器912a、912b。耦合芯910a、910b用于将在发生器线圈914a、914b中产生的磁场耦合到相应的线圈916a、916b、916c、916d,以便激活图7的开关 S_1 和 S_2 。所示的芯910a、

910b优选为铁氧体芯或叠层钢/铁芯。然而,应当理解,也可以使用在工作频率下具有高相对磁导率的可替代芯。在本技术的可替代实施例中,芯可替代地包括基本上非磁性的材料,或者如图6所述的空气芯。

[0157] 在优选实施例中,与超导线圈916a、916b、916c、916d中的匝数相比,开关906、908在发生器线圈914a、914b中包括更多匝数。该比率可以有利地允许在超导体的线圈中具有更大的磁通密度,而不需要大量匝数的相对昂贵的超导材料。例如,每个开关906、908的匝数比可以在50:1和150:1之间。在所示的实施例中,开关906和908各自具有大约200个初级(发生器线圈)匝数和2个次级(超导线圈)匝数,其比率为100:1。

[0158] 图9所示结构的一个优点是驱动变压器的初级侧904a上的绕组与驱动变压器902的次级侧904b上的超导体绕组电隔离。此外,每个开关906、908的发生器线圈914a、914b与超导材料的相应线圈916a、916b、916c、916d电隔离。这可以有利地导致比现有的整流器电路更安全的结构,并且可以进一步允许DC磁体在以大电流操作的同时被充电。

[0159] 对本领域的技术人员应显而易见的是,本拓扑镜像了图7的拓扑。因此,关于图7的操作的讨论也适用于图9的实施例。

[0160] 在一种形式中,用于控制开关906和908在低电阻状态和较高电阻状态之间的状态改变的定时的合适控制机构可以包括在驱动变压器902的初级侧904a中的初级电流 I_1 以及在开关906和908的发生器线圈914a和914b中的电流。可替代地,可以基于次级电流 I_2 或者通过耦合到驱动变压器902(未示出)的第三线圈,来控制电流 I_{s1} 和 I_{s2} 。例如,该连接可以被配置为使得当驱动变压器902的初级侧904a中的初级电流 I_1 沿第一方向(例如为正)流动时 I_{s1} 流动,并且当驱动变压器902的初级侧904a中的初级电流 I_1 沿第二方向(例如为负)流动时 I_{s1} 不流动,并且使得当驱动变压器902的初级侧904a中的初级电流 I_1 沿第二方向(例如为负)流动时 I_{s2} 流动,而当驱动变压器902的初级侧904a中的初级电流 I_1 沿第一方向(例如为正)流动时 I_{s2} 不流动。如前所述,控制机构在变压器电流的过零点附近包括一段死区时间(开关906、908都不处于低电阻状态)可能是有利的。

[0161] 在本技术的一个示例中,控制机构包括连接到驱动变压器902的一个或多个绕组,驱动变压器902提供电流 I_{s1} 和 I_{s2} 。如前所述,电流 I_{s1} 和 I_{s2} 以与驱动变压器902中的电流同步的方式被激活可能是有利的。例如,当驱动电流为正时,电流 I_{s1} 可以被激活,而电流 I_{s2} 则被停用。类似地,当驱动电流为负时,电流 I_{s1} 可以被停用,而 I_{s2} 被激活(或反之亦然)。这可以使用本领域技术人员已知的任何调节方法来实现,包括半导体开关,诸如二极管和晶体管。例如,可以提供二极管以与驱动电流的各个相位同步地激活变化的磁场发生器912a、912b。在一些示例中,半导体开关(诸如二极管)的正向电压降可以在两个开关都不导通时为电路提供一段死区时间。

[0162] 在本文描述的技术的其它示例中,电流 I_{s1} 和 I_{s2} 以高于驱动电流的频率工作可能是有利的。在这些示例中,控制机构可以被配置为根据驱动电流的极性激活电流 I_{s1} 和 I_{s2} 。例如,驱动电流可以被配置为基于驱动电流的极性来启用变化磁场发生器912a、912b。例如,诸如晶体管的半导体开关可用于在驱动电流为正时接通变化磁场发生器912a,而在驱动电流为负时接通变化磁场发生器912b。可替代地,可以使用单个变化磁场发生器,并且可以使用驱动电流的相位来使用本领域技术人员显而易见的方法在开关906和908之间切换变化磁场发生器的输出。

[0163] 图10示出了在根据图9的实施例构造的电路上测量得到的电流和电压波形。该图包括从上到下示出的5个曲线图：

- [0164] • 施加到驱动变压器902的初级线圈904a的电流；
- [0165] • 在驱动变压器902的次级(超导)线圈904b中测量的电流；
- [0166] • 施加到第一变化磁场发生器912a的发生器线圈914a的电流；
- [0167] • 施加到第二变化磁场发生器912b的发生器线圈914b的电流；以及
- [0168] • 在端子204、206上测量得到的开路电压。

[0169] 从这些曲线图可以看出,施加到驱动变压器902的电流的频率低于在开关906、908的发生器线圈914a、914b中产生的电流的频率。实际上,驱动频率为大约4Hz,屏蔽电流为大约200Hz。通过在发生器线圈914a、914b中使用较高的频率,可以确保在开关906、908通电期间完成屏蔽电流的至少一个周期。开关在通电时(即在其较高电阻状态下)完成一个以上的屏蔽电流周期可能是更有利的,因为这可以提供更稳定的较高电阻状态。

[0170] 端子204、206两端的开路电压波形被示出为全波整流。换言之,与驱动变压器902的电流极性无关,端子204、206两端的电压具有负电压峰值,该负电压峰值对应于开关906、908中每一个的高电阻状态。由于端子204、206两端的电压在调节期间具有一致的极性(负),因此将在端子204、206之间流入负载706的所得电流将类似地一致,从而在一个或多个开关处于较高电阻状态的时段期间全波整流。换言之,图9的电路能够在超导条件下将AC电流切换为DC。

[0171] 当两个开关906、908都不工作时,可以看出在整流器的端子204、206两端存在基本为零的输出电压。这种整流DC电压的一种应用是超导磁体的充电,然而,这并不意味着对本发明的限制,对于本领域的技术人员来说,其它应用应当是显而易见的。

[0172] 图11示出了采用根据本技术的一种形式的开关1102的工作中的故障限流器1100。

[0173] 在该实施例中,交流电源1104与开关1102和负载1106串联。在使用中,开关1102的变化磁场发生器1108不工作或产生足够小幅度的变化磁场,使得通过环路1112的分支1110a、1110b中每一个的电流不超过超导材料1114的临界电流。这导致了开关1102处于低电阻状态,并且超导材料1114两端的电压降最小。当诸如过载或短路之类的故障1116施加到电路时,可以使用本领域技术人员已知的任何方法来检测电流的增加。发生此类检测时,控制机构可被配置成使变化磁场发生器1108被激活或增加其驱动电流,以便将开关1102转换成其较高电阻状态,从而限制将被传送到故障1116中的总功率。

[0174] 在故障限流器1100用于家用AC或电网电力应用(通常为50至60Hz)的情况下,以几千赫或更高频率(例如2kHz至100kHz)驱动变化磁场发生器1108可能是有利的。这可以确保为源电压的每个周期提供多个屏蔽周期,这又可以对电路中电流进行更稳定的限制。

[0175] 与现有的故障限流器相比,本技术的故障限流器1100可以具有许多优点,包括:

[0176] • 能够将开关1102快速地转换到较高电阻状态;例如,故障限流器1100可以在检测到故障状况的毫秒内被激活;

[0177] • 能够基于任何准则主动启用故障限流器1100;例如,可以选择激活故障限流器1100的电流,决定故障限流器1100何时被停用,或者例如基于电路中的电流负载动态地调整触发故障电流;以及

[0178] • 向交流电源1104提供安全的、低回升电压。换言之,由于开关1102可以被构造成

具有低的或基本为零的电感配置,因此可以使用基本为电阻性的负载来限制电流流动,从而减少由于电感元件的切换而可能发生的尖峰。

[0179] 还应当理解,本技术可以更大程度地抵抗由热点引起的损坏的弹性。一般而言,热点描述了由于超导线的临界电流 I_c 的局部减小而导致超导材料被传输电流局部加热的现象。这种 I_c 局部减少可能由超导材料中的缺陷引起,或者由局部的热或磁条件引起,而局部的热或磁条件又引起局部的加热,并可导致局部温度显著升高。这些温度升高又会损坏超导体。在故障限流器中,这种情况可能极为危险。

[0180] 由于本技术能够产生绕超导材料的全环路流动的屏蔽电流,超导体的大部分(如果不是全部的话)能够被驱动进入较高电阻状态。因此,根据本技术的开关能够沿着比现有开关更长的超导线长度更均匀地失超,从而减少局部加热的影响。

[0181] 因此,本技术的应用包括超导磁体、磁共振成像(MRI)、核磁共振(NMR)、磁通泵、故障限流器和磁能存储系统。

[0182] 除非上下文另外清楚地要求,否则在整个说明书和权利要求中,词语“包括”、“包含”等应解释为包含性的意义,而非排他性的或穷举性的意义,即“包括但不限于”的意义。

[0183] 以上和以下引用的所有申请、专利和出版物的全部公开内容通过引用结合于此本文中。

[0184] 在本说明书中对任何现有技术的引用并非、也不应被认为是对该现有技术在世界任何国家的努力领域中形成公知常识的认识或任何形式的建议。

[0185] 本技术也可以广义地包括在本申请说明书中所提及或指出的部件、元件和特征中,单独地或共同地包括在所述部件、元件或特征中的两个或更多个的任何或所有组合中。

[0186] 在前面的描述中已经提到具有已知等效关系的整体或部分的情况下,本文引入这些整体,就像单独提出一样。

[0187] 应当注意,对本文所述的当前优选实施例的各种改变和修改对于本领域技术人员来说是显而易见的。在不脱离本技术的精神和范围以及不降低其伴随的优点的情况下,可以进行此类改变和修改。因此,这些改变和修改应包括在本技术中。

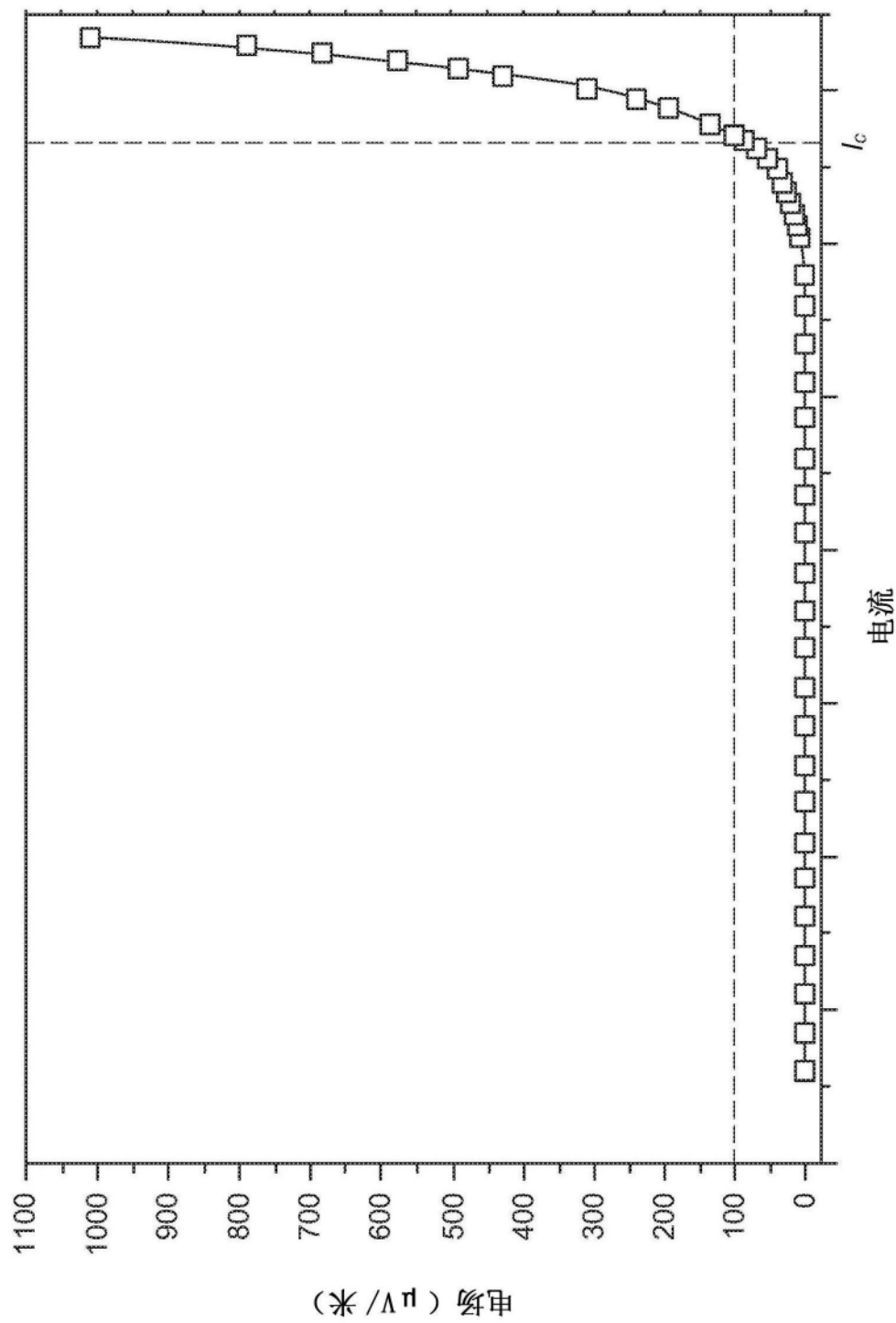


图1

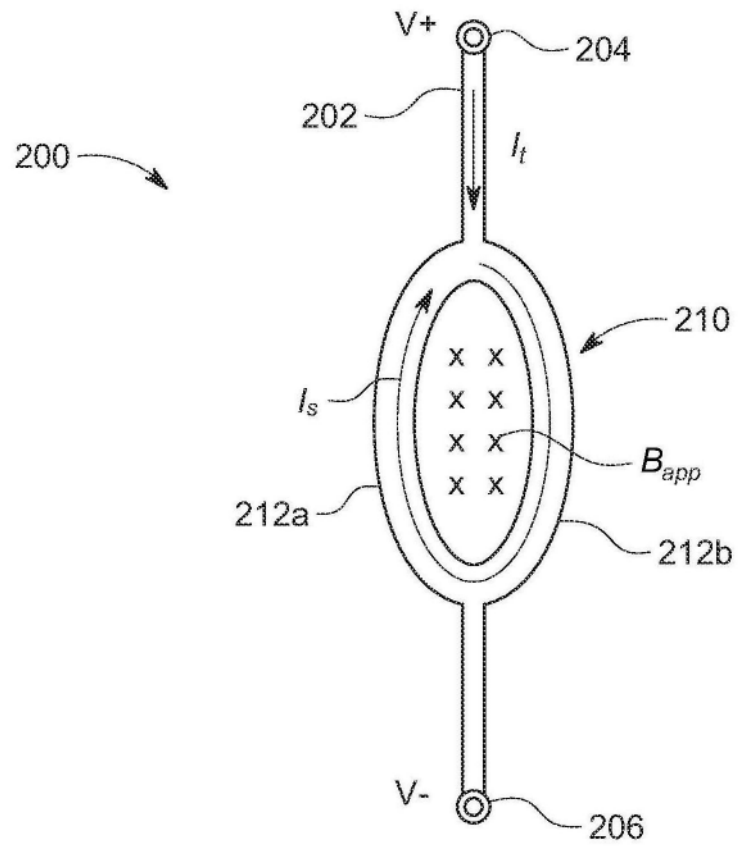


图2A

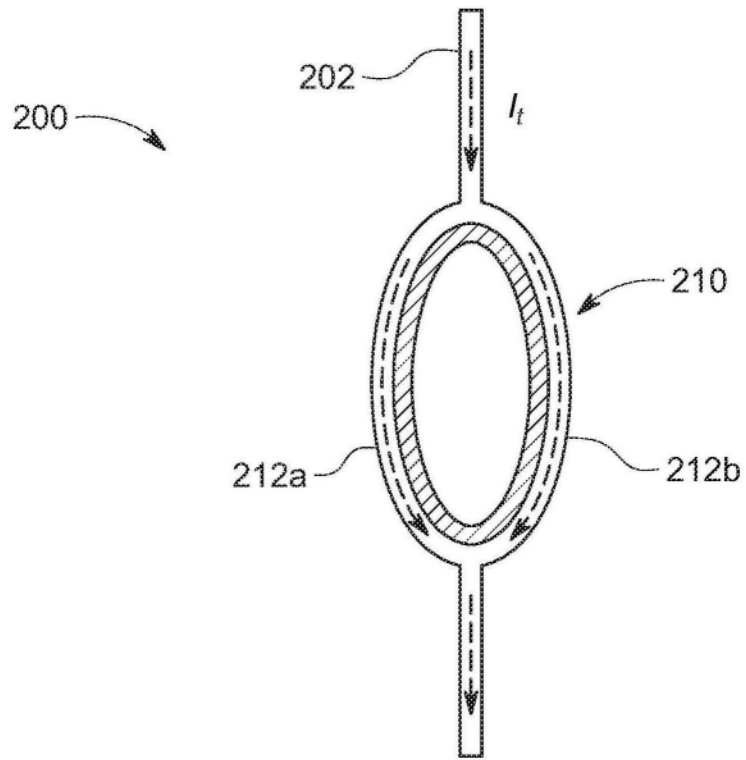


图2B

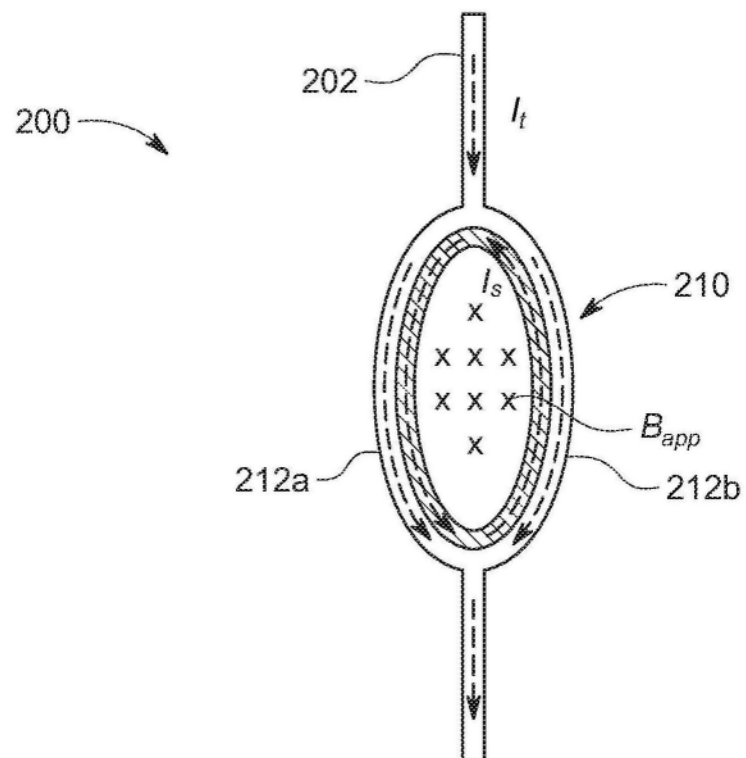


图2C

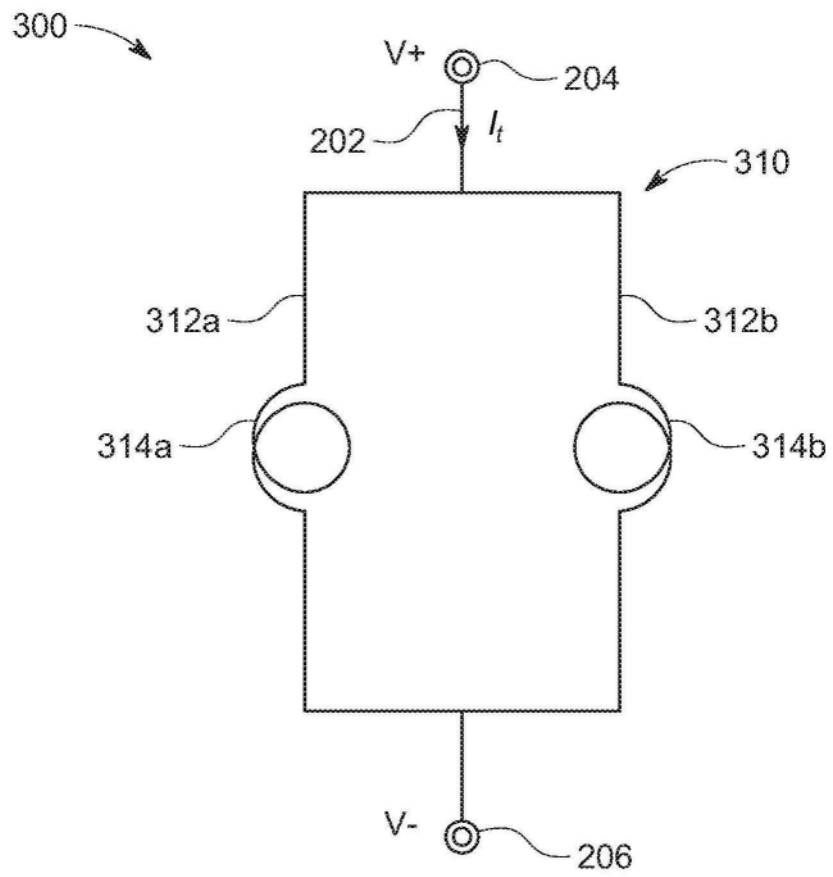


图3

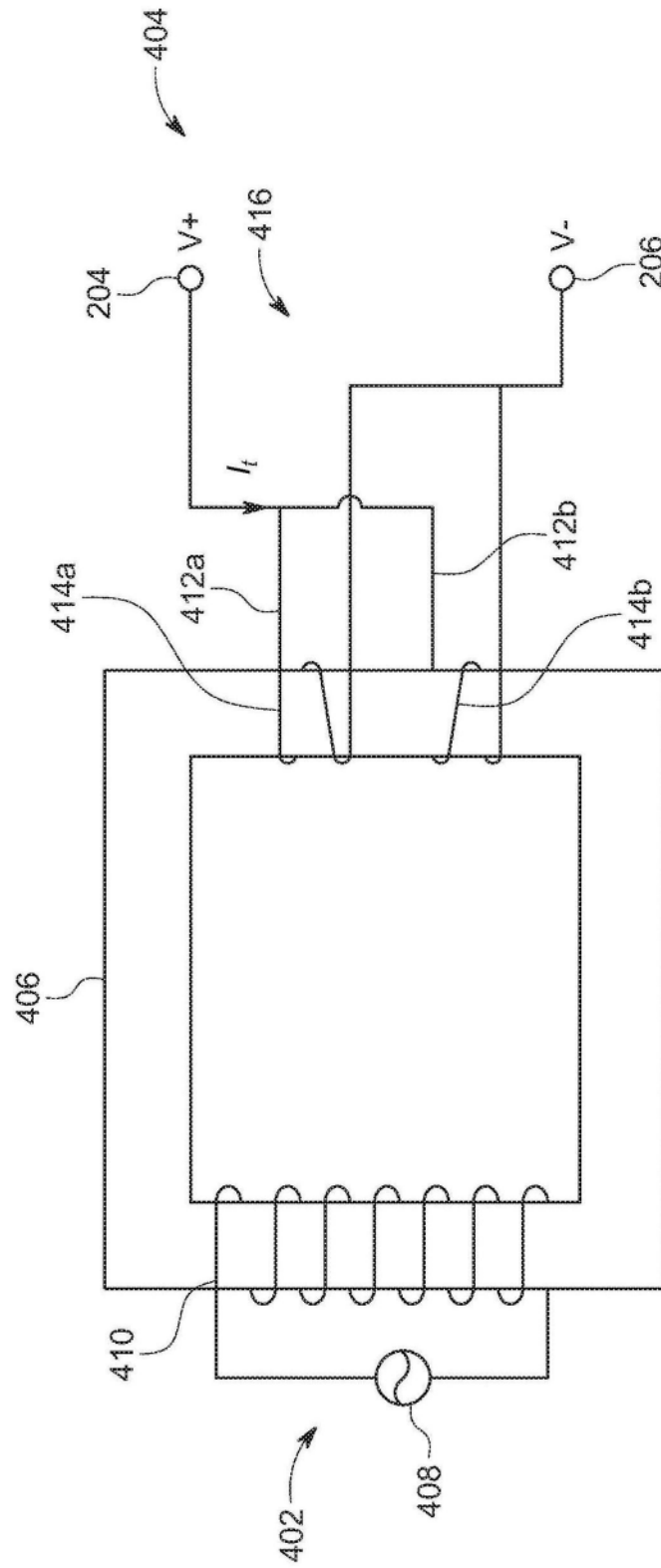


图4

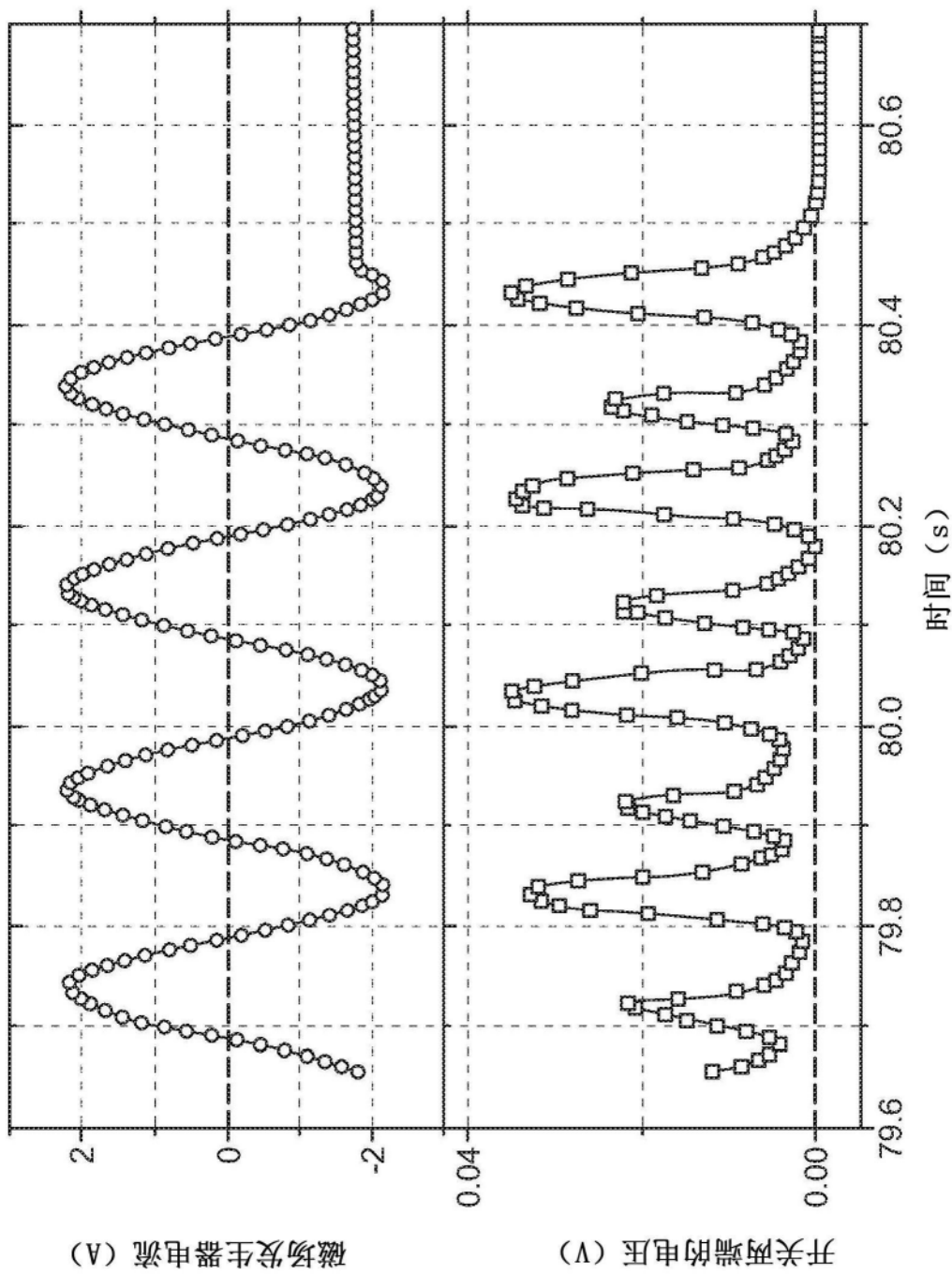


图5

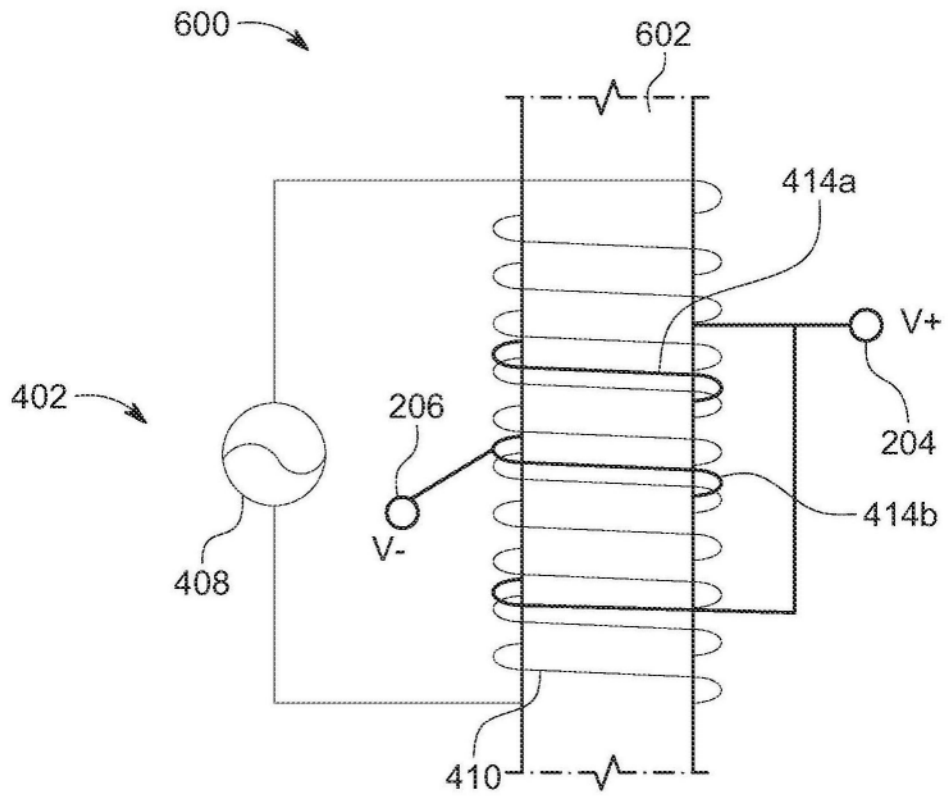


图6

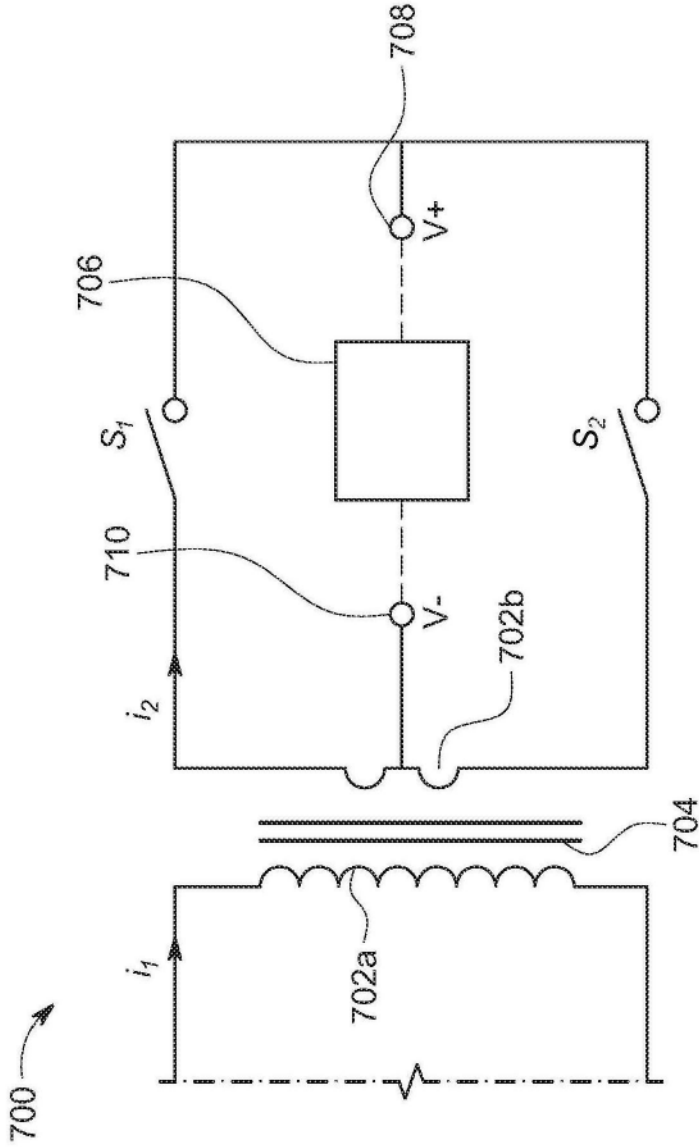


图7

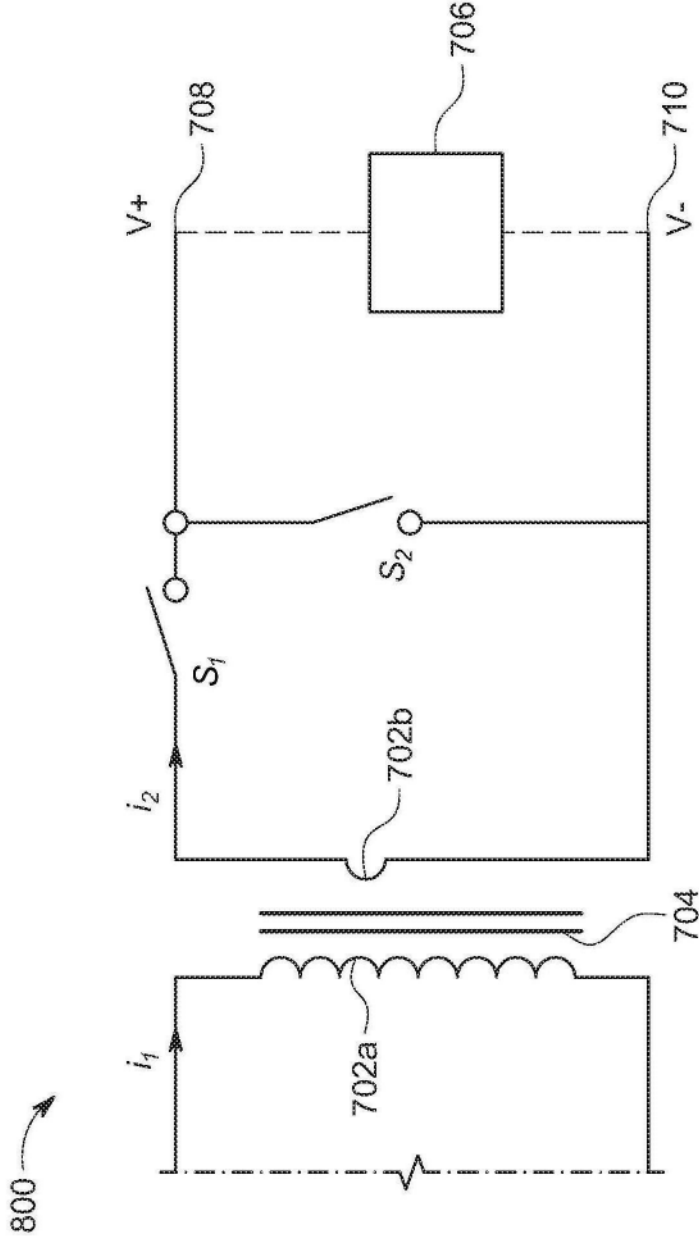


图8

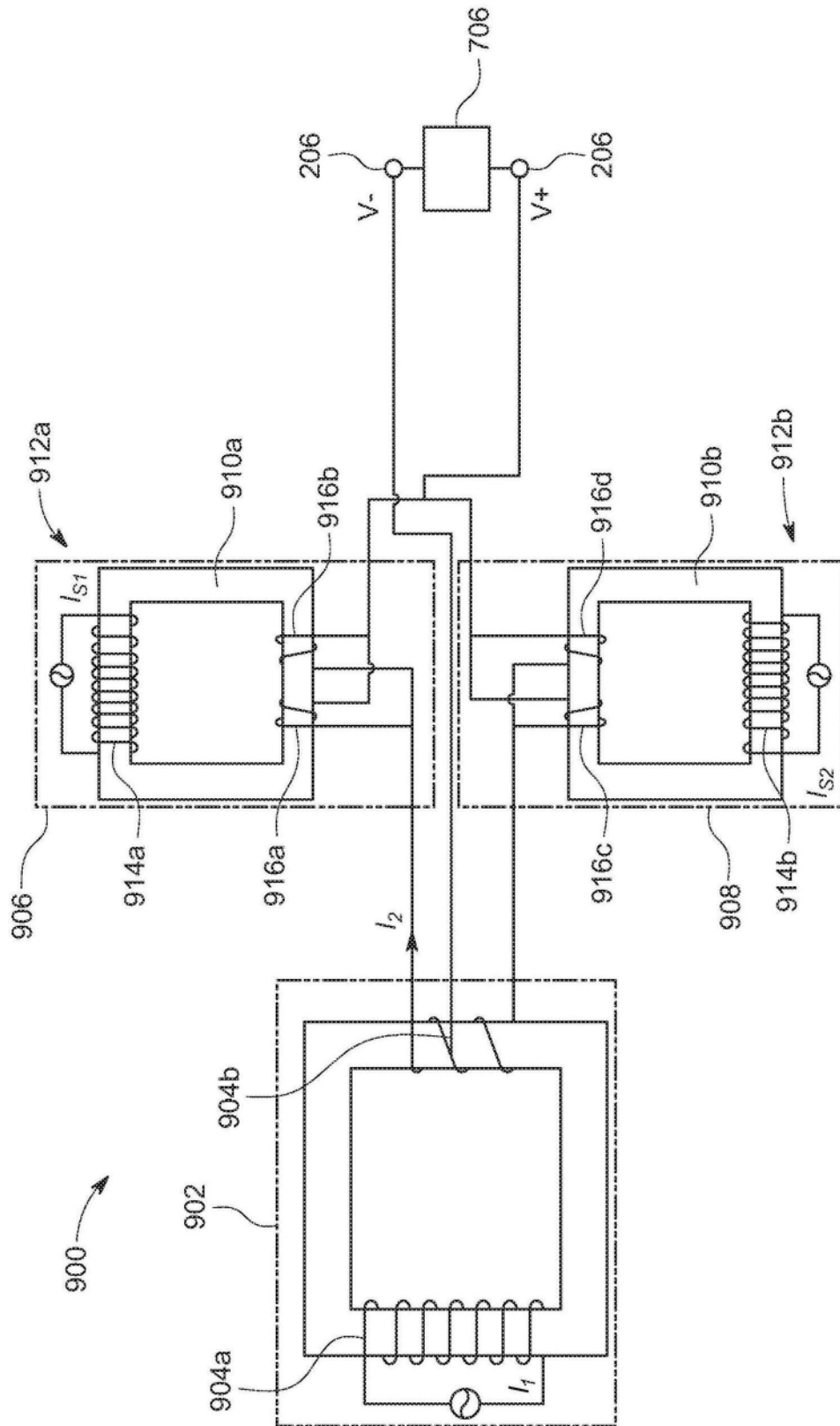


图9

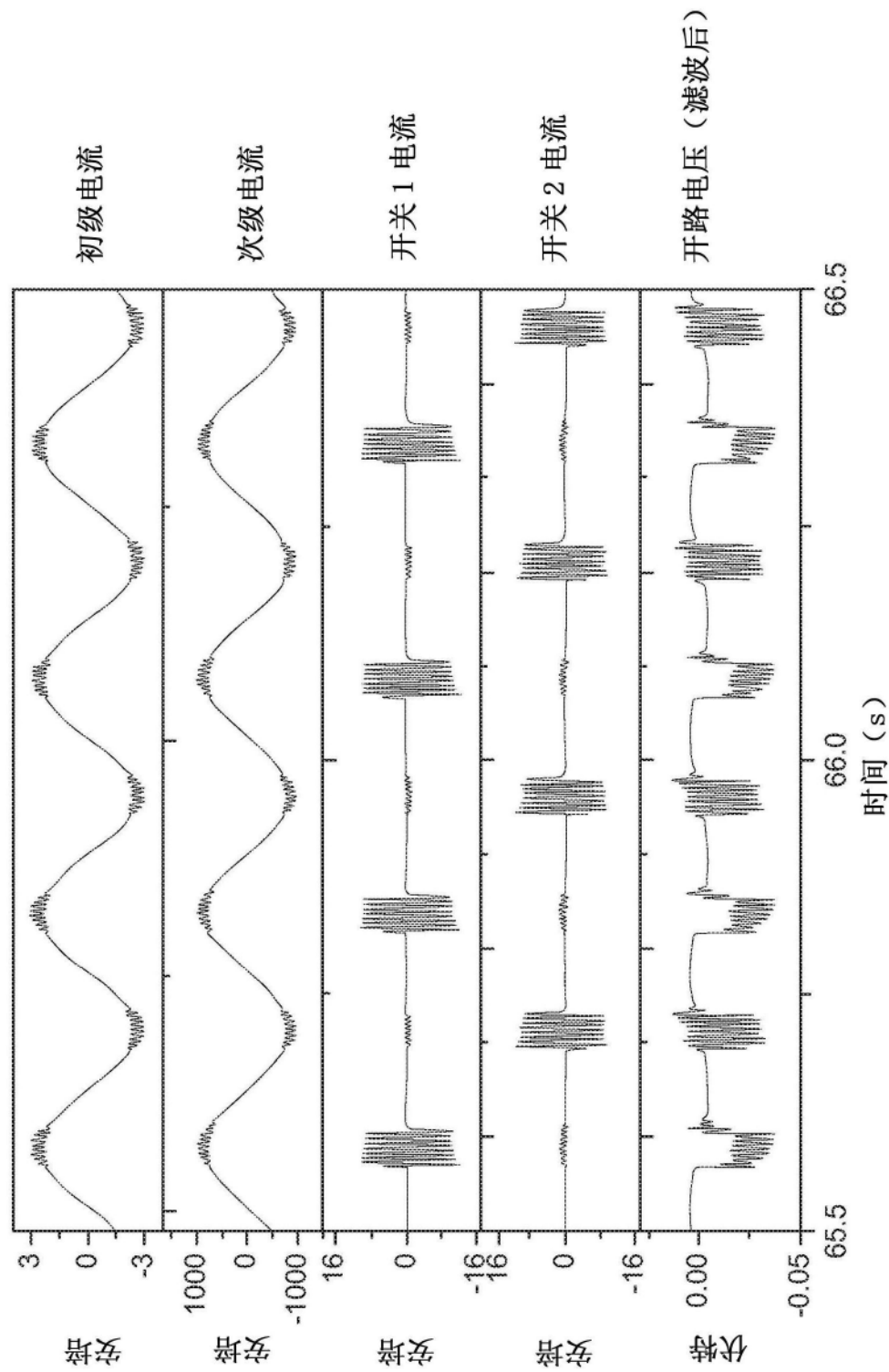


图10

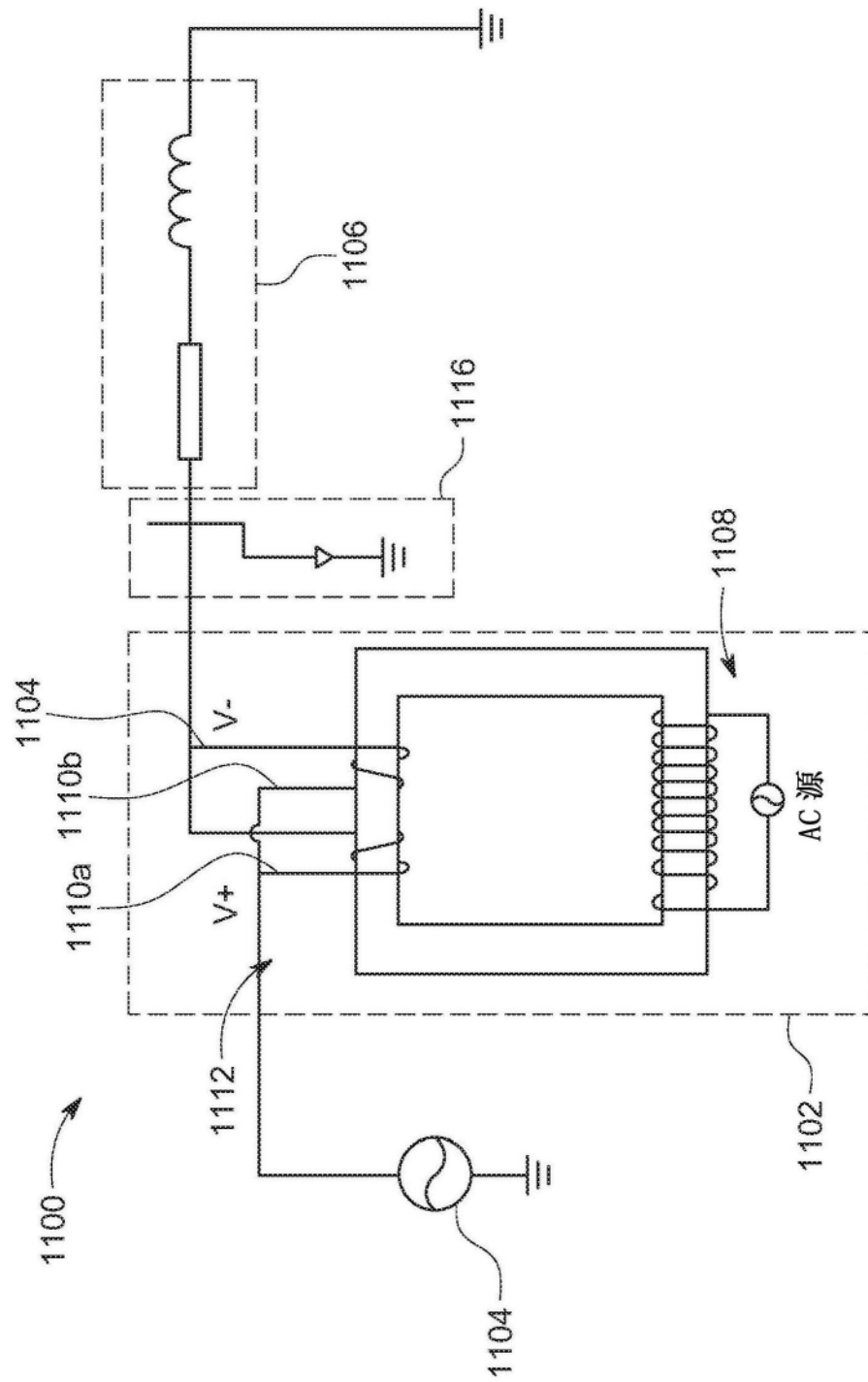


图11