



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116803235 A

(43) 申请公布日 2023. 09. 22

(21) 申请号 202280011684.8

詹姆斯·汉密尔顿·帕尔梅·赖斯

(22) 申请日 2022.01.26

(74) 专利代理机构 北京康信知识产权代理有限公司

(30) 优先权数据

2021900162 2021.01.26 AU

2021903414 2021.10.26 AU

责任公司 11240

专利代理师 梁丽超

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2023.07.25

(51) Int.Cl.

H10N 60/30 (2023.01)

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/NZ2022/050009 2022.01.26

(87) PCT国际申请的公布数据

W02022/164330 EN 2022.08.04

(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

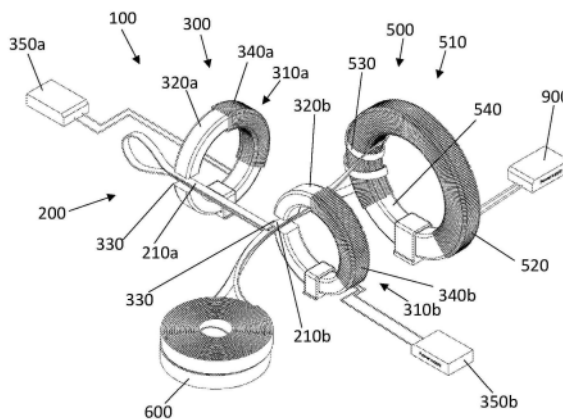
权利要求书3页 说明书23页 附图26页

(54) 发明名称

高温超导开关和整流器

(57) 摘要

提供了一种交流输入电流的整流器,该整流器可以包括:电开关,该电开关包括一段HTS材料以承载交流开关电流,该段HTS材料具有临界电流;磁场发生器,该磁场发生器用于向HTS材料施加磁场;控制机构,该控制机构用于控制该磁场发生器以在当该磁场的幅度相对较低时的低电阻状态和当该磁场的幅度相对较高时的较高电阻状态之间切换该开关,该相对较高的幅度足以减小该临界电流,使得对于该交流开关电流周期的一部分,该电流接近该临界电流、基本上等于该临界电流或大于该临界电流。还提供了一种电开关,该电开关具有以双线布置布置的超导材料的两根股线。



1. 一种电开关,包括:

超导材料的第一股线和第二股线,所述超导材料的第一股线和第二股线中的每一个被配置成承载传输电流并且具有临界电流;以及

磁场发生器,所述磁场发生器被配置和布置成向所述超导材料的第一股线和第二股线施加磁场,其中所述磁场发生器包括高磁导率磁芯,

其中所述磁场发生器被配置成被选择性地控制以在当所述磁场的幅度相对较低时的低电阻状态和当所述磁场的幅度相对较高时的较高电阻状态之间切换所述电开关,其中在所述低电阻状态下,所述传输电流基本上小于所述临界电流,并且在所述较高电阻状态下,所述传输电流接近所述临界电流、基本上等于所述临界电流或大于所述临界电流,并且

其中所述超导材料的第一股线和第二股线在空间上基本上彼此平行地布置在所述磁场的区域内,并且电连接使得所述传输电流在相反方向上流过所述磁场的所述区域内的所述超导材料的第一股线和第二股线。

2. 根据权利要求1所述的电开关,其中所述高磁导率磁芯包括由间隙分开的第一端和第二端,所述超导材料的第一股线和第二股线位于所述间隙中。

3. 根据权利要求1至2中任一项所述的电开关,其中所述超导材料的第一股线和第二股线是各自具有两个相对面的带材的形式。

4. 根据权利要求3所述的电开关,其中所述带材被布置成使得所述超导材料的第一股线的所述相对面与所述超导材料的第二股线的所述相对面平行。

5. 根据权利要求4所述的电开关,其中所述带材被取向成使得施加到所述超导材料的第一股线和第二股线的所述磁场基本上垂直于所述两个相对面中的每一个。

6. 根据权利要求1至5中任一项所述的电开关,其中所述电开关包括单段超导材料,所述单段超导材料包括端对端整体联结的所述超导材料的第一股线和第二股线。

7. 根据权利要求1至5中任一项所述的电开关,其中所述超导材料的第一股线和第二股线是通过将所述第一股线的一面连接到所述第二股线的一面而电连接的。

8. 根据权利要求1至7中任一项所述的电开关,其中所述超导材料是高温超导HTS材料。

9. 一种被配置成对交流输入电流进行整流的整流器,所述整流器包括:

电开关,所述电开关包括被配置成承载交流开关电流的一段高温超导HTS材料,其中所述一段HTS材料具有临界电流;

磁场发生器,所述磁场发生器被配置和布置成向所述HTS材料施加磁场;以及

控制机构,所述控制机构用于控制所述磁场发生器以在当所述磁场的幅度相对较低时的低电阻状态和当所述磁场的幅度相对较高时的较高电阻状态之间切换所述电开关,所述相对较高的幅度足以减小所述一段HTS材料的所述临界电流,使得对于所述交流开关电流的周期的一部分,所述交流开关电流接近所述临界电流、基本上等于所述临界电流或大于所述临界电流,

其中所述电开关被布置为对所述交流输入电流进行整流以产生直流电流输出。

10. 根据权利要求9所述的整流器,其中所述电开关被布置成对所述交流输入电流进行半波整流,其中所述直流电流输出被递送至并联连接在所述电开关上的负载。

11. 根据权利要求9至10中任一项所述的整流器,其中所述控制机构被配置成控制所述磁场发生器,使得所述磁场的所述幅度基于所述交流输入电流的相位。

12. 根据权利要求11所述的整流器,其中所述控制机构向所述磁场发生器供应交流发生器电流,使得所述磁场的所述幅度随所述交流开关电流的相位同相地变化。

13. 根据权利要求12所述的整流器,其中所述整流器包括电流控制机构,以控制所述交流开关电流,使得当所述交流开关电流在第一方向上流动时,所述交流开关电流的第一峰值电流接近、基本上等于或大于当由所述磁场发生器施加的所述磁场的所述幅度相对较高时的所述一段HTS材料的所述临界电流,以及当所述交流开关电流在第二方向上流动时,第二峰值电流小于当由所述磁场发生器施加的所述磁场的所述幅度相对较低时的所述一段HTS材料的所述临界电流,所述第二方向与所述第一方向相反。

14. 根据权利要求11至12中任一项所述的整流器,其中所述磁场发生器包括:

形成间隙的磁芯;以及

导体,所述导体缠绕线圈中所述磁芯的一部分,所述导体承载所述交流发生器电流,其中所述一段HTS材料位于所述间隙中。

15. 根据权利要求14所述的整流器,其中所述交流输入电流作为所述交流发生器电流直接向所述导体供应,并且其中所述交流开关电流基于所述交流输入电流。

16. 根据权利要求14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,其中所述初级侧接收所述交流输入电流,并且所述次级侧连接到所述电开关。

17. 根据权利要求16所述的整流器,其中所述导体连接到所述变压器的所述初级侧。

18. 根据权利要求16所述的整流器,其中所述导体连接到所述变压器的所述次级侧。

19. 根据权利要求16所述的整流器,其中所述变压器包括形成所述间隙的所述磁芯。

20. 根据权利要求14至19中任一项所述的整流器,其中所述控制机构包括电流流动控制装置,所述电流流动控制装置被配置成控制通过所述磁场发生器的所述交流发生器电流。

21. 根据权利要求20所述的整流器,其中所述电流流动控制装置包括二极管,所述二极管在所述磁场发生器上并联连接,使得当所述交流发生器电流在第一方向上流动时所述磁场发生器被激活并且当所述交流发生器电流在第二方向上流动时所述磁场发生器被去激活,所述第二方向与所述第一方向相反。

22. 根据权利要求20所述的整流器,其中所述电流流动控制装置包括发生器控制开关,所述发生器控制开关在所述磁场发生器上并联连接,使得当所述发生器控制开关打开时所述磁场发生器被激活并且当所述发生器控制开关闭合时所述磁场发生器被去激活,其中所述控制机构包括被配置成控制所述发生器控制开关的打开和闭合的控制器。

23. 根据权利要求9至22中任一项所述的整流器,其中所述整流器包括:

至少一个另外的电开关,所述至少一个另外的电开关包括另外的一段高温超导HTS材料,所述另外的一段HTS材料被配置成承载另外的交流开关电流,其中所述一段HTS材料具有临界电流;

另外的磁场发生器,对于所述至少一个另外的电开关中的每一个,所述另外的磁场发生器被配置和布置成向所述另外的一段HTS材料施加另外的磁场,

其中所述控制机构被配置成控制所述另外的磁场发生器以在当所述另外的磁场的幅度相对较低时的低电阻状态和当所述另外的磁场的幅度相对较高时的较高电阻状态之间切换相应的另外的电开关,所述相对较高的幅度足以减小所述另外的一段HTS材料的所述

临界电流,使得对于所述交流开关电流的周期的一部分,所述交流开关电流接近所述临界电流、基本上等于所述临界电流或大于所述临界电流,

其中所述至少一个另外的电开关被布置成与所述电开关一起操作以对所述交流输入电流进行整流以产生所述直流电流输出。

24. 根据权利要求23所述的整流器,其中所述控制机构被配置成激活和去激活相应的磁场发生器中的每一个以将相应的电开关在当所述相应的磁场发生器被去激活时的所述低电阻状态和当所述相应的磁场发生器被激活时的所述较高电阻状态之间进行切换。

25. 根据权利要求24所述的整流器,其中所述另外的磁场发生器包括第二磁场发生器,其中所述控制机构被配置成使得当所述第二磁场发生器被去激活时所述磁场发生器被激活,并且当所述第二磁场发生器被激活时所述磁场发生器被去激活。

26. 根据权利要求23至25中任一项所述的整流器,其中所述至少一个另外的电开关包括第二电开关,并且其中所述电开关和所述第二电开关串联连接,并且所述直流电流输出被递送至并联连接在所述开关中的一个上的负载。

27. 根据权利要求23至25中任一项所述的整流器,其中所述至少一个另外的电开关包括第二电开关,并且其中所述电开关和所述第二电开关被布置成对所述交流输入电流进行全波整流。

28. 根据权利要求26所述的整流器,其中所述电开关和所述第二电开关串联连接,并且所述直流电流输出被递送至并联连接在两个电开关之间的负载。

29. 根据权利要求23至28中任一项所述的整流器,其中所述至少一个另外的电开关包括第二电开关、第三电开关和第四电开关,其中第一对电开关包括与所述第二电开关串联连接的所述电开关,并且第二对电开关包括与所述第四电开关串联连接的所述第三电开关,所述第一对电开关与所述第二对电开关并联连接,并且其中所述直流电流输出被递送至连接在第一端子与第二端子之间的负载,其中所述第一端子在所述电开关和所述第二电开关之间,并且所述第二端子在所述第三电开关和所述第四电开关之间。

30. 根据权利要求14所述的整流器,其中所述磁芯包括第一芯部分和第二芯部分,其中所述第一芯部分和所述第二芯部分被热障分开。

31. 根据权利要求16所述的整流器,其中所述变压器包括磁芯,所述磁芯包括第一芯部分和第二芯部分,其中所述初级侧包括所述第一芯,并且所述次级侧包括所述第二芯部分,其中所述第一芯部分和所述第二芯部分被热障分开。

32. 根据权利要求30或31所述的整流器,其中所述第一芯部分位于低温恒温器的外部,并且所述第二芯部分位于所述低温恒温器的内部。

33. 根据权利要求14所述的整流器,其中所述磁场发生器包括在所述磁芯和所述导体之间的热障。

34. 根据权利要求16所述的整流器,其中所述变压器包括磁芯和在所述磁芯和形成所述初级侧和/或所述次级侧的一个或多个导体之间的热障。

35. 根据权利要求33或34所述的整流器,其中所述热障包括绝热材料。

36. 根据权利要求9至35中任一项所述的整流器,其中所述电开关是根据权利要求1至8中任一项所述电开关。

高温超导开关和整流器

技术领域

[0001] 本技术涉及超导电开关和整流器。本技术可以具体涉及电开关和整流器,该电开关和整流器包括由超导材料,尤其是高温超导材料形成的部件。

背景技术

[0002] 超导电路具有广泛的应用。包括超导电路的系统的应用的实例包括(并且不限于):超导磁体;通量泵;故障电流限制器;磁能存储系统;空间推进;核聚变;核磁共振(NMR);磁共振成像(MRI);悬浮;水净化和感应加热。

[0003] 超导电路的许多应用需要或受益于对电流进行整流,即将交流电流(AC,在方向上周期性反转的电流)转换成直流电流(DC,仅在一个方向上流动的电流)。

[0004] 用于超导电路的整流器是已知的,但是需要提供对超导整流器和/或诸如开关的整流器的部分的改进,以减少损耗,提供与现有整流器相比更高的效率和/或提供其他益处。

[0005] 高温超导体(HTS)具有许多应用,包括上面列出的那些。HTS涂覆导体(CC)的制造工艺的进步已经导致能够在高磁场下承载高电流密度的线材的发展。从这些CC缠绕的线圈显示出作为高场磁体/插入物的优异性能。CC线圈在许多其他应用中也显示出潜力,诸如马达/发生器、DC感应加热器和磁分离器。

[0006] 尽管高电流HTS线圈是所期望的并且不难制造,但是给它们通电通常需要大且复杂的电子电流供应,以及必须在室温和低温环境之间物理转变的粗电流引线。这需要复杂的热设计,并且对低温恒温器和冷却系统带来相当大的热损失。它还在正常导电电路部件上引起显著的电压降,需要比仅给超导线圈通电所需的功率明显更高的电源。

[0007] 消除来自磁体系统的有害金属电流引线的一种方式是通过将DC电流无线地注入到闭路HTS线圈中。这可以通过在电流变压器的HTS次级绕组中感应的AC电流的整流来实现。此类“感应DC电流”可以使用被称为HTS通量泵的一种类型的装置来实现,并且使得未来的HTS磁体系统能够更加紧凑和更加灵活。

[0008] 现有的HTS通量泵使用高频电磁开关的周期性激活。然而,这些开关需要单独的独立电源和馈通,这增加了复杂性。开关也位于低温恒温器内,使得热量在冷环境中耗散,这不利地影响了效率。

[0009] 使用低温超导体(LTS)的通量泵是已知的,包括整流器通量泵。然而,HTS可能不适合在为LTS设计的系统中使用,因为HTS和LTS之间存在显著差异。例如,LTS材料通常具有低临界磁场(幅度<1T),但HTS具有幅度为几十特斯拉的上临界场。一些现有通量泵依赖于通过施加温度或磁场而转变出超导状态。在大多数应用中,施加磁场强度或施加足够快的热脉冲是实际不可行的,这对于将HTS转变出超导状态是必要的。

[0010] 因此,特别需要提供整流器的改进,包括适用于HTS(例如,在通量泵中)的整流器,和/或诸如开关的整流器的部分,以减少损耗,提供比现有整流器更高的效率和/或提供其他益处。

发明内容

[0011] 本技术的目的是通过提供包括至少一个由超导材料形成的部件的电开关,和/或通过提供包括电开关的整流器,该电开关包括至少一个由超导材料形成的部件,来满足上述优点/需要中的任何一个或多个。替代地,本技术的目的是至少向公众提供有用的选择。

[0012] 根据本技术的一个方面,提供了一种包括一段超导材料的电开关。在一些形式中,电开关被配置成通过该段超导材料选择性地施加磁场而在低电阻超导状态和较高电阻超导状态之间被控制,使得在较高电阻状态下,流过该段超导材料的电流接近该段超导材料的临界电流、基本上等于临界电流或大于临界电流。在一些形式中,该段超导材料是一段高温超导材料。

[0013] 根据本技术的另一方面,提供了一种被配置成对交流输入电流进行整流的整流器。整流器可以包括电开关,该电开关包括被配置成承载交流开关电流的一段高温超导(HTS)材料,其中该段HTS材料具有临界电流。该整流器还可以包括磁场发生器,该磁场发生器被配置和布置成向HTS材料施加磁场。该整流器还可以包括控制机构,该控制机构用于控制该磁场发生器以在当该磁场的幅度相对较低时的低电阻状态和当该磁场的幅度相对较高时的较高电阻状态之间切换该电开关,该相对较高的幅度足以减小该段HTS材料的临界电流,使得对于该交流开关电流的周期的一部分,该交流开关电流接近该临界电流、基本上等于临界电流或大于临界电流。电开关可以被布置成对交流输入电流进行整流以产生直流电流输出。

[0014] 在实例中:

[0015] a) 电开关可以被布置成对该交流输入电流进行半波整流,其中该直流电流输出被递送至并联连接在该电开关上的负载;

[0016] b) 控制机构可以被配置成控制磁场发生器,使得该磁场的幅度基于该交流输入电流的相位;

[0017] c) 控制机构可以向磁场发生器供应交流发生器电流,使得该磁场的幅度随交流开关电流的相位同相地变化;

[0018] d) 整流器可以包括电流控制机构,以控制交流开关电流,使得当交流开关电流在第一方向上流动时,交流开关电流的第一峰值电流接近、基本上等于或大于当由磁场发生器施加的磁场的幅度相对较高时的该段HTS材料的临界电流,以及当交流开关电流在第二方向上流动时,第二峰值电流小于当由磁场发生器施加的磁场的幅度相对较高时的该段HTS材料的临界电流,第二方向与第一方向相反;

[0019] e) 磁场发生器可以包括形成间隙的磁芯,并且该磁场发生器可以包括缠绕线圈中的磁芯的一部分的导体,该导体承载交流发生器电流,其中该段HTS材料位于该间隙中;

[0020] f) 交流输入电流可以作为交流发生器电流直接向导体供应,并且其中交流开关电流基于交流输入电流;

[0021] g) 整流器可以包括变压器,该变压器包括初级侧和次级侧,其中该初级侧接收该交流输入电流并且该次级侧连接到该电开关;

[0022] h) 导体可以连接到该变压器的初级侧;

[0023] i) 导体可以连接到该变压器的次级侧;

[0024] j) 变压器可以包括形成间隙的磁芯;

[0025] k) 控制机构可以包括电流流动控制装置,该电流流动控制装置被配置成控制通过该磁场发生器的交流发生器电流;

[0026] l) 电流流动控制装置可以包括二极管,该二极管在该磁场发生器上并联连接,使得当该交流发生器电流在第一方向上流动时该磁场发生器被激活并且当该交流发生器电流在第二方向上流动时该磁场发生器被去激活,该第二方向与该第一方向相反;

[0027] m) 电流流动控制装置可以包括发生器控制开关,该发生器控制开关在该磁场发生器上并联连接,使得当该发生器控制开关打开时该磁场发生器被激活并且当该发生器控制开关闭合时该磁场发生器被去激活,其中该控制机构包括被配置成控制该发生器控制开关的打开和闭合的控制器;

[0028] n) 整流器还可以包括至少一个另外的电开关,该电开关包括另外的一段高温超导 (HTS) 材料,该另外的一段 HTS 材料被配置成承载另外的交流开关电流,其中该段 HTS 材料具有临界电流;

[0029] o) 对于该至少一个另外的电开关中的每一个,该整流器还可以包括另外的磁场发生器,该另外的磁场发生器被配置和布置成向该另外的一段 HTS 材料施加另外的磁场;

[0030] p) 控制机构可以被配置成控制该另外的磁场发生器以在当另外的磁场的幅度相对较低时的低电阻状态和当另外的磁场的幅度相对较高时的较高电阻状态之间切换相应的另外的电开关,该相对较高的幅度足以减小该另外一段 HTS 材料的临界电流,使得对于该交流开关电流的周期的一部分,该交流开关电流接近临界电流、基本上等于临界电流或大于临界电流;

[0031] q) 至少一个另外的电开关可以被布置成与该电开关一起操作以对该交流输入电流进行整流以产生直流电流输出;

[0032] r) 控制机构可以被配置成激活和去激活相应的磁场发生器中的每一个以将相应的电开关在当该相应的磁场发生器被去激活时的低电阻状态和当该相应的磁场发生器被激活时的较高电阻状态之间进行切换;

[0033] s) 另外的磁场发生器可以包括第二磁场发生器,其中该控制机构可以被配置成使得当该第二磁场发生器被去激活时该磁场发生器被激活并且当该第二磁场发生器被激活时该磁场发生器被去激活;

[0034] t) 至少一个另外的电开关可以包括第二电开关,并且其中该电开关和该第二电开关可以串联连接,并且该直流电流输出被递送至并联连接在开关中的一个上的负载;

[0035] u) 至少一个另外的电开关可以包括第二电开关,并且其中该电开关和该第二电开关可以被布置成对该交流输入电流进行全波整流;

[0036] v) 该电开关和该第二电开关可以串联连接,并且该直流电流输出被递送至并联连接在两个电开关之间的负载;

[0037] w) 至少一个另外的电开关可以包括第二电开关、第三电开关和第四电开关,其中第一对电开关可以包括与第二电开关串联连接的电开关,并且第二对电开关可以包括与第四电开关串联连接的第三电开关,第一对电开关与第二对电开关并联连接,并且其中该直流电流输出可以被递送至连接在第一端子与第二端子之间的负载,其中该第一端子可以在该电开关和该第二电开关之间并且该第二端子在该第三电开关和该第四电开关之间;

[0038] x) 磁芯可以包括第一芯部分和第二芯部分,其中第一芯部分和第二芯部分被热障

分开；

[0039] y) 变压器可以包括磁芯，该磁芯包括第一芯部分和第二芯部分，其中初级侧可以包括第一芯部分，并且次级侧可以包括第二芯部分，其中第一芯部分和第二芯部分可以被热障分开；

[0040] z) 第一芯部分可以位于低温恒温器外部并且第二芯部分可以位于该低温恒温器内部；

[0041] aa) 磁场发生器可以包括在磁芯和导体之间的热障；

[0042] bb) 变压器可以包括磁芯和在该磁芯和形成初级侧和/或次级侧的一个或多个导体之间的热障；以及

[0043] cc) 热障可以包括绝热材料。

[0044] 根据该技术的另一方面，提供了一种电开关，该电开关包括被配置成承载传输电流的一段超导材料，并且具有临界电流。该电开关还可以包括磁场发生器，该磁场发生器被配置和布置成向该段超导材料施加磁场。该段超导材料可以布置成双线布置。磁场发生器可以包括高磁导率磁芯。磁场发生器可以被配置成被选择性地控制以在当磁场的幅度相对较低时的低电阻状态和当磁场的幅度相对较高时的较高电阻状态之间切换电开关。在低电阻状态下，传输电流可以基本上小于临界电流。在较高电阻状态下，传输电流可以接近临界电流、基本上等于临界电流或大于临界电流。

[0045] 根据该技术的另一方面，提供了一种电开关，该电开关包括超导材料的第一股线 and 第二股线，超导材料的第一股线 and 第二股线中的每一个被配置成承载传输电流并且具有临界电流。该电开关还可以包括磁场发生器，该磁场发生器被配置和布置成向超导材料的第一股线 and 第二股线施加磁场。磁场发生器可以包括高磁导率磁芯。磁场发生器可以被配置成被选择性地控制以在当磁场的幅度相对较低时的低电阻状态和当磁场的幅度相对较高时的较高电阻状态之间切换电开关。在低电阻状态下，传输电流可以基本上小于临界电流。在较高电阻状态下，传输电流可以接近临界电流、基本上等于临界电流或大于临界电流。超导材料的第一股线 and 第二股线可以在空间上基本上彼此平行地布置在磁场的区域内，并且电连接使得传输电流在相反方向上流过磁场的区域内的超导材料的第一股线 and 第二股线。

[0046] 在实例中：

[0047] a) 高磁导率磁芯可以包括由间隙分开的第一端和第二端，该超导材料的第一股线 and 第二股线位于该间隙中；

[0048] b) 超导材料的第一股线 and 第二股线可以是各自具有两个相对面的带材的形式；

[0049] c) 这些带材可以被布置成使得超导材料的第一股线的相对面与超导材料的第二股线的相对面平行；

[0050] d) 这些带材可以被取向成使得施加到超导材料的第一股线 and 第二股线上的磁场基本上垂直于这两个相对面中的每一个；

[0051] e) 电开关可以包括一段超导材料，该段超导材料包括超导材料第一股线 and 第二股线；或者超导材料的第一股线 and 第二股线可以通过将第一股线的一面连接到第二股线的一面而电连接；并且

[0052] f) 超导材料是高温超导 (HTS) 材料。

[0053] 根据该技术的另一方面,提供了一种电开关,该电开关包括被配置成承载传输电流的一段超导材料,并且具有临界电流。该电开关还可以包括磁场发生器,该磁场发生器被配置和布置成向该段超导材料施加磁场。磁场发生器可以包括高磁导率磁芯。磁场发生器可以被配置成被选择性地控制以在当磁场的幅度相对较低时的低电阻状态和当磁场的幅度相对较高时的较高电阻状态之间切换电开关。在低电阻状态下,传输电流可以基本上小于临界电流。在较高电阻状态下,传输电流可以接近临界电流、基本上等于临界电流或大于临界电流。该段超导材料可以被布置成基本上抵消由在接近高磁导率磁芯时流过该段超导材料的传输电流生成的自磁场。

[0054] 根据本技术的另一方面,提供了一种根据本技术的任一方面的整流器,其中电开关是根据本技术的任一方面的电开关。在本发明的另一方面中,提供了根据本技术的任一方面的电开关在根据本技术的任一方面的整流器中的用途。

[0055] 在阅读提供本技术的实际应用的至少一个实例的以下描述时,本技术的其他方面,其应当在其所有新颖方面中加以考虑,将对所属领域的技术人员变得显而易见。

附图说明

[0056] 下面将参考以下附图仅通过实例而非旨在进行限制来描述本技术的一个或多个实施例,在附图中:

[0057] 图1示出了高温超导体的示例性电场对电流图;

[0058] 图2是当施加三个不同幅度的外部磁场时超导材料的电场对电流的图的图示;

[0059] 图3是根据本技术的一种形式的整流器的示意图;

[0060] 图4是图3所示的整流器的透视图图示;

[0061] 图4A是绘示与图3和图4所示的整流器的形式相关的参数的三个图的图示;

[0062] 图5是根据本技术的另一形式的整流器的示意图;

[0063] 图6是图5所示的整流器的透视图图示;

[0064] 图7是示出在图5和图6所示的整流器的使用期间随时间变化的参数的幅度的图示;

[0065] 图8是根据本技术的另一形式的整流器的示意图;

[0066] 图9是图8所示的整流器的透视图图示;

[0067] 图10是根据本技术的另一形式的整流器的示意图;

[0068] 图11是图10所示的整流器的透视图图示;

[0069] 图12是根据本技术的另一形式的整流器的示意图;

[0070] 图13是根据本技术的另一形式的整流器的示意图;

[0071] 图14是根据本技术的另一形式的整流器的示意图;

[0072] 图15是示出在图14所示的整流器的使用期间随时间变化的参数的幅度的图示;

[0073] 图16是根据本技术的另一形式的整流器的示意图;

[0074] 图17是根据本技术的另一形式的整流器的示意图;

[0075] 图18是示出在图17所示的整流器的使用期间随时间变化的参数的幅度的图示;

[0076] 图19是根据本技术的另一形式的整流器的示意图;

[0077] 图20是根据本技术的另一形式的整流器的示意图;

- [0078] 图21是根据本技术的另一形式的整流器的示意图；
- [0079] 图22是根据本技术的另一形式的整流器的示意图；
- [0080] 图23是根据本技术的另一形式的整流器的示意图；
- [0081] 图24是图23所示的整流器的透视图图示；
- [0082] 图25是示出在图23和图24所示的整流器的使用期间随时间变化的参数的测量幅度的图示；
- [0083] 图26是根据本技术的另一形式的整流器的示意图；
- [0084] 图27是图26所示的整流器的透视图图示；
- [0085] 图28是示出在图26和图27所示的整流器的使用期间随时间变化的参数的幅度的图示；
- [0086] 图29是根据本技术的另一形式的整流器的示意图；
- [0087] 图30是图29所示的整流器的透视图图示；
- [0088] 图31是示出在图29和图30所示的整流器的使用期间随时间变化的参数的幅度的图示；
- [0089] 图32是根据本技术的一种形式的变压器的示意图；
- [0090] 图33是根据本技术的另一形式的变压器的示意图；
- [0091] 图34是根据本技术的另一形式的整流器的透视图图示；
- [0092] 图35是根据本技术的另一形式的整流器的透视图图示；
- [0093] 图36A是根据本技术的一种形式的电开关的示意图；
- [0094] 图36B是根据本技术的另一形式的电开关的示意图；
- [0095] 图37是绘示在不同的施加场下并且当该段超导材料被布置成双线布置和单线布置时，根据本技术的形式的电开关中的该段超导材料的临界电流之间的关系图；
- [0096] 图38A示出了根据本技术的一种形式的电开关的磁场分布；以及
- [0097] 图38B示出了根据本技术的另一形式的电开关的磁场分布。

具体实施方式

[0098] 关于超导体的讨论

[0099] 为了帮助理解本技术，读者应熟悉超导术语，包括超导体的临界温度和超导体的临界电流。然而，为了读者的利益，我们在下面简要讨论这些概念。

[0100] 超导体的临界温度通常定义为这样的温度，在该温度以下超导体的电阻率降至零或接近零。换句话说，当超导体的温度低于临界温度时，该超导体被称为处于其超导状态，并且当温度高于临界温度时，该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度的临界温度；例如，已知汞具有临界温度为4.1K。然而，还已知一些材料可以具有高得多的临界温度，诸如30K至125K；例如，二硼化镁具有大约39K的临界温度，而钇钡铜氧化物(YBCO)具有大约92K的临界温度。这些超导体通常统称为高温超导体。

[0101] 高温超导体线材或带材的临界电流通常被定义为在超导体线材/带材中流动的电流，其导致沿着线材的电场降为 $100\mu\text{V}/\text{m}$ ($=1\mu\text{V}/\text{cm}$)。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，较宽的带材/线材可以具有比由相同材料构成的较薄的带材/线材更高的临界电流。然而，应当理解，在整个说明书中，参考超导体/超导材

料的临界电流以对讨论进行简化。

[0102] 在超导体/超导材料中,如果电流 I 约等于临界电流 I_c ,超导体的电阻是非零的,但是很小。然而,如果 I 远大于临界电流 I_c ,超导体的电阻变得足够大以引起热耗散,该热耗散可以将超导体加热到高于其临界温度的温度,这又使其不再是超导的。这种情况有时被称为“失超”并且可以损坏超导体本身。

[0103] 图1示出了描绘高温超导体的内部电场对电流曲线的示例性曲线图。应当理解,该曲线图中所示的电场经由以下等式与电阻有关:

$$[0104] \quad E = \frac{IR}{L}$$

[0105] 其中:

- [0106] • E 是电场;
- [0107] • I 是通过超导体的电流;
- [0108] • R 是该线材的电阻;以及
- [0109] • L 是该线材的长度。

[0110] 因此,图1的曲线图与超导体的每单位长度的电阻有关,并且因为所描绘的曲线是非线性的,所以得到的超导体的电阻与电流是非线性的。

[0111] 在该图中可以看出,超导体中的电场强度在超导体的临界电流 I_c 以下基本上为零。当超导体中的电流接近临界电流时,超导体中的电场开始增加。在临界电流下,超导体中的电场为 $100\mu\text{V}/\text{m}$ 。进一步将超导体中的电流增加到临界电流以上导致导体中的电场强度快速增加。

[0112] 在整个本说明书中,将参考超导材料和包括超导材料的部件的相对电阻。更具体地,本说明书涉及在低电阻或较高电阻状态下的超导材料。应当理解,当处于超导状态时,超导材料可以具有为零或基本上为零的电阻,并且因此这些电阻通常以对于给定电流存在于超导材料上的电场来表示。然而,在整个本说明书中,为了简化前述讨论,参考相对电阻,例如超导材料的低电阻和较高电阻状态。

[0113] 术语“低电阻状态”可以指当超导材料在超导状态下具有接近或基本上为零的电阻时,或者当该材料在部分超导状态下具有低电阻时。术语“较高电阻”状态是指其中超导材料具有基本上大于低电阻状态中的电阻的电阻的状态,例如基本上非零电阻或接近零但基本上大于低电阻状态中的电阻的电阻。为了避免疑问,除非上下文另外明确指示,否则本说明书中提到的较高电阻状态可以包括超导状态。

[0114] 类似地,在本说明书中,提及由于超导体承载的电流超过临界电流而使超导体处于较高电阻状态,应当理解,除非上下文另外明确指示,如果超导体承载的电流接近或基本上等于临界电流,也可以实现较高电阻状态。

[0115] 在描述本说明书中的技术时,材料和包括该材料的部件被称为“超导”。该术语在本领域中通常用于此类材料,并且不应当被认为意指相关材料总是处于超导状态。在某些条件下,该材料和包括该材料的部件可以不处于超导状态。也就是说,该材料可以被描述为超导性但不是超导的。

[0116] 超导材料

[0117] 本技术的某些形式可以包括各种类型的超导材料。例如,本技术的形式可以包括

高温超导 (HTS) 材料。适用于所描述的技术形式的示例性 HTS 材料包括氧化铜超导体, 例如稀土钡铜氧化物 (ReBCO) 诸如钇钡铜氧化物、钆钡铜氧化物或铋锶钙铜氧化物 (BSCCO) 超导体, 以及铁基超导体。BSCCO 超导体通常在临界电流和所施加的磁场之间具有强的相互依赖性, 这可以使得它们特别适用于本技术的一些形式。在本技术的其他形式中可以使用其他类型的超导体。

[0118] 尽管将关于高温超导体描述本技术的形式, 但是应当理解, 本技术的其他形式可以使用其他类型的超导体, 例如低温超导体, 来代替它们。

[0119] 在某些形式中, 超导材料可以以带材的形式提供。

[0120] 磁场对超导体的影响

[0121] 超导体中的临界电流取决于施加到超导体的外部磁场。更具体地, 临界电流随着更高的外部磁场施加到超导体而降低, 直到临界磁场的值, 超过该值, 超导体不再处于超导 (低电阻) 状态。在图2中示出了这种关系, 图2是当施加三个不同幅度的外部磁场时超导材料的电场对电流的图的图示。外部磁场的最高幅度 B_{app1} 导致最低临界电流 I_{c1} 。

[0122] 电开关

[0123] 本技术的形式涉及利用超导材料的临界电流随着更高的外部磁场施加到该材料而减小的原理的电开关。在图3和图4中绘示了示例性电开关210。下面将更详细地描述这些图中所绘示的技术的形式, 但是出于当前的目的, 描述了开关210。

[0124] 电开关210包括一段高温超导 (HTS) 材料, 例如上述任何类型的 HTS 材料。HTS 材料具有临界电流 I_c 和临界温度 T_c 。HTS 材料位于低温恒温器710 (未示出) 内, 该低温恒温器710被配置成将 HTS 材料维持在低于临界温度 T_c 的温度。

[0125] 当外部磁场 B_{app} 施加到该段 HTS 材料时, 临界电流减小, 如图2所示。磁场 B_{app} 的施加因此可以用于使该段 HTS 材料用作开关。如果当磁场 B_{app} 的幅度具有特定值时, HTS 材料承载小于临界电流的开关电流 (即, 流过电开关210的电流), 则 HTS 材料将处于低电阻状态。如果磁场 B_{app} 的幅度从该值增加到相对较高的幅度, 该幅度足够高使得临界电流减小到更接近或低于由 HTS 材料承载的电流的幅度的值, 则 HTS 材料将处于较高电阻状态。

[0126] HTS 材料的低电阻状态可以被认为等效于开关210的闭合状态, 而较高电阻状态类似于开关210的打开状态。然而, 应当理解, 较高电阻状态不是机械开关常见的电开路, 而是表示较高电阻导电状态。在这种较高电阻导电状态下, HTS 材料可以保持处于超导状态但具有较高的电阻水平, 或者它可以处于非超导状态。

[0127] 在开关的低电阻状态和较高电阻状态之间的磁场 B_{app} 的幅度差可以变化为多个幅度, 包括连续可变的幅度, 并且包括在两个幅度之间变化的幅度。在低电阻状态下, 磁场 B_{app} 的幅度可以是零或非零的。

[0128] 应了解, 施加到 HTS 材料的磁场 B_{app} 的任何幅度应当低于临界场的幅度, 其中临界场是施加到 HTS 材料的外部磁场的幅度, 其致使 HTS 材料移动到较高电阻状态。

[0129] 超导开关中的能量损耗几乎与切换期间开关中的临界电流成比例。由于电开关210通过在切换期间减小临界电流值来操作, 所以电开关210和包括电开关210的装置具有比常规超导开关更低的损耗和因此更高的效率。

[0130] 整流器

[0131] 本技术的某些形式使用电开关210, 并且在某些形式中, 以切换组件200的形式的

多个电开关210来对交流输入电流进行整流。本技术的不同形式可以利用任何配置中的一个或多个电开关210以便产生整流效应。在下面的描述中,描述了电开关的合适配置的实例,但是应当理解,在本技术的其他形式中可以使用其他配置。

[0132] 根据本技术形式的整流器100包括以下功能部分:切换组件200;磁场发生器组件300;控制机构400;以及电流供应组件500。将在下面更详细地描述这些功能部分,描述每个功能部分的示例性形式。还将描述包括每个功能部分的示例性形式的组合的整流器100的一些具体实例。应当理解,在本技术的一些形式中还提供了每个功能部分的示例性形式的其他组合,并且本技术不限于绘示和/或描述的特定实例。

[0133] 在某些形式中,电流供应组件500被配置成向切换组件200供应交流电流。切换组件200包括一个或多个电开关210的布置,并且被配置成对交流电流进行整流以产生直流电流输出。直流电流输出可以被递送至负载600。磁场发生器组件300包括一个或多个磁场发生器310,每个磁场发生器310被配置成向电开关210中的一个或多个施加磁场。控制机构400控制磁场发生器组件300,以便切换切换组件200的电开关210。

[0134] 包括超导材料的整流器100的任何部分被容纳在一个或多个低温恒温器710中,该一个或多个低温恒温器710被配置成将超导材料维持在低于相应的超导材料的临界温度 T_c 的温度。

[0135] 切换组件

[0136] 在本技术的某些形式中,切换组件200包括一个或多个电开关210的布置,并且该切换组件200被配置成对交流电流进行整流以产生直流电流输出。切换组件200中的电开关210的布置决定了由整流器100执行的整流的类型,这将在下面通过实例来描述。

[0137] 在本技术的某些形式中,整流器100是半波整流器。半波整流器允许在一个方向上流动的电流穿过,但阻止在另一方向上流动的电流。在半波整流器的一些形式中,切换组件包括单个电开关210。在半波整流器的其他形式中,切换组件包括两个电开关210。

[0138] 在图3、图4、图5、图6、图8、图9、图10、图11、图12、图13和图19中绘示了包括单个开关210的半波整流器100的切换组件200的示例性形式。在这些形式中,负载600并联连接在电开关210上。当开关210处于“闭合”配置时,负载600上没有电压,并且负载电流 i_L 被递送至负载600。当开关210处于“打开”配置时,在负载600上产生电压 V_{out} ,并且负载电流 i_L 被递送至负载600。当开关210打开时负载电流 i_L 是增大还是减小取决于流过开关210的开关电流 i_{s1} 的方向,这取决于与交流输入电流 i_1 的相位相比开关210打开的定时。在一些形式中,控制机构400可以控制开关210的打开和闭合,使得当交流输入电流 i_1 在一个方向上流动时开关210打开,并且当交流输入电流 i_1 在相反方向上流动时开关210闭合,即,控制机构400基于交流输入电流 i_1 的相位以定时的方式控制开关210中的每一个的状态。这样,电压 V_{out} 可以仅在一个方向(或极性)上在负载600上产生,从而提供半波整流器。在其他形式中,控制机构400可以控制开关210的打开和闭合以在电流循环中的不同时间发生。控制机构400可以用于在交流输入电流 i_1 的相位中的选定时间打开和闭合开关210,使得负载600上的电压 V_{out} 使负载电流 i_L 以期望的方式改变,包括在不同时间增加和减小负载电流 i_L 。这样以阶梯状方式改变负载600中的负载电流 i_L 可以被描述为“泵送”。

[0139] 在图14、图20和图23中绘示了包括两个开关210a、210b的半波整流器100的切换组件200的示例性形式。在这些形式中,两个开关210a、210b串联连接,并且负载600在开关210

中的一个上并联连接。向切换组件200提供交流电流 i_2 。切换组件200由控制机构400控制,该控制机构400被配置成控制开关210中的每一个的状态以便对交流电流 i_2 进行整流。例如,控制机构400控制开关210中的每一个,使得每个开关的状态基于交流电流 i_2 的流动方向。由于交流电流 i_2 的流动方向取决于电流的相位,所以在这种形式中,控制机构400基于交流电流 i_2 的相位以定时的方式控制开关210中的每一个的状态。例如,当交流电流 i_2 在第一方向上流动时(即,电流为正),第一开关210a被置于其低电阻状态,并且第二开关210b被置于其较高电阻状态。照此,低电阻路径形成在通过开关210a并且在负载600上的环路的外部周围。随着电流的极性改变(例如从正到负),控制机构400可以使开关210a转变到其较高电阻状态,并且使开关210b转变到低电阻状态。210a的较高电阻状态阻碍来自变压器的电流流动,提供了阻止负极性电流流动的措施。同时,210b的低电阻状态提供了使负载中的电流继续流动的路径,尽管同时随时间常数 L/R 呈指数衰减(这将意味着如果负载是超导的,则负载电流将保持恒定)。因此,流过负载600的电流可以被半波整流。同样,控制机构400可以在适当的时间打开和闭合开关210a和210b,以根据期望增加和减少负载600中的电流。

[0140] 在本技术的一些形式中,控制机构400可以控制开关210a和开关210b两者在交流电流周期中的某个时间段内同时处于低电阻状态。也就是说,开关210b可以仅在 i_2 为正的一部分时间处于较高电阻状态,并且开关210a可以仅在 i_2 为负的一部分时间处于较高电阻状态,而在其余时间,无论 i_2 为正还是负,两个开关都处于低电阻状态。这可以用作实际的控制策略,以确保当通过开关的电流处于期望方向时,开关处于打开配置(即,较高电阻状态)。控制机构400可以以这种方式控制本文所描述的技术的任何形式的整流器的开关,即使没有明确说明。

[0141] 在图17、图22和图26中绘示了包括两个开关210a、210b的全波整流器100的切换组件200的示例性形式。两个开关210a、210b串联连接,并且负载600在两个开关210a、210b之间并联连接。向切换组件200提供交流电流。切换组件200由控制机构400控制,该控制机构400被配置成控制开关210中的每一个的状态以便对交流电流进行整流。例如,控制机构400可以控制开关210中的每一个,使得每个开关的状态基于交流电流的流动方向。由于交流电流的流动方向取决于电流的相位,所以在这种形式中,控制机构400基于交流电流的相位以定时的方式控制开关210中的每一个的状态。当电流在第一方向上流动时(例如当电流为正时),第一开关210a被置于其低电阻状态,而第二开关210b被置于其较高电阻状态。这导致通过开关210a的电路上半部分周围的较低阻抗路径,并且导致电流在第一方向上流过负载600。当交流在第二方向上流动时(例如当电流为负时),第一开关210a被置于较高电阻状态,而第二开关210b被置于低电阻状态。这导致通过开关210b的电路下半部周围的较低阻抗路径,并且导致电流在第一方向上流过负载600。当以这种方式控制开关的打开和闭合时,不管交流电流的方向如何,电流总是以单个方向流过负载,例如从正端子到负端子。因此,电压 V_{out} 可以仅在一个方向(或极性)上在负载600上产生,并且交流电流被全波整流为通过负载600的直流电流。与半波整流器的之前的实例一样,控制机构400可以控制开关210的打开和闭合的定时,使得负载上的电压以期望的极性产生,并且通过负载600的电流相应地增加或减小。

[0142] 在图16、图21、图29和图30中绘示了包括四个开关210a、210b、210c和210d的全波整流器100的切换组件200的示例性形式。两个开关210a和210b形成第一对开关并且彼此串

联连接。另外两个开关210c和210d形成第二对开关并且彼此串联连接。两对开关彼此并联连接,每对与交流电流源并联。负载600从第一对开关的开关210a、210b之间的端子连接到第二对开关的开关210c、210d之间的端子。切换组件200由控制机构400控制,该控制机构400被配置成控制开关210中的每一个的状态以便对交流电流进行整流。例如,控制机构400可以控制开关210中的每一个,使得每个开关的状态基于交流电流的流动方向。由于交流电流的流动方向取决于电流的相位,所以在这种形式中,控制机构400基于交流电流的相位以定时的方式控制开关210中的每一个的状态。当电流在第一方向上流动时(例如当电流为正时),第一开关210a和第四开关210d被置于其低电阻状态,而第二开关210b和第三开关210c被置于其较高电阻状态。这导致通过第一和第四开关210a和210d的较低阻抗路径,并且导致电流在第一方向上流过负载600。当交流在第二方向上流动时(例如当电流为负时),第一开关210a和第四开关210d被置于其较高电阻状态,而第二开关210b和第三开关210c被置于第三低电阻状态。这导致通过第二和第三开关210b和210c的较低阻抗路径,并且导致电流在第一方向上流过负载600。当以这种方式控制开关的打开和闭合时,不管交流电流的方向如何,电流总是以单个方向流过负载,例如从正端子到负端子。因此,电压 V_{out} 可以仅在一个方向(或极性)上在负载600上产生,并且交流电流被全波整流为通过负载600的直流电流。与半波整流器的之前的实例一样,控制机构400可以控制开关210的打开和闭合的定时,使得负载上的电压以期望的极性产生,并且通过负载600的电流相应地增加或减小。

[0143] 虽然已经描述了切换组件200中的开关210的某些示例性布置,但是应当理解,本技术的其他形式的其他切换组件200具有用于对交流电流进行整流的开关210的其他布置。本技术的其他形式的切换组件200可以具有其他数量的开关210。

[0144] 磁场发生器组件

[0145] 在本技术的某些形式中,磁场发生器组件300包括一个或多个磁场发生器310,磁场发生器310中的每一个被配置成向切换组件200的电开关210中的一个或多个施加磁场。

[0146] 在图3至图6、图8至图14、图16、图17、图19至图24、图26、图27、图29、图30、图34和图35中绘示了磁场发生器组件300的示例性形式。在这些形式中,磁发生器组件300包括一个或多个磁场发生器310。磁场发生器310中的每一个可以包括磁芯320。芯320可以是高磁导率磁芯,诸如铁氧体磁芯(例如铁芯)或层压钢/铁芯。在其他形式中,也可以使用在操作频率下具有高相对磁导率的其他类型,或者可以使用非磁芯或空气芯。空气芯可以有利地减小电开关210的大小、重量和成本,并且还可以提供在不使芯饱和的情况下驱动较高电流的能力。在所绘示的形式中,磁芯320是基本上环形的实心芯,例如具有圆角的方形环。

[0147] 在示例性形式中,磁芯320形成间隙330。间隙330可以是实心磁芯320中的空间,例如方形环芯一侧中的空间。空气芯的任何部分可以被认为间隙330。

[0148] 在示例性形式中,导体缠绕线圈340中的磁芯320的一部分。例如,由导体形成的线圈340可以缠绕在方形环芯的一侧,例如与其上形成间隙330的一侧相反的一侧。在空气芯中,线圈340在其内部限定了空间区域,该空间区域可以被认为空气芯并且包含间隙330。在使用中,导体可以承载发生器电流。发生器电流流过线圈340生成磁场,包括在芯320中和在间隙330上。在本技术的某些形式中,包括电开关210的该段HTS材料定位在间隙330中,使得由磁场发生器310生成的在间隙330上的磁场是施加到开关210的外部磁场 B_{app} 。

[0149] 在某些形式中,由导体承载的发生器电流可以由电流源供应,例如交流电流源,使

得发生器电流是交流发生器电流。如稍后将更详细描述,在某些形式中,向导体供应电流的交流电流源可以是由整流器100的电流供应组件500接收的相同的交流输入电流,或者是具有与交流输入电流和/或与流过位于间隙330中的开关210的交流开关电流同相地变化的幅度的交流电流供应。在其他形式中,向磁场发生器310的导体供应发生器电流的电流源可以是单独的电流源350。在这些形式中,电流源350可以是直流电流源。

[0150] 由磁场发生器310生成的磁场的幅度可以连续变化。替代地,由磁场发生器310生成的磁场的幅度可以在两个恒定值之间变化。在某些形式中,常数值中的一个可以是零。

[0151] 在某些形式中,磁场发生器310可以被配置成向多个电开关210施加磁场 B_{app} 。例如,在图16、图21、图29和图30所示的整流器100的形式中,磁场发生器310a被配置成向电开关210a和210d施加磁场,并且磁场发生器310b被配置成向电开关210b和210c施加磁场。每个磁场发生器310a和310b可以包括单个磁芯320和一个或多个间隙330,相应的电开关的HTS材料位于该一个或多个间隙330内。替代地,如图30所示的实例,每个磁场发生器310a和310b可以包括多个分量磁场发生器,每个分量磁场发生器包括磁芯320并且具有缠绕它们以形成线圈340的导体,其中每个分量磁场发生器的线圈340电连接以便同时给分量磁场发生器通电。

[0152] 虽然已经描述了磁场发生器组件300中的磁场发生器300的某些示例性布置,但是应当理解,本技术的其他形式的其他磁场发生器310可以采用其他形式。

[0153] 控制机构

[0154] 根据本技术的某些形式的整流器100包括控制机构400,该控制机构被配置成控制磁场发生器组件300以便切换切换组件200的电开关210。

[0155] 在本技术的某些形式中,控制机构400被配置成控制磁场发生器组件300的磁场发生器310,使得由每个磁场发生器310生成的磁场的幅度基于由电流供应组件500接收的交流输入电流的相位。例如,由每个磁场发生器310生成的磁场的幅度可以随与交流输入电流的相位具有固定相位差的相位而变化。在一个实例中,固定相位差可以是零,在这种情况下,由每个磁场发生器310生成的磁场随交流输入电流同相地变化。在某些实例中,由每个磁场发生器310生成的磁场的幅度可以是用于交流输入电流的每个周期的一部分的第一值,以及用于交流输入电流的每个周期的另一部分的第二值。第一值或第二值中的一个可以是零。

[0156] 附加地,在某些形式中,控制机构400被配置成向磁场发生器310供应交流电流(即,交流发生器电流),该交流电流具有基于通过电开关210的交流电流的相位的相位,磁场发生器310向该电开关210供应磁场(即,交流开关电流)。因此,由磁场发生器310生成的磁场的幅度随交流开关电流的幅度同相地变化。例如,交流发生器电流的幅度可以随与交流开关电流的相位具有固定相位差的相位而变化。在一个实例中,固定相位差可以是零,在这种情况下,由每个磁场发生器310生成的磁场随交流开关电流同相地变化。在某些实例中,由每个磁场发生器310生成的磁场的幅度可以是交流开关电流的每个周期的一部分的第一值,以及交流开关电流的每个周期的另一部分的第二值。第一值或第二值中的一个可以是零。

[0157] 在本技术的某些形式中,交流输入电流可以作为交流发生器电流直接供应给磁场发生器310。在磁场发生器310包括缠绕在线圈340中的导体的实例中,交流输入电流可以直

接供应给导体/线圈340。

[0158] 在上述技术的某些形式中,将交流输入电流,或基于交流输入电流的交流电流(包括例如:在分流器处从交流输入电流分离的交流电流;或者变压器的初级侧的交流输入电流在变压器的次级侧生成的交流电流)供应给磁场发生器310,其中:1)磁场发生器310向电开关210施加磁场;和2)电开关210基于交流输入电流承载交流开关电流(同样包括例如:在分流器处从交流输入电流分离的交流电流;或者变压器的初级侧的交流输入电流在变压器的次级侧生成的交流电流)。本技术的此类形式可以被认为包括一个或多个“自动同步”电开关210,因为施加到电开关210的外部磁场 B_p 的幅度变化的定时通过电流之间的关系自动与交流输入电流的相位同步。在这些形式中,控制机构400可以被认为是促进交流输入电流和交流发生器和交流开关电流之间的所述关系的电部件和/或连接。

[0159] 在某些形式中,施加到电开关210的外部磁场 B_p 的一部分可以以所描述的方式与交流输入电流的相位自动同步,并且磁场发生器310可以包括被配置成通过另一装置生成外部磁场 B_p 的另一部分的发生器部分。

[0160] 现在将描述根据本技术的形式在整流器100中提供的自动同步电开关210的某些实例。

[0161] 在图3和图4所绘示的整流器100的形式中,磁场发生器310从交流电流源900接收交流输入电流 i_1 的供应。该磁场发生器310被配置成生成磁场 B_p 并且将该磁场施加到电开关210。如图4所示,磁场发生器包括缠绕磁芯320的线圈340,其中线圈340承载交流输入电流 i_1 。线圈340电连接到一段HTS材料,该段HTS材料被包括作为电开关210的一部分并且位于磁芯320中的间隙330中。因此,交流输入电流 i_1 的变化导致所施加的磁场 B_p 的变化,并且两者同步。

[0162] 在图5、图6、图12和图19所绘示的整流器100的形式中,交流电流源900将交流输入电流 i_1 供应给磁场发生器310,该磁场发生器310被配置成生成磁场 B_p 并且将该磁场施加到电开关210。如图6所示,磁场发生器包括缠绕磁芯320的线圈340,其中线圈340承载交流输入电流 i_1 。线圈340电连接到变压器510的初级侧上的初级线圈520。变压器510在变压器510的次级侧上的次级线圈530中生成交流电流 i_2 。次级线圈530电连接到一段HTS材料,该HTS材料被包括作为电开关210的一部分并且位于磁芯320中的间隙330中。由于次级线圈530中的交流电流 i_2 与初级线圈520中的交流输入电流 i_1 同步,即同相,所以交流输入电流 i_1 的变化导致所施加的磁场 B_p 的变化,并且两者同步。

[0163] 在图14、图16、图17、图20、图21和图22所绘示的整流器100的形式中,磁场发生器组件300位于变压器510的初级侧,类似于图5、图6、图12和图19所示的形式。在图14、图16、图17、图20、图21和图22所示的形式,的情况下,磁场发生器组件300包括多个磁场发生器310,例如两个磁场发生器310a和310b,每个磁场发生器被配置成将磁场 B_{app1} 和 B_{app2} 分别施加到电开关210a和210b(或者在图16和图21所示的形式,的情况下分别施加到电开关210a和210d以及210b和210c)。

[0164] 在图8、图9和图13所绘示的整流器100的形式中,交流电流源900将交流输入电流 i_1 提供给变压器510的初级侧上的初级线圈520。变压器510在变压器510的次级侧上的次级线圈530中生成交流电流 i_2 。次级线圈530电连接到磁场发生器310,该磁场发生器310被配置成生成磁场 B_p 并且将该磁场施加到电开关210。如图9所示,磁场发生器包括缠绕磁芯320

的线圈340,其中线圈340承载从次级线圈530提供的交流电流 i_2 。线圈340电连接到一段HTS材料,该段HTS材料被包括作为电开关210的一部分并且位于磁芯320中的间隙330中。由于次级线圈530中的交流电流 i_2 与初级线圈520中的交流输入电流 i_1 同步,即同相,所以交流输入电流 i_1 的变化导致所施加的磁场 B_p 的变化,并且两者同步。

[0165] 在图10和图11所绘示的整流器100的形式中,交流电流源900向变压器510的初级侧上的初级线圈520供应交流输入电流 i_1 。变压器510在变压器510的次级侧上的次级线圈530中生成交流电流 i_2 。在这种形式中,变压器510和磁场发生器310包括相同的部件,即磁场发生器310的磁芯320也用作变压器510的磁芯540。该磁芯320/540包括间隙330,一段HTS材料被定位在该间隙330中,该段HTS材料被包括作为电开关210的一部分,并且该段HTS材料被电连接到变压器510的次级线圈530。由于次级线圈530中的交流电流 i_2 与初级线圈520中的交流输入电流 i_1 同步,即同相,所以交流输入电流 i_1 的变化导致所施加的磁场 B_p 的变化,并且两者同步。在本技术的这种形式中,整流器100可以比图5、图6、图8和图9所示的整流器更紧凑,因为仅使用单个磁芯320/540。

[0166] 在本技术的一些形式中,控制机构400包括一个或多个电流流动控制装置,该一个或多个电流流动控制装置被配置成控制通过磁场发生器310中的任一个或多个的交流发生器电流。

[0167] 在本技术的某些形式中,每个电流流动控制装置包括并联连接在磁场发生器310中的一个上的二极管410。在某些形式中,二极管410可以是被配置成允许电流在一个方向上流过二极管410但阻止电流在另一相反方向上流过二极管410的二极管类型。在图12、图13、图14、图16和图17中绘示了包括这种类型的二极管的整流器100的形式。在这些形式中,当电流在二极管410允许电流流过的方向上流动时,磁场发生器310被短路并且因此被去激活。当电流在二极管410阻止电流通过的方向上流动时,电流流过磁场发生器310,从而激活磁场发生器310。这意味着由磁场发生器310施加的磁场 B_{app} 控制的电开关210仅能够在交流电流周期的一半期间被激活(即,被置于较高电阻状态,或打开)。包括二极管410的整流器100的形式优于本文所描述的其他类型的整流器100的一个优点是,由于当电流流过线圈340的绕组时磁场发生器310导致能量的电阻性损耗,所以二极管410意味着当二极管410允许电流流动并且没有电流流过磁场发生器310时,在半个周期期间基本上没有电阻性损耗发生。

[0168] 在图14、图16和图17所示的本技术的形式中,整流器100包括多个电流控制装置,在这些形式中,每个电流控制装置包括二极管,使得整流器100包括多个二极管410a、410b。每个二极管410a和410b并联在磁场发生器310a和310b中相应的一个上。二极管410a和410b在彼此相反的方向上取向,使得当交流输入电流 i_1 在一个方向上流动时,二极管410a允许电流流动并且二极管410b阻止电流流动,并且当交流输入电流 i_1 在另一相反方向上流动时,二极管410a阻止电流流动并且二极管410b允许电流流动。这种布置的结果是,当交流输入电流 i_1 在一个方向上流动时,磁场发生器310b被激活而磁场发生器310a不被激活,并且当交流输入电流 i_1 在另一相反方向上流动时,磁场发生器310a被激活而磁场发生器310b不被激活。这意味着当交流输入电流 i_1 在两个方向上流动时,电开关310a和310b(磁场发生器310a和310b分别向其施加磁场)能够被切换。

[0169] 图15绘示了根据本技术的一种形式的交流输入电流 i_1 、次级电流 i_2 ,由磁场发生器

310a生成的磁场 B_{app1} 、由磁场发生器310b生成的磁场 B_{app2} 以及负载600上的输出电压在使用图14的示例性半波整流器100期间随时间变化的示例性幅度。交流输入电流 i_1 的幅度可以由电流供应组件500(未示出)控制以具有所绘示的波形分布,该波形分布反映在次级电流 i_2 的幅度的分布中。二极管410a使磁场发生器310a生成的磁场 B_{app1} 在交流输入电流 i_1 的周期的正部分被激活,并且否则被去激活。二极管410b使磁场发生器310b生成的磁场 B_{app2} 在次级电流 i_2 的周期的正部分被激活,并且否则被去激活。整流器100的作用是仅在交流输入电流 i_1 的周期的正部分期间在负载600上生成电压,从而对交流输入电流 i_1 进行半波整流。

[0170] 图18绘示了根据本技术的形式的交流输入电流 i_1 、由磁场发生器310a生成的磁场 B_{app1} 、由磁场发生器310b生成的磁场 B_{app2} 以及负载600上的输出电压在使用图16和图17的示例性全波整流器100期间随时间变化的示例性幅度。交流输入电流 i_1 的幅度可以由电流供应组件500控制以具有所绘示的波形分布。该分布反映在次级线圈530(未示出)中的次级电流的幅度。二极管410a使磁场发生器310a生成的磁场 B_{app1} 在交流输入电流 i_1 的周期的正部分被激活,并且否则被去激活。二极管410b使磁场发生器310b生成的磁场 B_{app2} 在次级电流 i_2 的周期的正部分被激活,并且否则被去激活。整流器100的作用是每当交流输入电流 i_1 为非零的(无论负还是正)时在负载600上生成正电压,从而对交流输入电流 i_1 进行全波整流。

[0171] 图14、图16和图17所绘示的整流器100的形式包括多个二极管410和多个电开关210。这些整流器可以仅用一个电流供应900操作,并且控制机构400由交流输入电流 i_1 驱动,即不需要外部控制机构。在一些形式中,它们可以比图5、图6、图8、图9、图10、图11、图12和/或图13中所绘示的整流器100的形式更有效并且遭受更低的低温损耗。此外,图14、图16和图17中所绘示的整流器100的形式可以利用对称的交流输入电流 i_1 操作(即,不需要控制输入电流以具有不对称的波形分布,如图5、图6、图8、图9、图10、图11、图12和/或图13中所绘示的整流器100的形式可能需要的,如下面将描述的),并且因此可以在负载600上生成输出电压达周期的绝大部分,因此,与那些其他形式的整流器相比,增加了输出电压和功率。然而,在一些形式中,图14、图16和图17的整流器100可以在物理上大于本文公开的仅包括单个电开关210的整流器100,并且与其中控制开关的激活/去激活的定时的控制机构400是整流器的单独部分的整流器的形式(即,非自动同步形式)相比,开关210的激活/去激活的定时可能不那么有效。

[0172] 在本技术的某些形式中,控制机构400包括一个或多个电流流动控制装置,该一个或多个电流流动控制装置呈发生器控制开关420的形式,该发生器控制开关420在磁场发生器310上并联连接。在某些形式中,发生器控制开关420可以是呈晶体管形式的开关,例如MOSFET或IGBT。在图19至图22中绘示了包括发生器控制开关420的整流器100的形式。在这些形式中,控制机构400包括开关控制机构(未示出),该开关控制机构被配置成选择性地打开和闭合发生器控制开关420,以便分别通过允许电流从中穿过或使磁场发生器310短路来激活/去激活与每个发生器控制开关420并联连接的磁场发生器310。虽然与其中电流流动控制装置包括一个或多个二极管的整流器相比,这种开关控制机构对整流器100引入了附加的复杂性,但是开关控制机构允许电开关210的主动控制,这可以提供更大的灵活性并且可以允许在本技术的一些形式中实现更大的效率。此外,可能仅需要单个电流供应900。

[0173] 图19和图20所示的示例性整流器100是半波整流器。图19中的整流器100的形式包括与磁场发生器310并联连接的单个发生器控制开关420。控制机构400被配置成基于交流

输入电流 i_1 的相位选择性地打开和闭合开关420,以便以与上述类似的方式对电流进行半波整流。在图20所示的半波整流器100的形式中,以及在图21和图22所示的示例性全波整流器100的形式中,控制机构400包括在一个磁场发生器310a上并联连接的第一开关420a和在另一磁场发生器310b上并联连接的第二开关420b。控制机构400被配置成基于交流输入电流 i_1 的相位选择性地打开和闭合开关420a和420b,以便对电流进行整流。

[0174] 上述整流器的示例性形式是其中磁场发生器组件300由交流输入电流或基于交流输入电流的电流(包括例如:在分流器处从交流输入电流分离的交流电流;或者变压器的初级侧的交流输入电流在变压器的次级侧生成的交流电流)通电的形式。在本技术的其他形式中,磁场发生器组件300包括一个或多个单独的电流/功率源350。在图23、图24、图26、图27、图29和图30中绘示了本技术的示例性的此类形式。

[0175] 在图23和图24所示的整流器100的示例性形式中,施加到电开关210的磁场 B_{app1} 和 B_{app2} 分别由磁场发生器310a和310b生成,并且线圈340a和340b分别承载由电流源350a和350b供应的电流。控制机构400(未示出)被配置成控制从电流源350a和350b到线圈340a和340b的电流的供应,以便以期望的方式激活和去激活磁场发生器310a和310b。

[0176] 图25绘示了根据本技术的一种形式的变压器510的初级线圈520中的交流输入电流 i_1 、变压器510的次级线圈530中的交流电流 i_2 、磁场发生器310b生成的磁场 B_{app2} 、磁场发生器310a生成的磁场 B_{app1} 、负载600上的输出电压和负载600中的电流在使用图23和图24的示例性半波整流器100期间随时间变化的测量幅度。交流输入电流 i_1 的幅度可以由电流供应组件500(未示出)控制以具有所绘示的波形分布,即在电流峰值处的恒定电压的延长期、在交流输入电流 i_1 为零的过零点处的死区时间的延长期以及电流水平之间的恒定梯度转变。控制机构400可以被配置成控制磁场发生器310b以在电流 i_1 为正时将恒定的非零磁场施加到电开关210b,并且在电流 i_1 为负时将零磁场施加到电开关210b。控制机构400还可以被配置成控制磁场发生器310a,以在电流 i_1 为负时将恒定的非零磁场施加到电开关210a,并且在电流 i_1 为正时将零磁场施加到电开关210a,即与磁场发生器310b的激活/去激活反相。利用这些输入,负载600上的输出电压可以如图25中所绘示的,即当次级线圈530中的交流电流 i_2 超过临界电流时,负载600上的电压为非零的。如果负载600包括维持在其超导状态(例如,在低于其临界温度的低温恒温器中)的一段超导材料,则对于负载600上的输出电压的每个脉冲,负载600中的电流可以以阶梯状的方式(其可以被描述为“泵送”)增加,如图25所示。

[0177] 以与关于以上技术的不同形式所解释的类似的方式,控制机构400可以控制开关210a和开关210b在交流电流周期中的一段时间内同时处于低电阻状态,以确保当通过其的电流在期望方向上时,开关处于打开配置(即,较高电阻状态)。

[0178] 图28和图31绘示了在根据本技术的某些形式的图26和图27(在图28的情况下)以及图29和图30(在图31的情况下)的示例性全波整流器100的模拟使用期间与如图25所示的相同的变量(除了变压器510的次级线圈530中的交流电流 i_2)的示例性幅度。示范性全波整流器100的作用类似于以上关于图23和图24的半波整流器所描述的作用,在该周期中的两个阶段,即当次级线圈530中的交流电流 i_2 超过临界电流时,在负载600上仅生成非零电压。因此,超导负载600中的电流每周期被泵送两次。同样,控制机构400可以控制两组开关在交流电流周期中的一段时间内同时处于低电阻状态,以确保当通过其的电流在期望方向上

时,开关处于打开配置(即,较高电阻状态)。

[0179] 与之前的附图中所示的整流器相比,图23、图24、图26、图27、图29和图30中所示的整流器100可能能够更有效地操作,因为开关的切换定时可能能够被控制以提高效率。这可以使整流器能够以较低的低温负载操作以冷却超导材料和/或增加输出功率。也可能能够控制切换的定时以实现其他目的。另一方面,需要附加的电源,并且控制机构更复杂,与前面描述的整流器相比,这可能增加成本并且导致更大的物理大小。

[0180] 电流供应组件

[0181] 根据本技术的某些形式的整流器100包括电流供应组件500,该电流供应组件500被配置成向切换组件200中的该段HTS材料供应交流电流。电流供应组件500可以包括交流电流源900。替代地或附加地,电流供应组件500可以从外部电流源接收交流电流的供应。

[0182] 在图3、图4、图5、图6、图8、图9、图10、图11、图12和图13所绘示的技术形式中,整流器100包括电流控制机构,该电流控制机构被配置成控制流过一个或多个电开关210中的该段HTS材料的交流电流(即,交流开关电流),使得在电流的每个周期中,当电流在一个方向(例如正方向)上流动时,存在电流的第一峰值,并且当电流在另一相反方向(例如负方向)上流动时,存在电流的第二峰值,并且其中第一峰值处的电流的幅度大于第二峰值处的电流的幅度。换句话说,交流开关电流被控制为在其整个周期中是不对称的。此外,电流控制机构被配置成使得当由磁场发生器310施加的磁场的幅度相对较高时,第一峰值处的电流的幅度大于电开关210中的该段HTS材料的临界电流 I_c ,并且当由磁场发生器310施加的磁场的幅度相对较低时,第二峰值处的电流的幅度小于电开关210中的该段HTS材料的临界电流 I_c 。

[0183] 在本技术的某些形式中,电流供应组件500(在图中由交流电流源900表示,但是如上所解释的,在其他形式中,电流供应组件500不包括电流源)包括电流控制机构,并且被配置成控制交流输入电流 i_1 ,使得流过开关210的交流电流如上所述是不对称的。在本技术的其他形式中,电流供应组件500可以供应对称的交流输入电流 i_1 ,并且电流控制机构接收对称的交流输入电流 i_1 并且将所描述的不对称电流提供给开关210。

[0184] 图4A是与图3和图4中所示的整流器100的形式有关的三个图的图示:

[0185] 1) 交流输入电流 i_1 的变化和由磁场发生器310施加到开关210中该段HTS材料的磁场 B_p 随时间的变化;

[0186] 2) 电开关210中的该段HTS材料的临界电流 I_c 如何随由磁场发生器310施加到开关210中的该段HTS材料的磁场 B_p 而变化;以及

[0187] 3) 当供应交流输入电流 i_1 时,负载600上的电压随时间变化。

[0188] 在电流周期期间,随着通过磁场发生器310的电流(以及通过开关210的电流)增加,施加到开关210的磁场 B_p 的幅度也随之增加。磁场的增加导致电开关210中的该段HTS材料的临界电流 I_c 减小。当开关电流超过电开关210中的该段HTS材料的临界电流 I_c 时,电开关210被置于较高电阻状态。电开关中等于临界电流 I_c 的电流在图4A中指示为 i_{th} 。因此,当开关中的电流超过 i_{th} 时,负载600上的电压为非零的,并且在图4A的实例中,这发生在周期的正部分,因为交流输入电流 i_1 被控制为使得正峰值超过临界电流 i_{th} 。在图4A中,该电流被示为交流输入电流 i_1 ,因为当开关处于“闭合”时,即处于低电阻状态时,假定所有输入电流都流过电开关210。

[0189] 当电流低于 i_{th} 时,该段HTS材料处于低电阻状态,因此没有电流流过负载600。此外,由于控制交流输入电流 i_1 ,使得负峰值不超过临界电流 i_{th} (在幅度上),对于周期的所有负部分,该段HTS材料保持在低电阻状态,意味着可忽略的电流流过负载600。当在多个周期上重复时,在负载600上产生周期性的正电压,因此对交流输入电流 i_1 进行半波整流。

[0190] 图7是示出在图5和图6所示的整流器100的使用期间随时间变化的以下参数的幅度的四个图的图示:

[0191] 1) 向磁场发生器310和变压器510的初级线圈520供应的交流输入电流 i_1 ;

[0192] 2) 在变压器510的次级线圈530中生成的交流电流 i_2 ;

[0193] 3) 负载600上的电压;以及

[0194] 4) 负载600中的电流(其中负载600包括维持在其超导状态的一段超导材料,例如在低于其临界温度的低温恒温器中)。

[0195] 在该实例中,在没有外部施加的磁场的情况下,电开关210中的该段HTS材料的临界电流 I_c 为200A。由电开关210承载的交流电流 i_2 在其周期中的任何点都不超过200A,因此不足以将开关210置于较高电阻状态。通过施加由磁场发生器310生成的0.25T的磁场,电开关210中的该段HTS材料的临界电流 I_c 减小到大约50A。在这种情况下,一旦由电开关210承载的交流电流 i_2 超过50A,开关210就切换到较高电阻状态,并且在负载600上生成电压。由于交流输入电流 i_1 是不对称的,并且因此交流电流 i_2 是不对称的,开关210仅在电流周期的正部分期间切换到较高电阻状态,并且该电流是半波整流的。这导致在负载600中流动的电流的泵送。

[0196] 图3至图6所示的技术形式的整流器100的一个优点是,切换整流器的开关210所需的电流显著低于在没有外部磁场施加到开关210的情况下所需的电流。这减少了输入电流需求并且减少了整流器100中的损耗,当在负载600中生成相同水平的电流和电压时提高了效率。在图7所示的参数,例如,损耗减少为75%。

[0197] 如上所述,在本技术的某些形式中,电流控制机构被配置成控制流过一个或多个电开关210的交流电流为不对称的,并且相对于该段HTS材料的临界电流具有必要的峰值幅度。电流控制机构可以以任何适当的方式实现电流的这种控制。在某些形式中,电流控制机构可以包括可编程信号发生器,其中代表期望波形的数字信号被提供给数模转换器以生成具有适当不对称的波形的模拟电压信号。该模拟电压信号可以被提供给功率放大器以生成不对称的交流输入电流。

[0198] 在本技术的某些形式中,电流供应组件500可以包括变压器510,如已经针对许多实例所描述的。变压器可以包括连接到电流源900的初级线圈520和连接到切换组件200的次级线圈530。变压器510可以包括磁芯540,初级线圈520和次级线圈530缠绕在该磁芯540上。在图23、图24、图26、图27、图29和图30的整流器100中,将交流输入电流 i_1 供应给变压器510的初级线圈520,并且将次级线圈530连接到切换组件200。在图5、图6、图12、图14、图16、图17、图19、图20、图21和图22的整流器100中,磁场发生器310(特别是导体形成线圈340)连接到变压器510的初级线圈520。在图8、图9和图13的整流器100中,磁场发生器310(特别是导体形成线圈340)连接到变压器510的次级线圈530。在图10和图11的整流器100中,变压器510和磁场发生器310包括相同的部件,如上面更详细描述。在某些形式中,初级线圈520可以由正常导体材料形成,并且次级线圈530可以由超导材料形成,例如HTS材料。

[0199] 包括根据本技术的某些形式的变压器510的整流器100可以适用于各种应用,包括例如超导磁体、超导马达/发生器、空间推进系统、聚变反应堆、研究磁体、NMR、MRI、悬浮、水净化和感应加热。在整流器中使用变压器510使得整流器的两个部分在物理上分开,这意味着此类整流器可以用作通量泵或在通量泵中使用。用于该应用的整流器的适当形式将取决于各种因素,包括物理大小约束、低温热负载、输出功率、效率、成本和可控性。在某些形式中,图5、图6、图8、图9、图10、图11、图12和图13的整流器100可以被认为适合于紧凑、简单和/或低成本的应用,其中对诸如效率、低温热负载和输出功率的因素的要求可能不是特别苛刻的,例如一些超导马达/发生器或实验室超导电源应用。在某些形式中,图23、图24、图26、图27、图29和图30的整流器100可以被认为适合于需要高效率、低低温热负载和/或高功率输出的应用,例如空间推进或快速倾斜的大磁体。例如,其他附图的整流器可以适合于其他应用。

[0200] 热障

[0201] 在技术的某些形式中,电开关210和整流器100包括由超导材料例如HTS材料制成的部件。为了超导材料采用低电阻(“超导”)状态,超导材料必须维持在具有低于超导材料的临界温度的温度的环境中。根据本技术的形式的整流器100可以包括低温恒温器700,该低温恒温器700被配置成将整流器100或其部分维持在温度低于整流器100中的一种或多种超导材料的临界温度的适当冷的环境中。

[0202] 如果整流器100的操作不需要这样做,则在低温恒温器700中将整流器100的某些部分维持在低温,在能量方面可能是昂贵的。然而,将整流器100的某些部分维持在低温而将其他部分维持在较暖的温度可能导致来自低温恒温器700的热损耗,从而增加能量成本。因此,本技术的某些形式包括一个或多个热障710,以将整流器100的一个或多个部件与整流器100的一个或多个其他部分热绝缘,以便减少期望将不同部分维持在不同温度的热能流动。

[0203] 本技术的形式不限于热障710的形式或配置。在某些形式中,热障710包括一个或多个由绝热材料形成的元件。附加地或替代地,热障710可以包括真空区域。附加地或替代地,热障710可以包括一个或多个辐射屏蔽。

[0204] 图32是根据本技术的某些形式的变压器510的示意图。变压器510可以包括以下不同类型的热障710中的任何一个或多个:

[0205] 1) 热障710a可以位于初级线圈520和磁芯540之间;

[0206] 2) 热障710b可以位于磁芯540a的第一部分和磁芯540b的第二部分之间。在某些形式中,初级线圈520可以缠绕第一芯部分540a,并且次级线圈530可以缠绕第二芯部分540b;以及

[0207] 3) 热障710c可以位于次级线圈530和磁芯540之间。

[0208] 图33是根据本技术的某些形式的变压器510的示意图,其中变压器510具有同轴几何形状,并且初级线圈520和次级线圈530是同向缠绕的,其中线圈中的一个比另一个线圈更靠近轴线缠绕。这种变压器510可以包括在初级线圈520和次级线圈530之间的热障710d。

[0209] 类似地,整流器100的磁场发生器310中的任何一个或多个可以包括一个或多个热障710,例如:在磁芯320a的第一部分和磁芯320b的第二部分之间的热障;以及在磁芯320和缠绕磁芯320的导体的线圈340之间的热障。

[0210] 本技术的形式设想整流器100可以被配置成在需要提供能够实现超导行为的“冷”环境和“暖”环境之间的热绝缘的任何数目的位置处包括热障710。

[0211] 在图34中绘示了包括热障710的整流器100的一个实例。在图34中,变压器510以及第一和第二磁场发生器310中的每一个的磁芯被分成两个芯部分,每个磁芯具有位于低温恒温器700内部的芯部分中的一个和位于低温恒温器700外部的另一个芯部分。每个磁芯的两个部分磁耦合在一起。低温恒温器700的内部维持在足够低的温度,以使位于低温恒温器700内部的该段超导材料(包括形成电开关210的那些)能够在低电阻或超导状态下操作。低温恒温器700的壁因此形成热障710。图34中的整流器100的布局在其他方面类似于图26和图27中所示的整流器100的布局。

[0212] 在图35中绘示了包括热障710的整流器100的另一实例。这种形式再次绘示了具有与图26和图27中所示的整流器100类似的布局的整流器100。在这种形式中,磁场发生器310和变压器510的所有磁芯320和540都位于低温恒温器700内部。变压器510以及第一和第二磁场发生器310和310中的每一个的磁芯被分成两个芯部分,每个磁芯中的两个芯部分被热障710分开。每个磁芯的两个部分磁耦合在一起。连接到变压器的初级线圈520和磁场发生器310的线圈340的导体穿过低温恒温器700的壁。

[0213] 双线布置

[0214] 已经描述了涉及电开关210的技术形式,该电开关210利用超导材料的临界电流随着更高的外部磁场施加到该材料而减小的原理。图24绘示了一个示例性电开关210a。图24中的电开关210a包括以双线布置的一段超导材料。在图36中示出了另一电开关210,该电开关210包括以双线布置的一段超导材料。现在将更详细地描述该技术的这个方面。

[0215] 应当理解,虽然关于图24、图36A和图36B中所示的电开关210的形式描述了该段超导材料的双线布置,但是双线布置也可以应用于该技术的其他形式。特别地,在本技术的替代形式中,在本说明书中描述的任何电开关210可以包括以双线布置布置的一段超导材料。此外,根据本技术的形式并入任何整流器100中的任何电开关210可以包括以双线布置布置的一段超导材料。

[0216] 在本说明书的上下文中,除非另有说明,否则“双线布置”应当理解为意指导体的两根股线的布置,其中该导体的两根股线基本上平行并且电连接,使得电流以相反方向流过该股线。股线可以彼此紧密相邻。该股线可以是一段超导材料的两个区段,该段超导材料自身被对折。替代地,这两根股线可以是分开段的超导材料,它们例如通过焊接、扩散接头或其他合适形式的电连接而电连接在一起。

[0217] 还应当理解,在本技术的某些形式中,可以使用多根双线股线。因此,除非上下文清楚地要求,否则在描述双线布置的地方,本技术的其他形式可以包括具有多根双线股线的类似布置。

[0218] 更具体地,例如参考图36A所绘示的技术的形式,在双线布置的一种形式中,电开关210包括一段超导材料800。该段超导材料800包括超导材料的两根股线(即子段)810a和810b。这两根股线810a和810b彼此串联连接。该段超导材料800被布置成使得它在其自身上对折并且这两根股线810a和810b在空间上被布置成基本上彼此平行。在这种布置中,当该段超导材料800承载传输电流时,第一股线810a中的电流以与第二股线810b中的电流相反的方向流动。该段超导材料800的折叠区域820(其可以采取环路的形式)可以沿着该段超导

材料800的长度将两根股线810a和801b分开。

[0219] 在图36B所示的技术的替代形式中,电开关210包括超导材料的两根分开的股线810a和810b。两根股线810a和810b中的每一根的一端在电连接820b处电连接在一起,并且两根股线呈双线布置。同样,在这种布置中,当该段超导材料800承载传输电流时,第一股线810a中的电流以与第二股线810b中的电流相反的方向流动。电连接820b可以是焊接接头、扩散接头或任何合适的电接头。

[0220] 在图36A和图36B所示的技术形式中,两根股线810a和810b也可以彼此紧密相邻地布置。绝缘涂层可以施加到股线810a和810b中的一根或两根上,并且股线的绝缘涂层可以彼此接触。替代地,绝缘层可以放置在与一根或两根股线接触的两根线股810a和810b之间。绝缘层可以由绝缘带材形成,例如卡普顿(Kapton)或诺梅克斯(Nomex)带材。

[0221] 在本技术的某些形式中,该段超导材料800可以采取带材的形式,即一段材料具有长度明显大于其宽度和深度,并且宽度明显大于其深度。带材可以具有两个基本平行的相对面,其中该面由带材的深度分开。股线可以布置成使得一根股线810a的相对面与另一根股线810b的相对面平行。在图36B所示的技术形式中,两根股线810a和810b中的每一根可以采取带材的形式。两根分开的股线可以在一端面对面地电连接(例如焊接)以形成电连续接头820b。这种布置可以减小电开关210的电感,尽管这种益处可以以低电阻状态的电阻的微小增加为代价来实现。替代地,单段超导材料(例如,带材)可以与作为端对端联结的段的相邻区段的两根股线10a和810b一起布置。

[0222] 在该技术的某些形式中,该段超导材料800可以是一段高温超导(HTS)材料,如前所解释的。

[0223] 如图24、图36A和图36B中的技术形式所示,本技术的某些形式的电开关210可以被布置成使得磁场发生器310能够被激活以将磁场施加到超导材料的两根股线810a和801b上。磁场发生器310可以采取本说明书中前面描述的任何磁场发生器的形式。磁场发生器310可以被选择性地控制以选择性地生成磁场,以便使电开关210以前面所解释的方式在低电阻状态和较高电阻状态之间移动。

[0224] 在某些形式中,磁场发生器310包括磁芯320。磁芯320可以是高磁导率磁芯,诸如铁磁芯,例如铁氧体磁芯(例如铁芯)或层压钢/铁芯。在图24所示的示例性形式中,磁芯320a是基本上环形的实心芯,例如圆环。在其他形式中,该芯可以具有不同的形状,例如具有圆角的方形环。在示例性形式中,磁芯320包括由间隙330分开的第一端和第二端。间隙330可以是实心磁芯320中的空间,例如环芯一侧中的空间。

[0225] 在某些形式中,电开关210被布置成使得由磁场发生器310生成的磁场基本上垂直于股线810a和801b的相对面。也就是说,磁场的磁通线基本上垂直于股线810a和801b的面,其中通线与股线相交。

[0226] 在本技术的某些形式中,间隙330的宽度类似于两根股线810a和810b的组合深度,即,存在将股线810a和810b中的每一根与最接近该股线的芯330的相应端分开的相对小的气隙。

[0227] 包括一段超导材料的双线布置的电开关210的一个益处是,与具有单段超导材料的类似开关相比,减小了开关的电感。这样做的一个实际优点可以是,向电开关210施加磁场的磁场发生器310的线圈340可以具有比其他情况下需要的更少匝。

[0228] 包括一段超导材料的双线布置的电开关210的另一益处是,当施加到该段超导材料的磁场较低,例如为零时,它有助于减少对该段超导材料的临界电流的抑制。这导致开关210的低电阻状态的较高临界电流。现在将更详细地解释该效应。

[0229] 上述技术的形式包括电开关210,其中将磁场施加到一段超导材料上,以便抑制该段超导材料中的临界电流。这种效应在该技术的一些形式中用于在低电阻状态和较高电阻状态之间转换该段超导材料。生成磁场的磁场发生器310可以包括高磁导率芯320,例如铁磁芯,其可以用于将磁场聚焦到该段超导材料上。

[0230] 已经观察到,当承载传输电流的单段超导材料被放置在铁磁芯附近时,即使当磁场强度低(包括零)时,也存在对临界电流的附加抑制。事实上,当施加的磁场强度较低时,由于该效应的对临界电流的相对附加抑制更大。这是由于当电流流动时,芯320中的铁磁材料接近超导材料而引起的自场放大效应。更具体地,通过实验和有限元分析已经鉴定,通过铁磁芯320的低磁阻返回路径的存在导致单线段超导材料的自场被放大,并且在单线段超导材料为带材的形式,单线段超导材料垂直于该带材取向并且在其宽度上扩展。这导致在带材的宽度上的每个点的临界电流密度的抑制,并且因此与不存在铁磁芯时相比总临界电流的抑制。

[0231] 已经进一步鉴定其中以双线布置布置该段超导材料的电开关210显著地减轻了这种效应,即,它减小了所描述的对临界电流的抑制。换句话说,双线布置基本上抵消了当在铁磁芯320附近时由流过该段超导材料的电流生成的自磁场。图37绘示了在不同的施加场下并且当该段超导材料被布置成双线布置(蓝色,顶线)和单线布置(橙色,底线),即单层的该段超导材料时,根据本技术的形式的电开关210中的一段超导材料的临界电流。将这些实验结果与来自数据库(绿色,虚线,中线)的超导材料的参考值进行比较。这说明与单线布置相比,双线布置在低施加场下对临界电流的抑制非常低。在所施加的磁场明显大于任何自场效应的的较高施加场下,差异不那么显著。在较高施加场下临界电流的相对小的差异可能是由于与单层单线布置相比,两层双线布置的屏蔽能力的增加。应当理解,在本技术的某些形式中,该段超导材料可以一直维持在超导状态。

[0232] 与高施加磁场相比,低施加磁场的临界电流之间的较大差异意指与例如具有单线布置的开关相比,包括双线布置的一段超导材料的电开关210可以具有改进的切换性能。切换性能可以由切换因数 k 给出,其可以计算为当磁场为零时的临界电流与当施加磁场时的临界电流的比率,即 $I_c(0)/I_{c,b}(Ba)$ 。从图37可以看出,双线布置的 k 大于单线布置的。较高的切换因数 k 意指更有效的开关,只要传输电流低于 $I_c(0)$ 。而且,低电阻状态下的较高临界电流使电开关210能够输出较高的最大电流。

[0233] 图38A和图38B示出了根据本技术的某些形式的电开关210的铁磁芯320的端部之间的间隙内的磁场分布。电开关210包括一段超导材料810,其形式为位于铁磁芯320两端之间的带材。通过有限元分析生成磁场分布。在图38A中,该带材以单线布置布置在芯320的端部之间的间隙330中,即,单段带材穿过间隙330。在图38A中,带材被建模为承载195A的电流,并且施加到带材的磁场被建模为具有250mT的磁场强度。在图38B中,带材以双线布置布置在芯320的端部之间的间隙330中,即,该带材的两根股线彼此平行并且紧密相邻地布置在间隙330中。在图38B中,带材被建模为承载375A的电流,并且施加到带材的磁场被建模为具有70mT的磁场强度。

[0234] 图38A和图38B示出了以单线布置布置的该段超导材料(图38A)的技术形式的平均磁场幅度明显大于以双线布置布置的该段超导材料(图38B)的技术形式的平均磁场幅度。实际上,双线布置几乎消除了带材的自电感,并且带材上的剩余磁场主要在平行于带材的面的方向上。这解释了为什么双线布置在零施加场的临界电流明显大于单线带材的临界电流(如图37所示)。

[0235] 还已经鉴定,芯320的端部之间的间隙330越大,施加场的磁场强度越低。这意味着,如果增大间隙330,则可能需要向磁场发生器供应更大的电流供应,以便维持相同的磁场强度。这可能是不期望的,因为它需要附加驱动功率并且耗散附加热量。因此,在本技术的某些形式中,间隙330的大小可以尽可能小,例如间隙330的宽度类似于该段超导材料810的两根股线的组合深度。

[0236] 其他备注

[0237] 除非上下文清楚地要求,否则在整个说明书和权利要求书中,词语“包括(comprise)”、“包括(comprising)”等应被解释为与排他性或穷举性意义相对的包括性意义,也就是说“包括但不限于”的意义。

[0238] 上文和下文引用的所有申请、专利和出版物(如果有的话)的全部公开内容通过引用并入本文。

[0239] 在本说明书中对任何现有技术的参考不是并且不应被认为是对该现有技术形成世界上任何国家所致力的领域中的公知常识的部分的承认或任何形式的建议。

[0240] 本技术还可以被广义地说成在于在本申请的说明书中单独地或共同地以两个或更多个所述部分、元件或特征的任何或所有组合提及或指示的部分、元件和特征。

[0241] 在前述描述中已经参考了整体或具有其已知等同物的部件的情况下,这些整体在本文中并入,如同单独阐述一样。

[0242] 应当注意,对于本领域技术人员来说,对在本文中所描述的当前优选实施例的各种改变和修改是显而易见的。在不脱离本技术的精神和范围并且不减少其附带优点的情况下,可以进行此类改变和修改。因此,此类改变和修改旨在包括在本技术中。

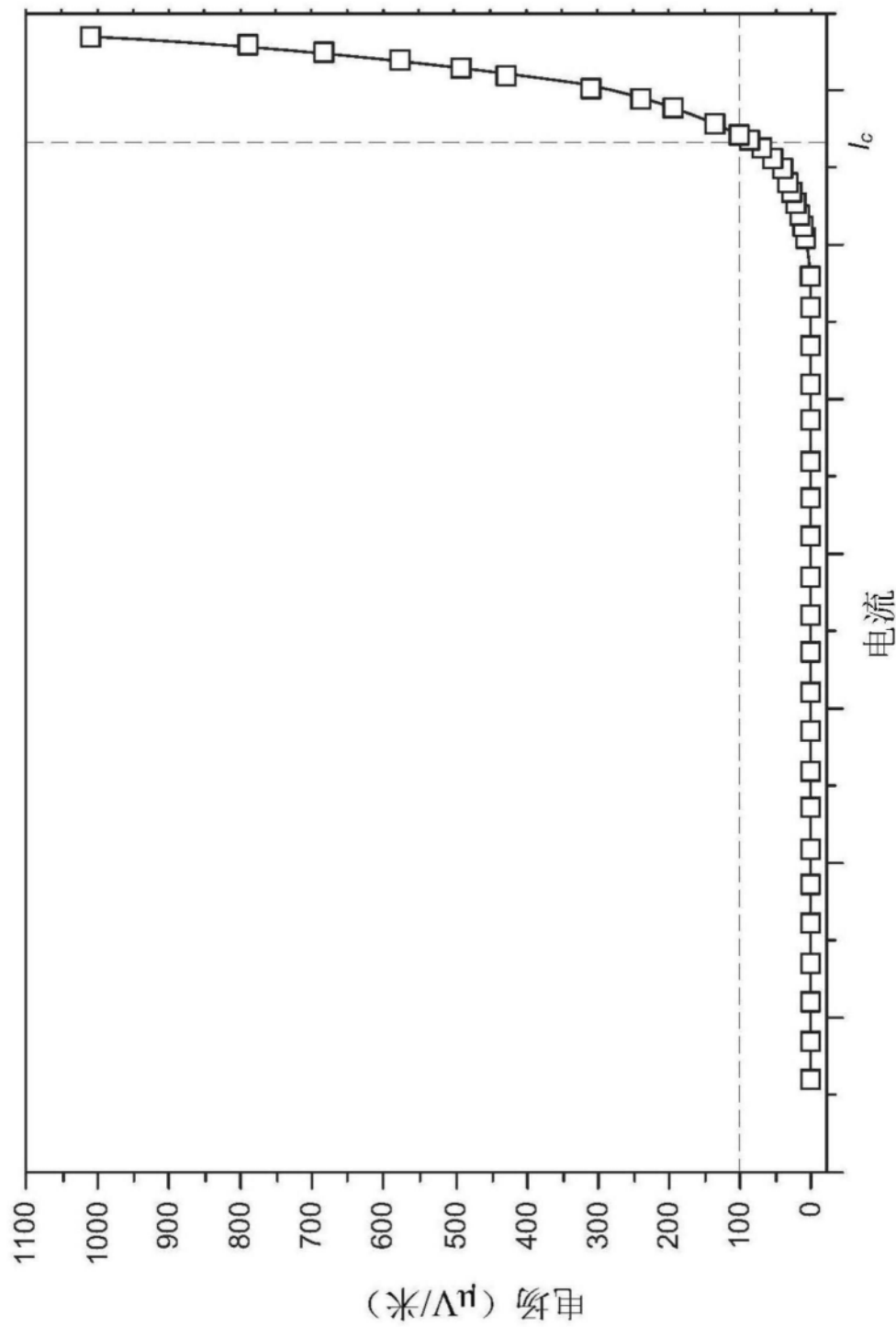


图1

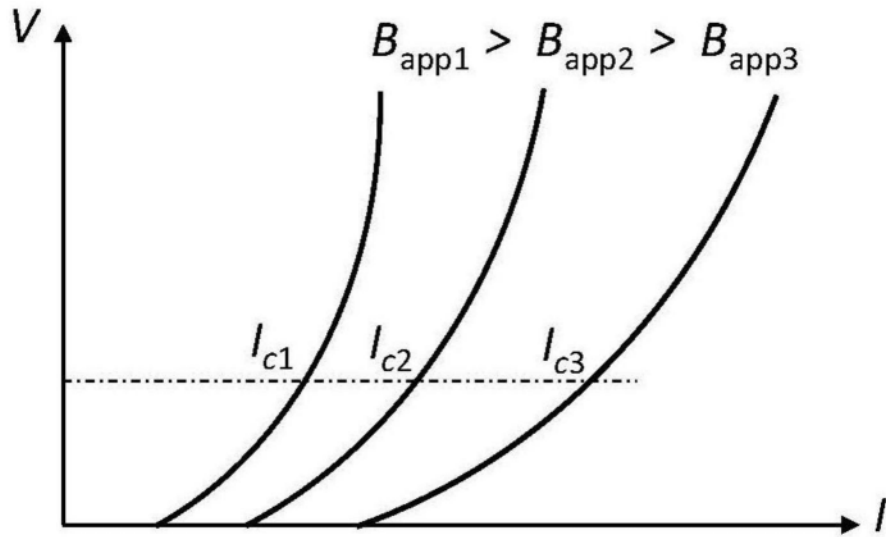


图2

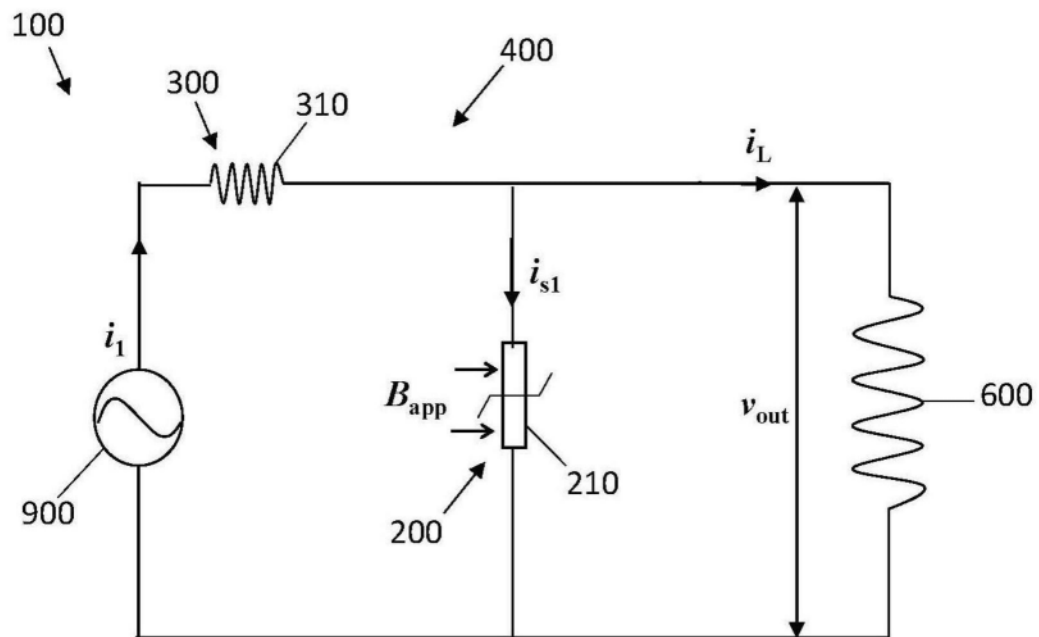


图3

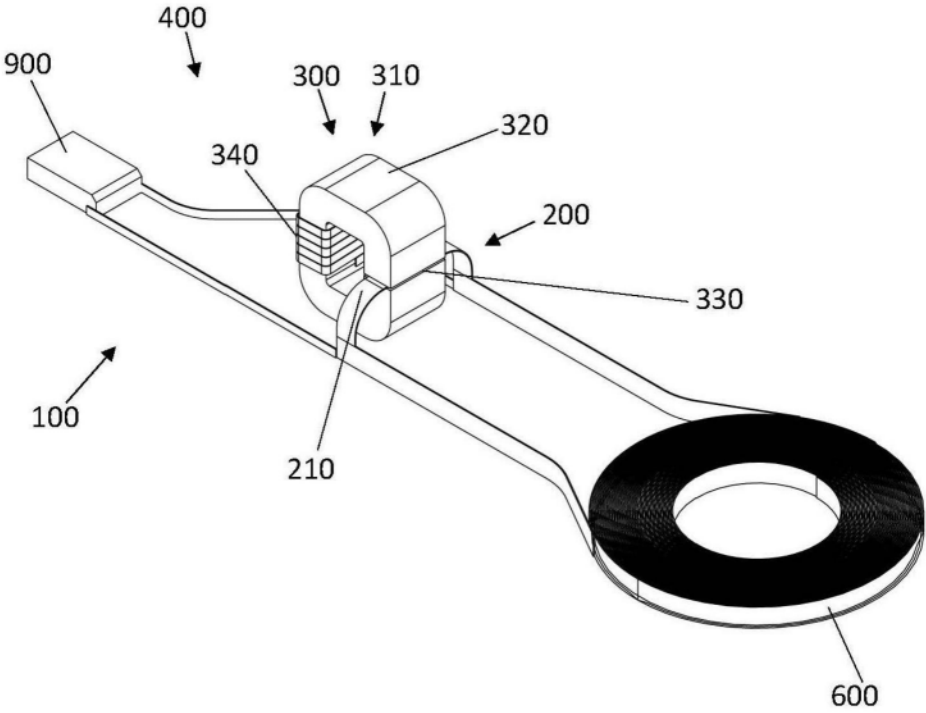


图4

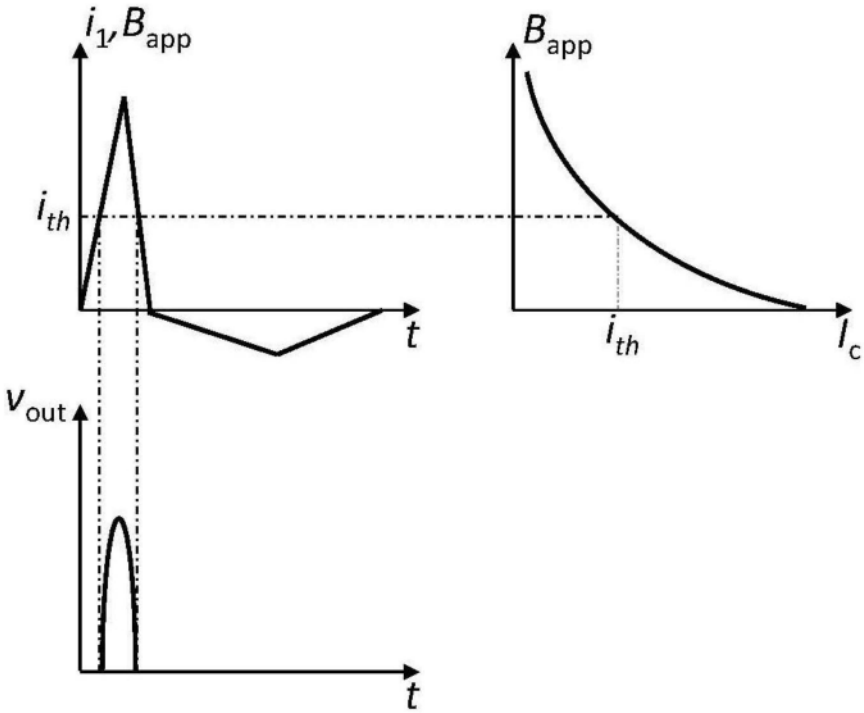


图4A

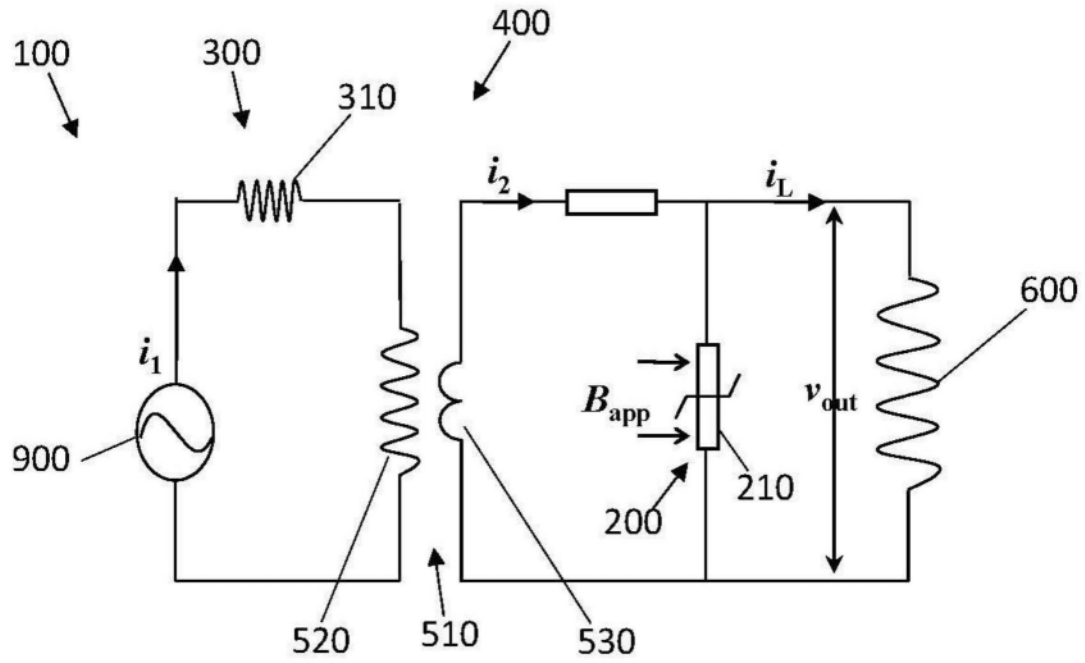


图5

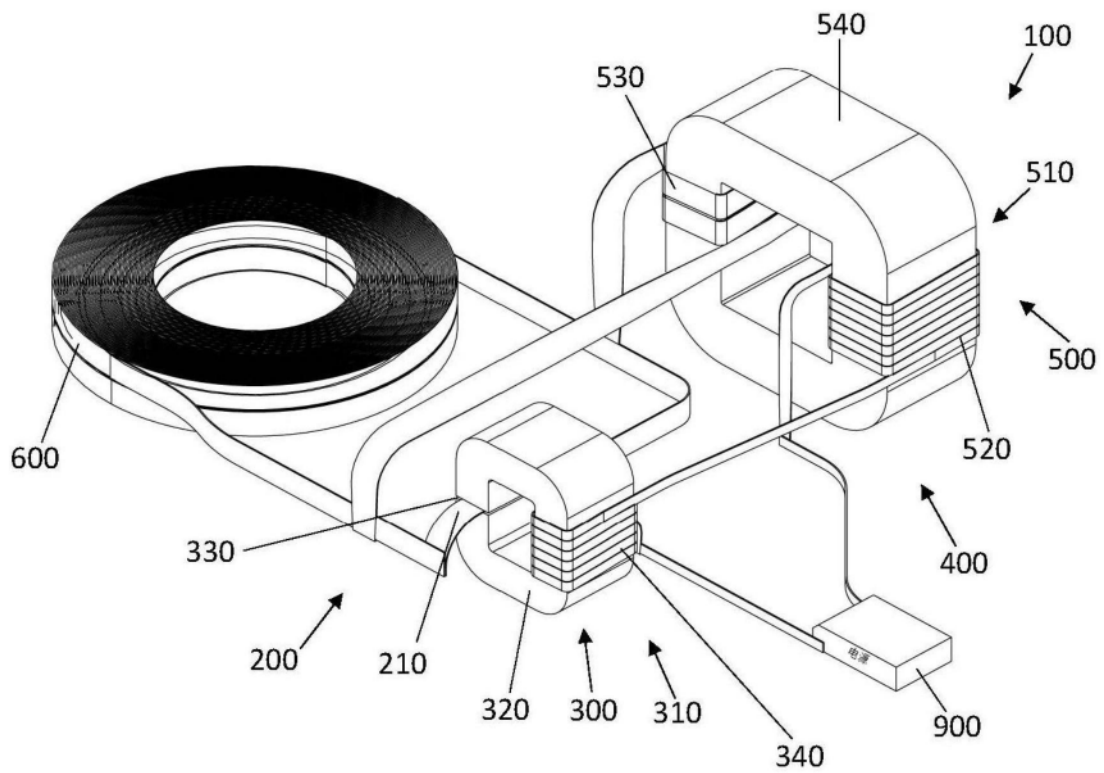


图6

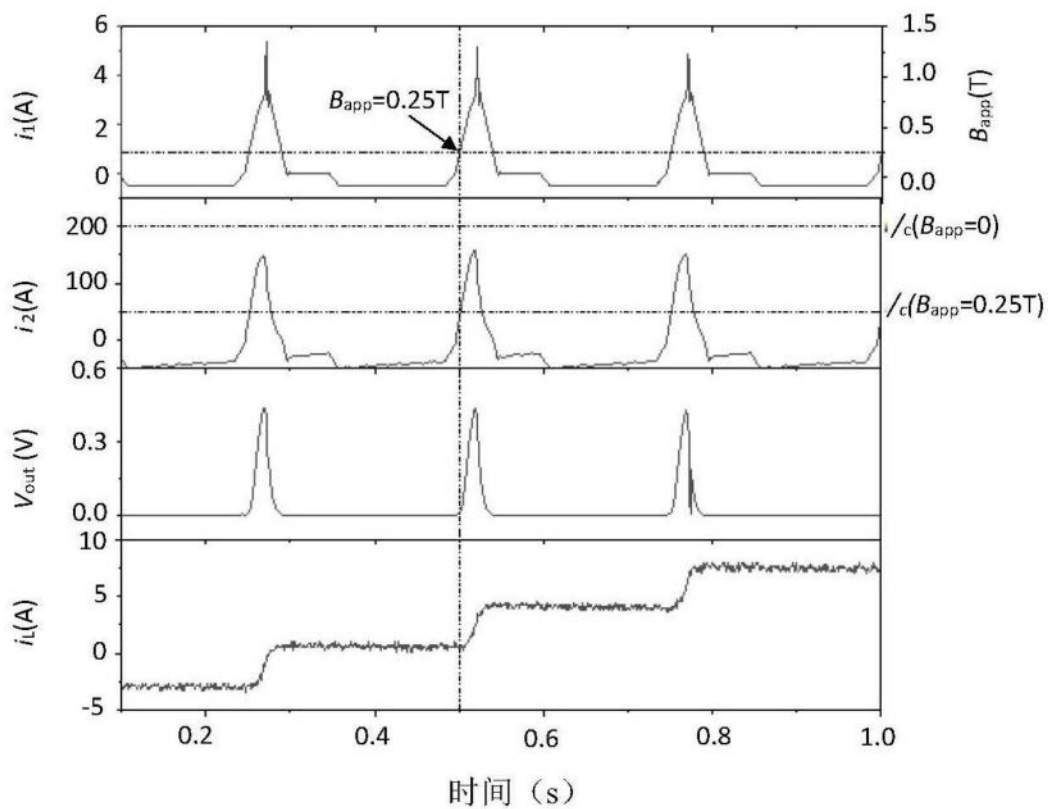


图7

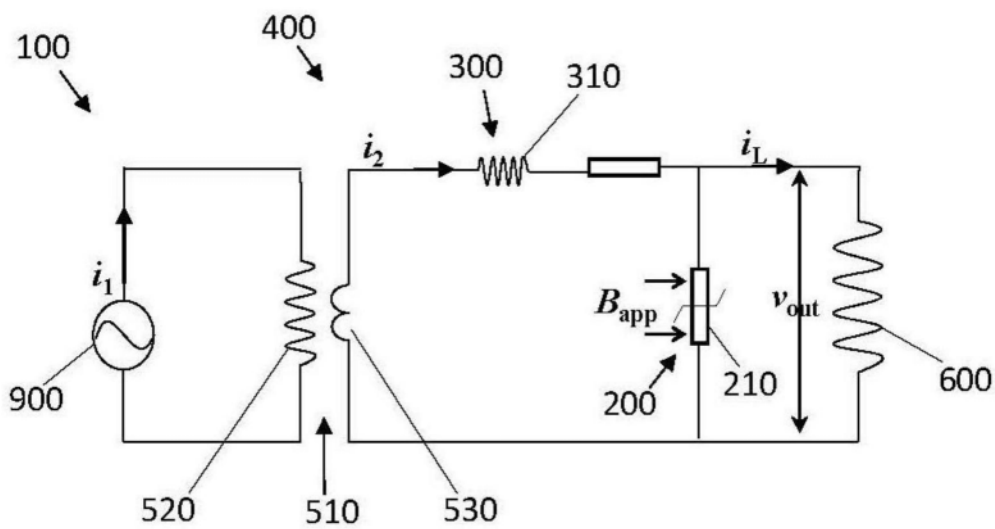


图8

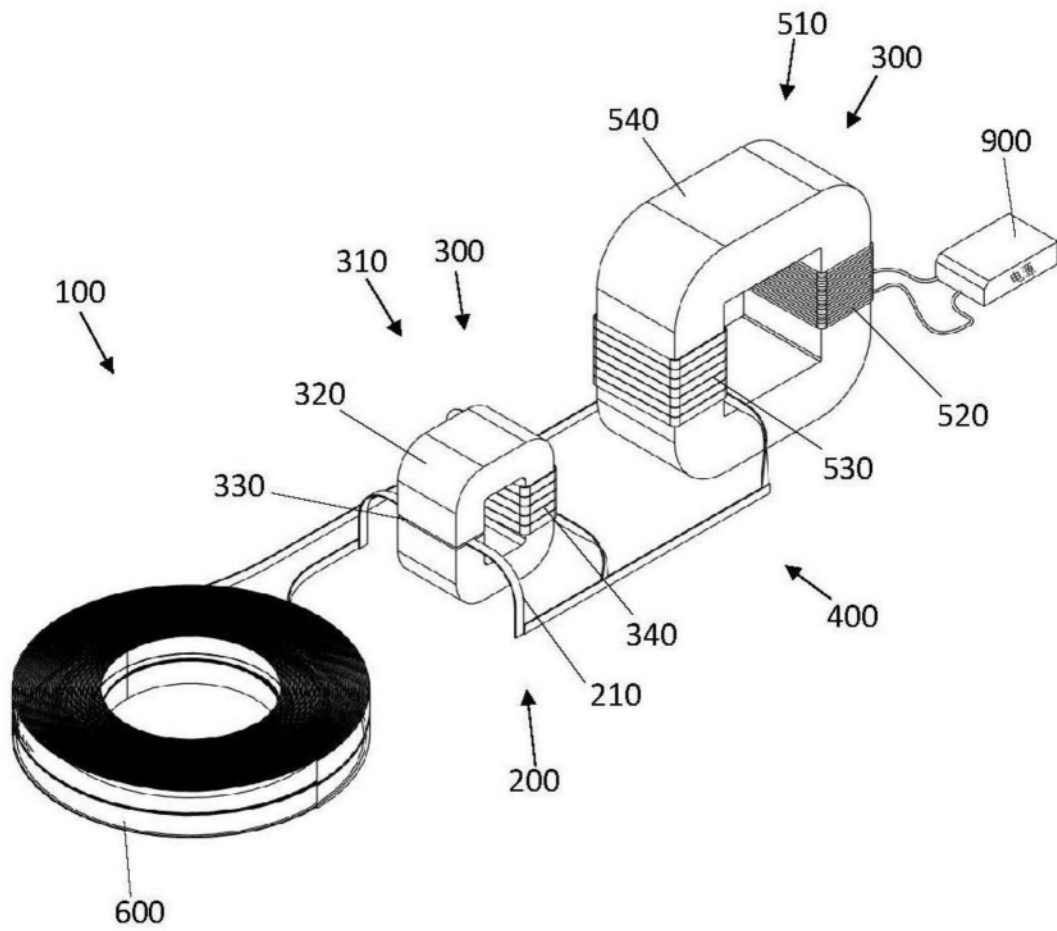


图9

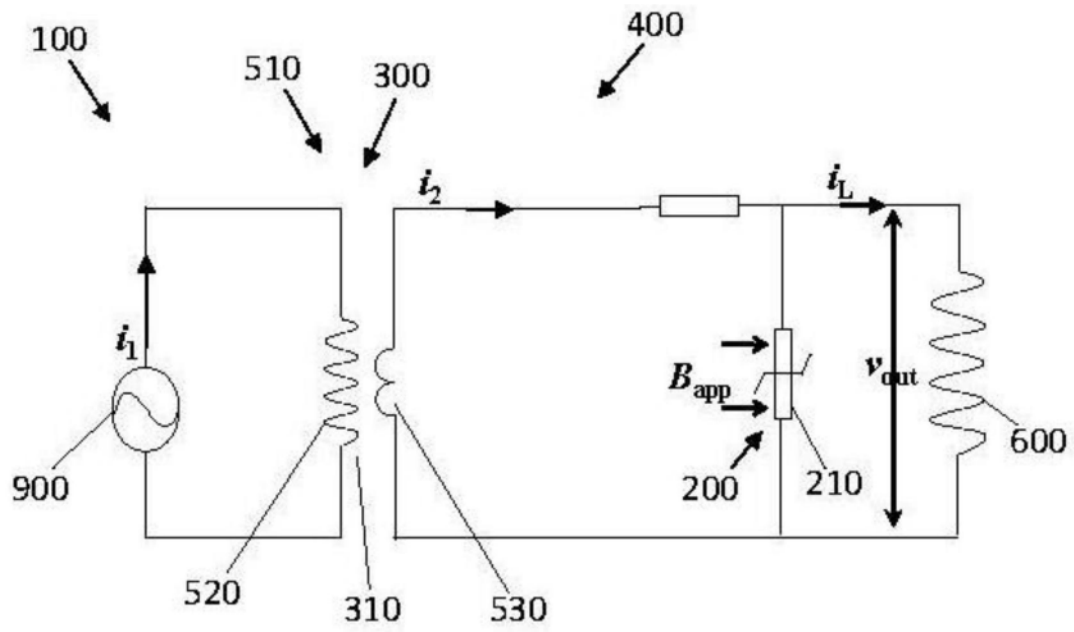


图10

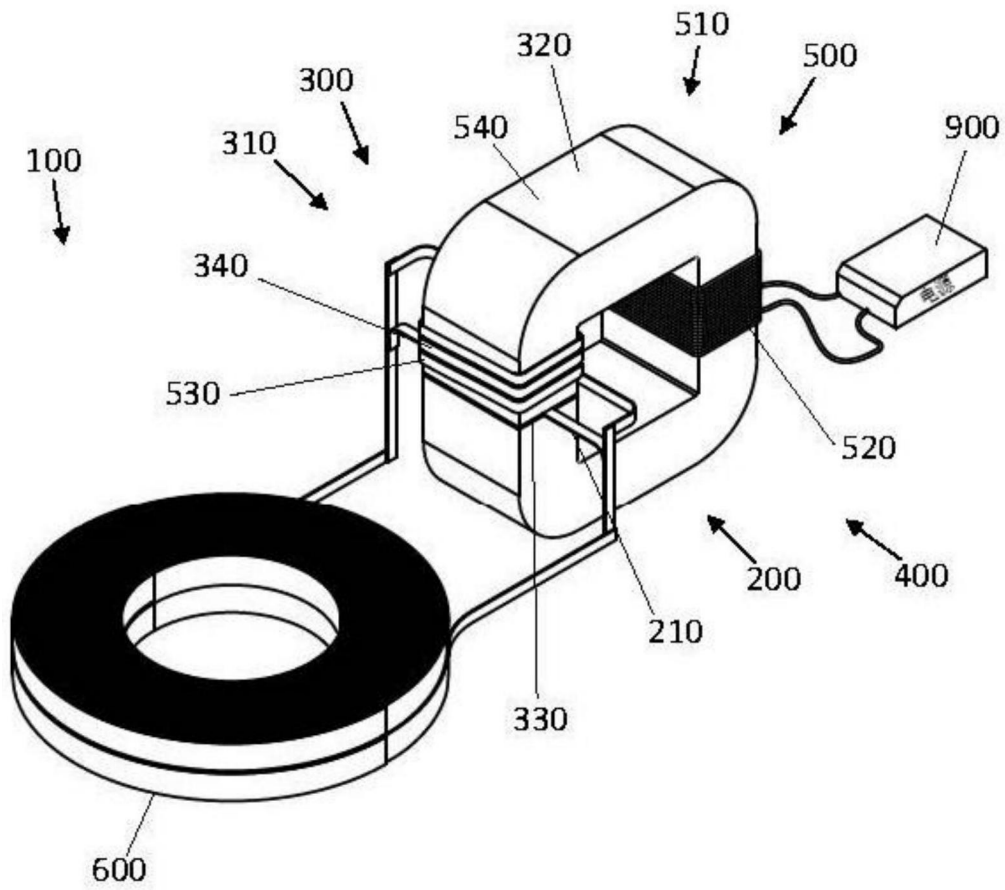


图11

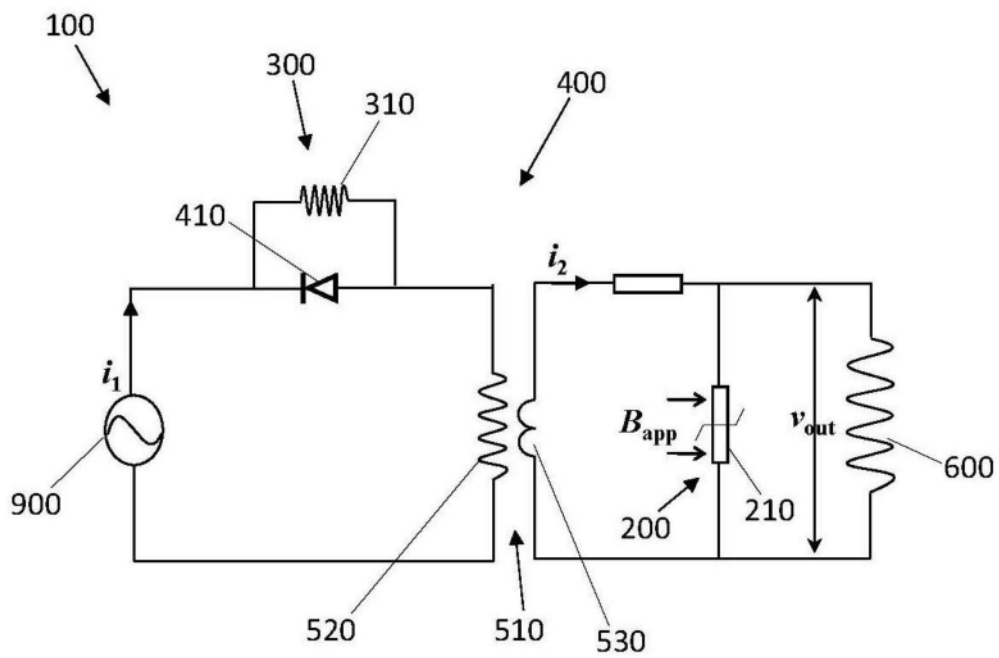


图12

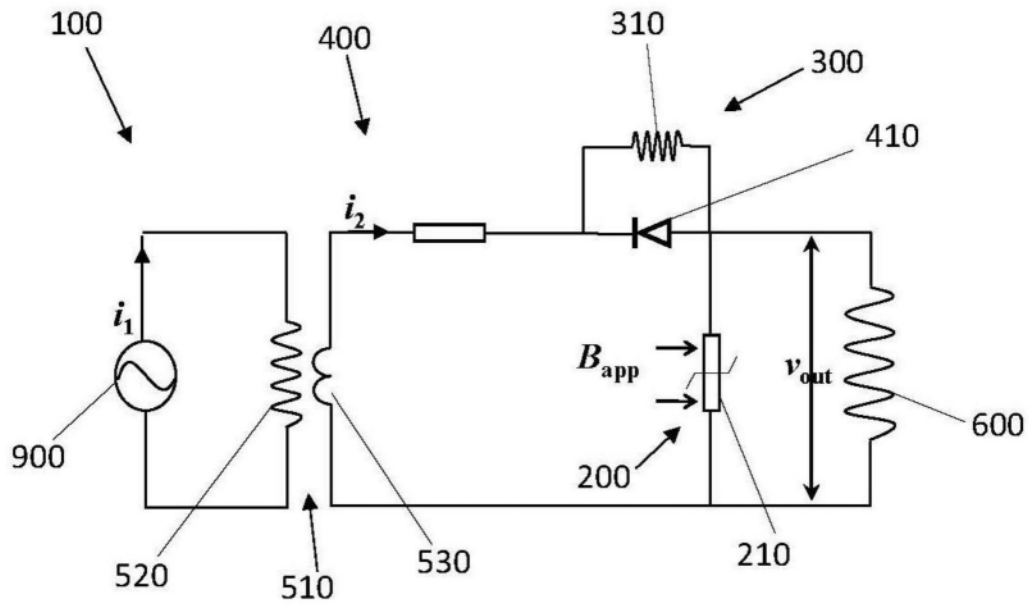


图13

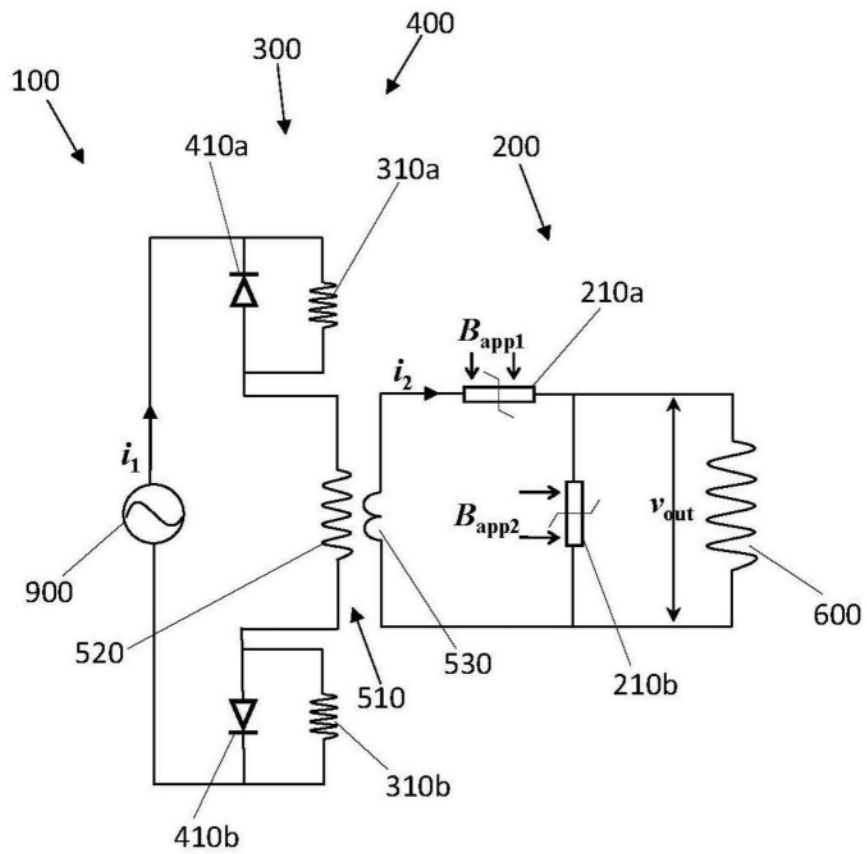


图14

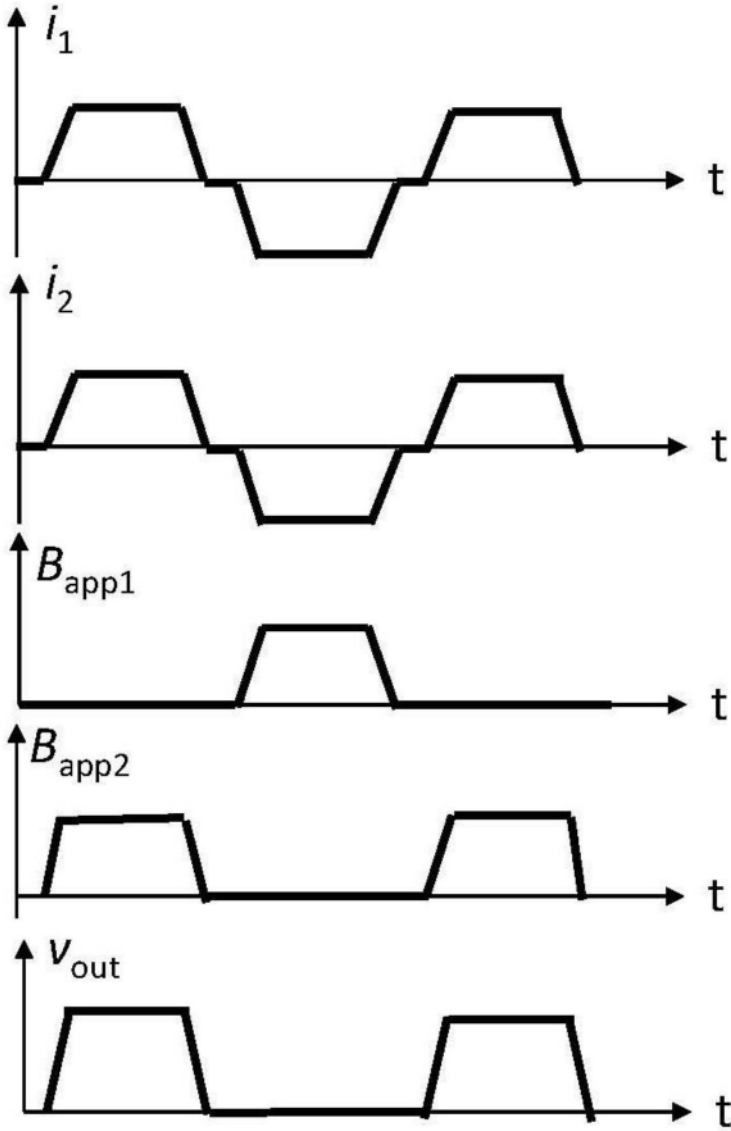


图15

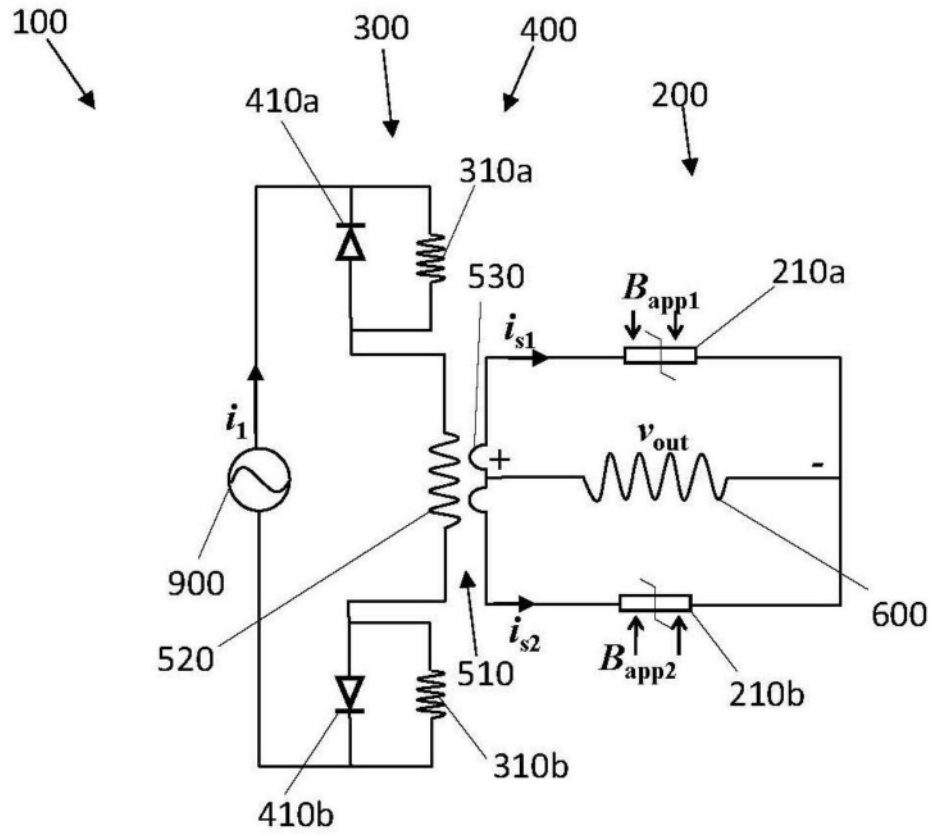


图17

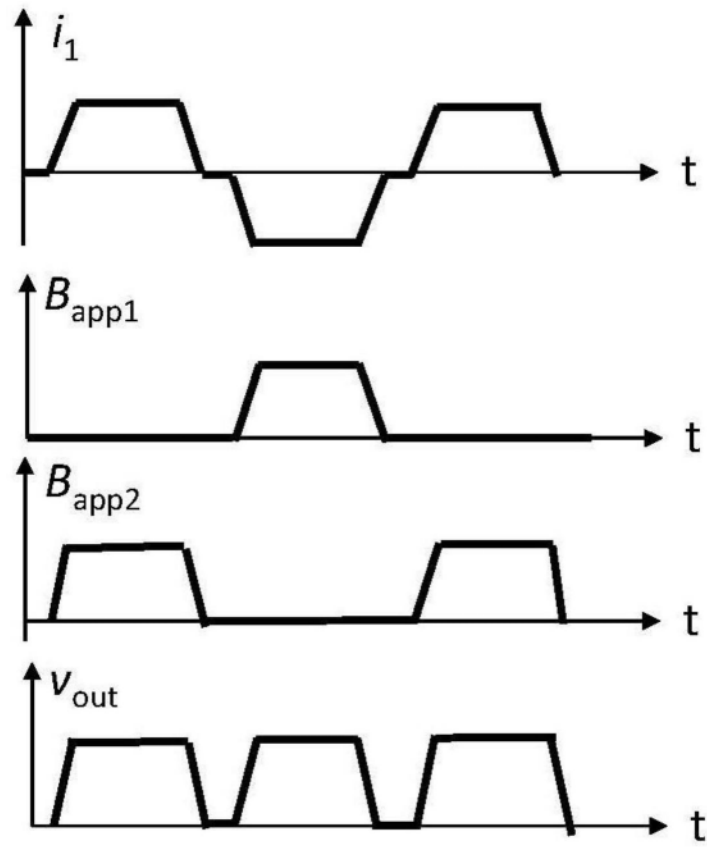


图18

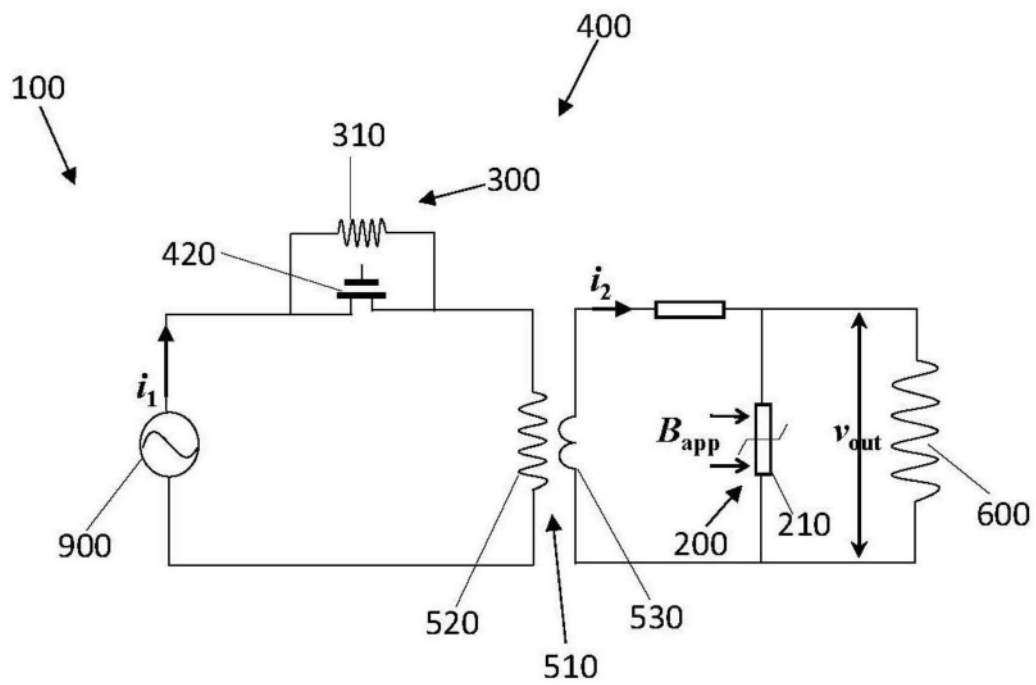


图19

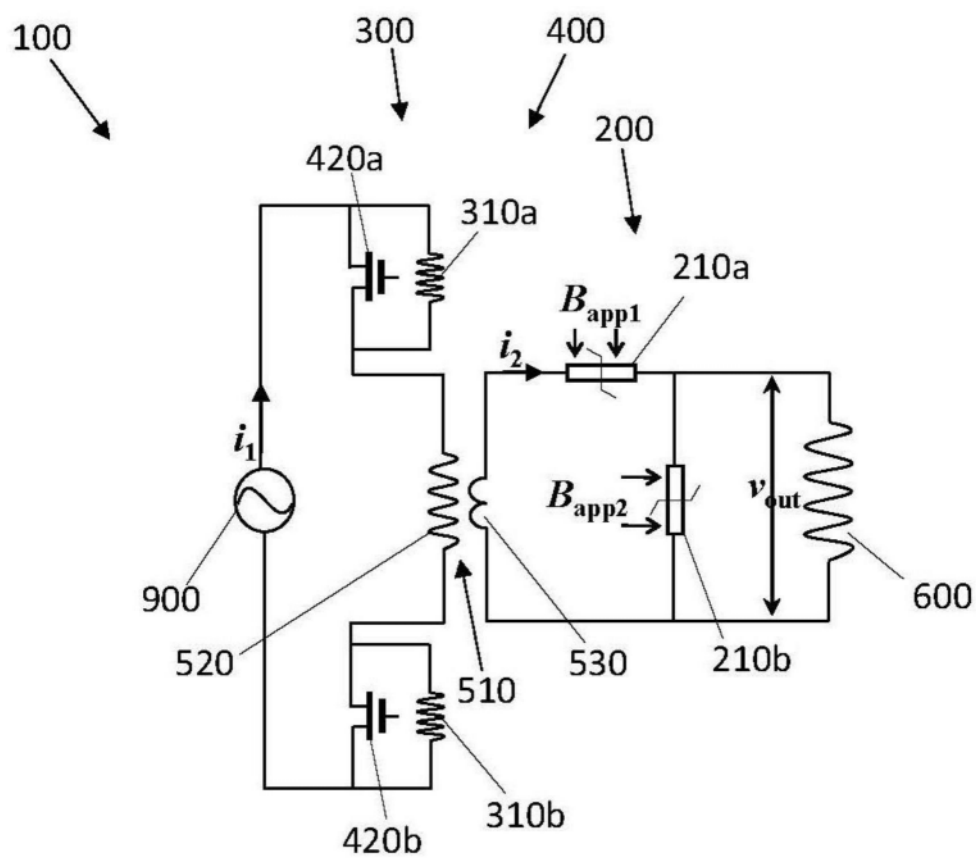


图20

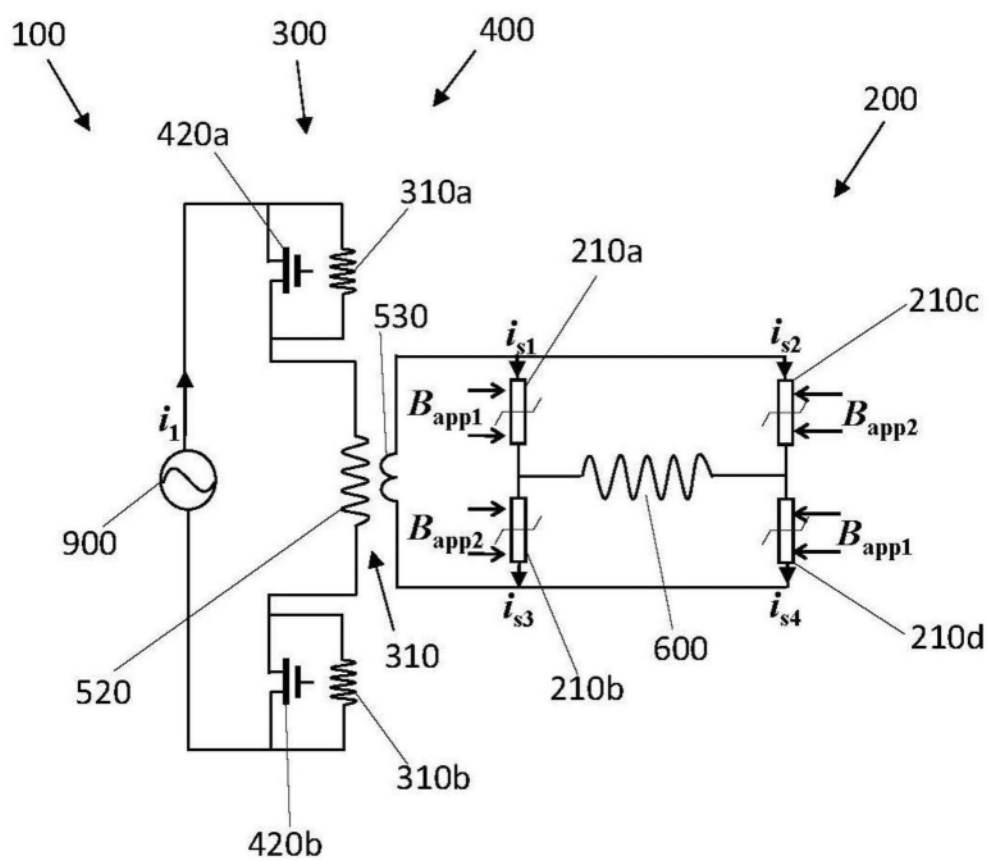


图21

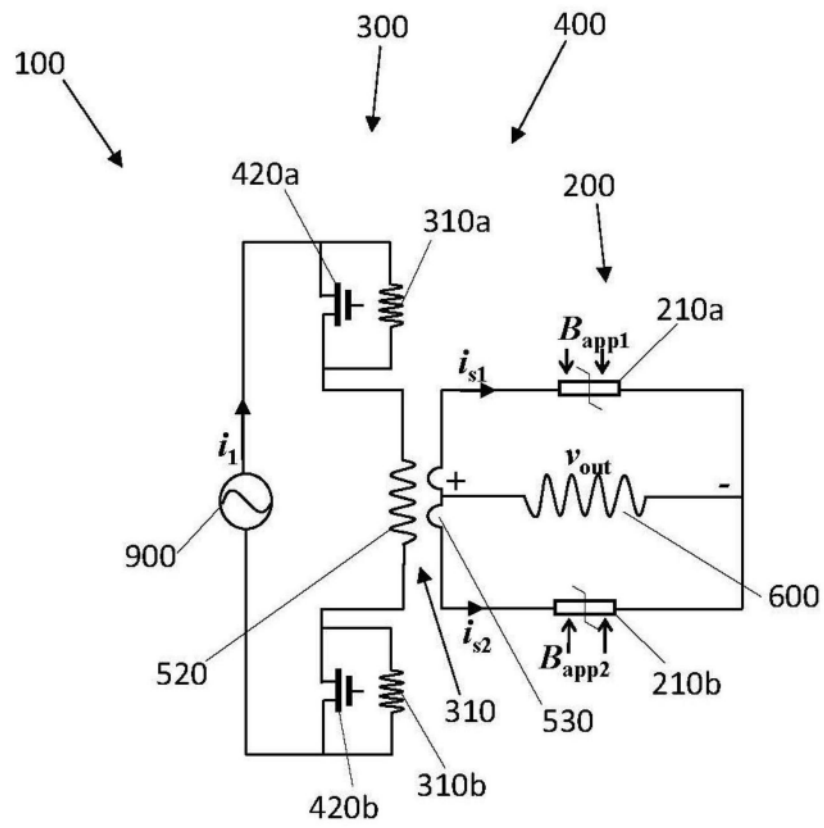


图22

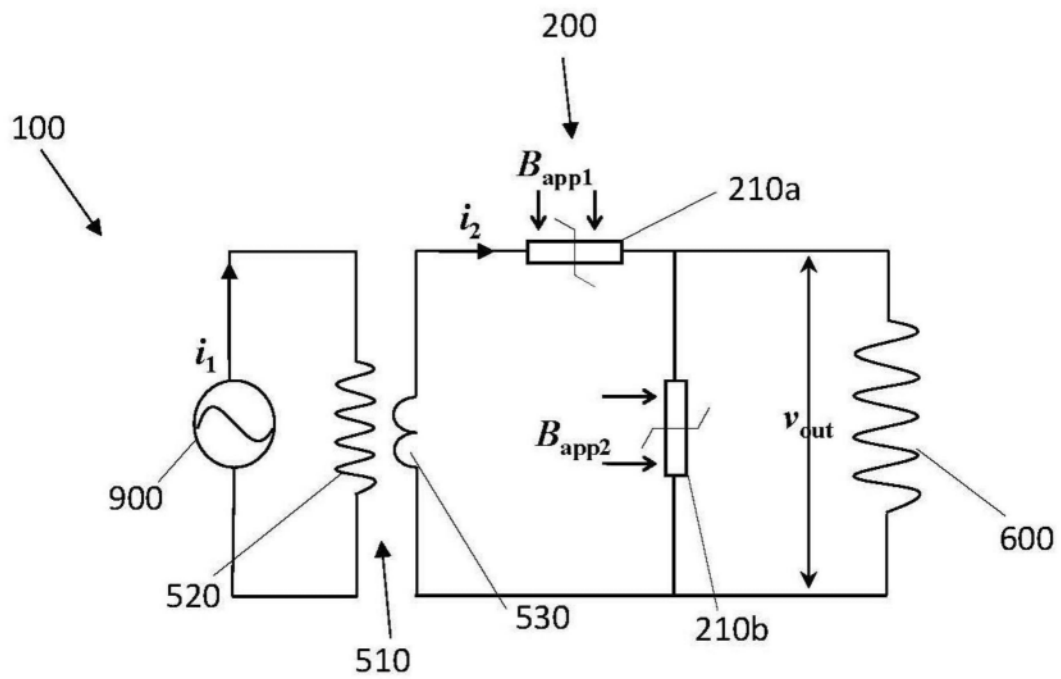


图23

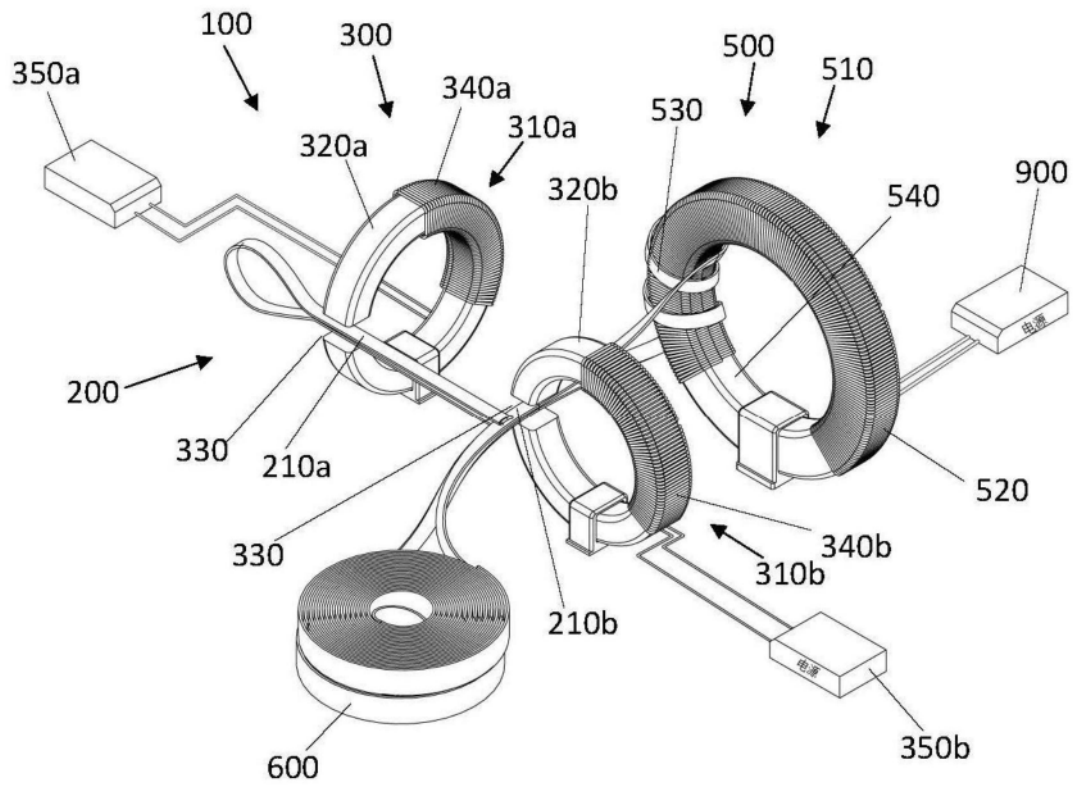


图24

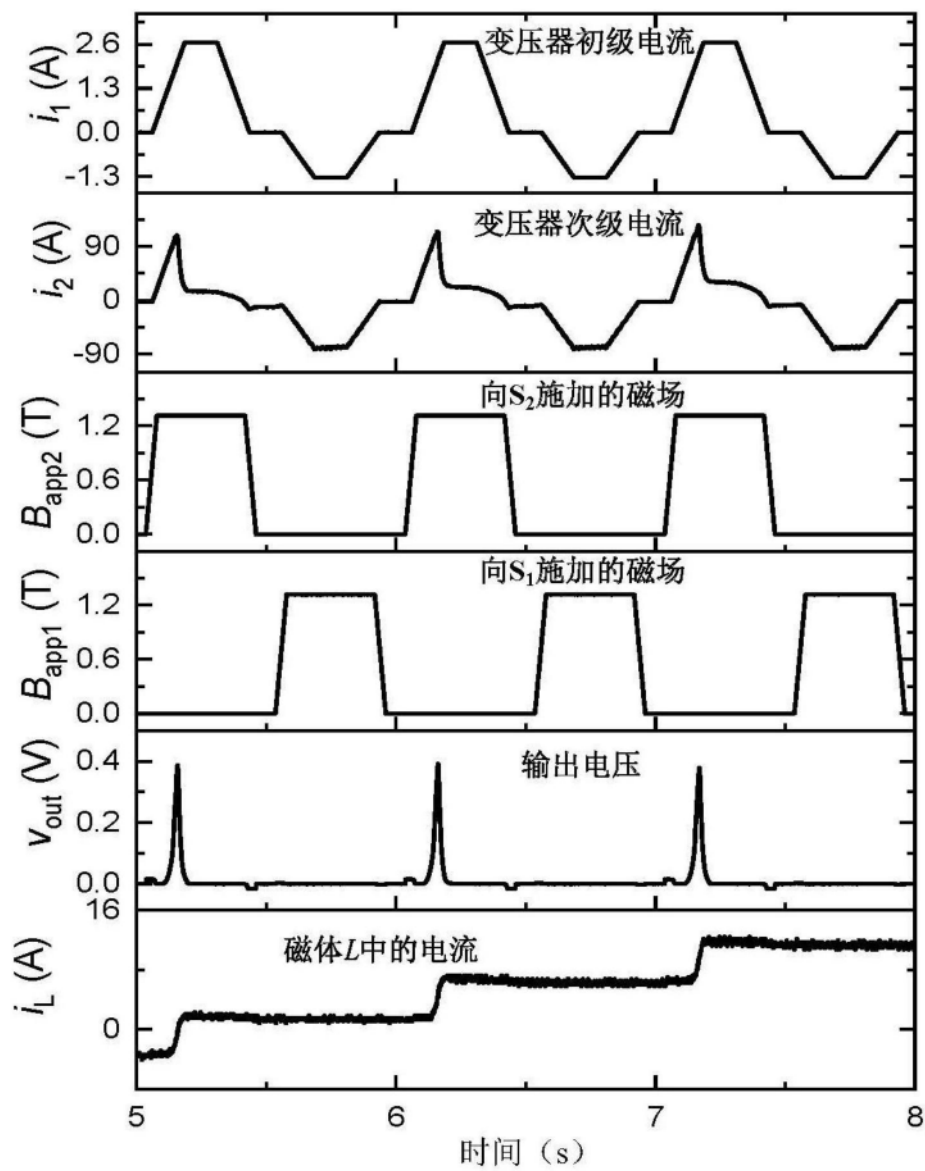


图25

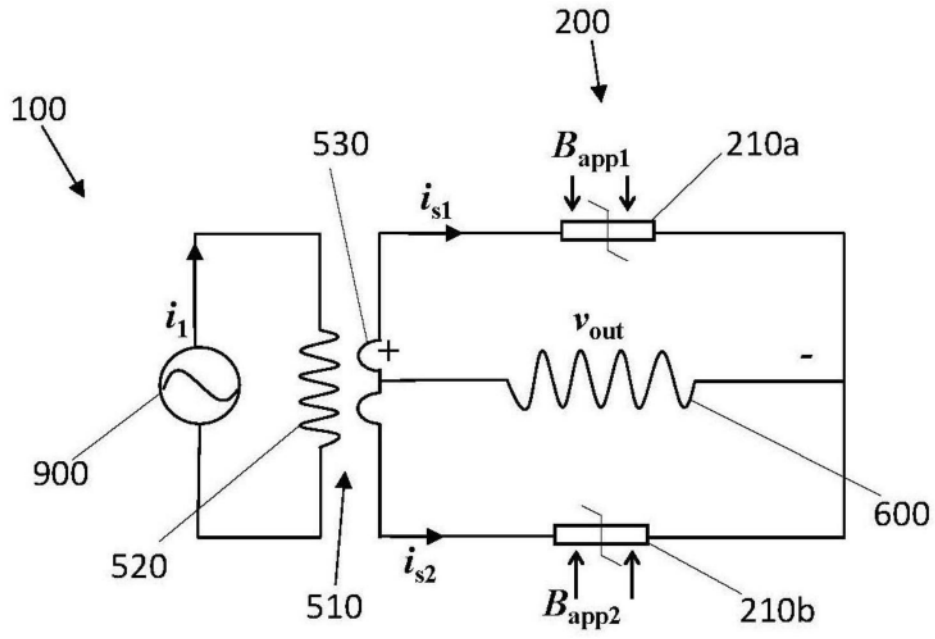


图26

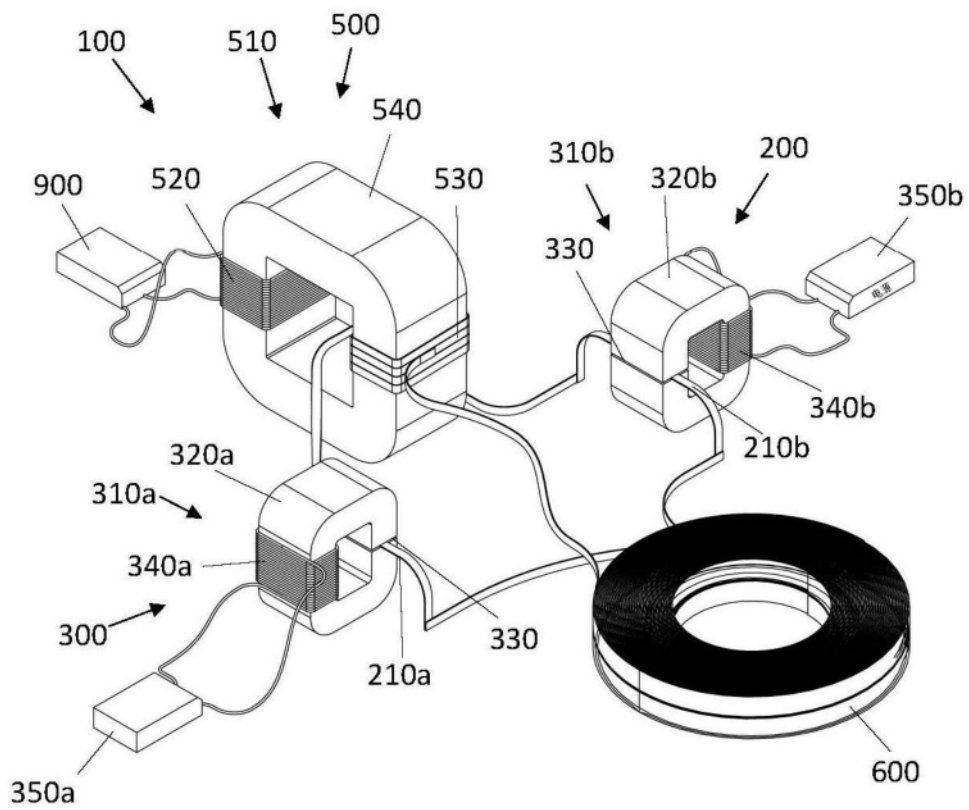


图27

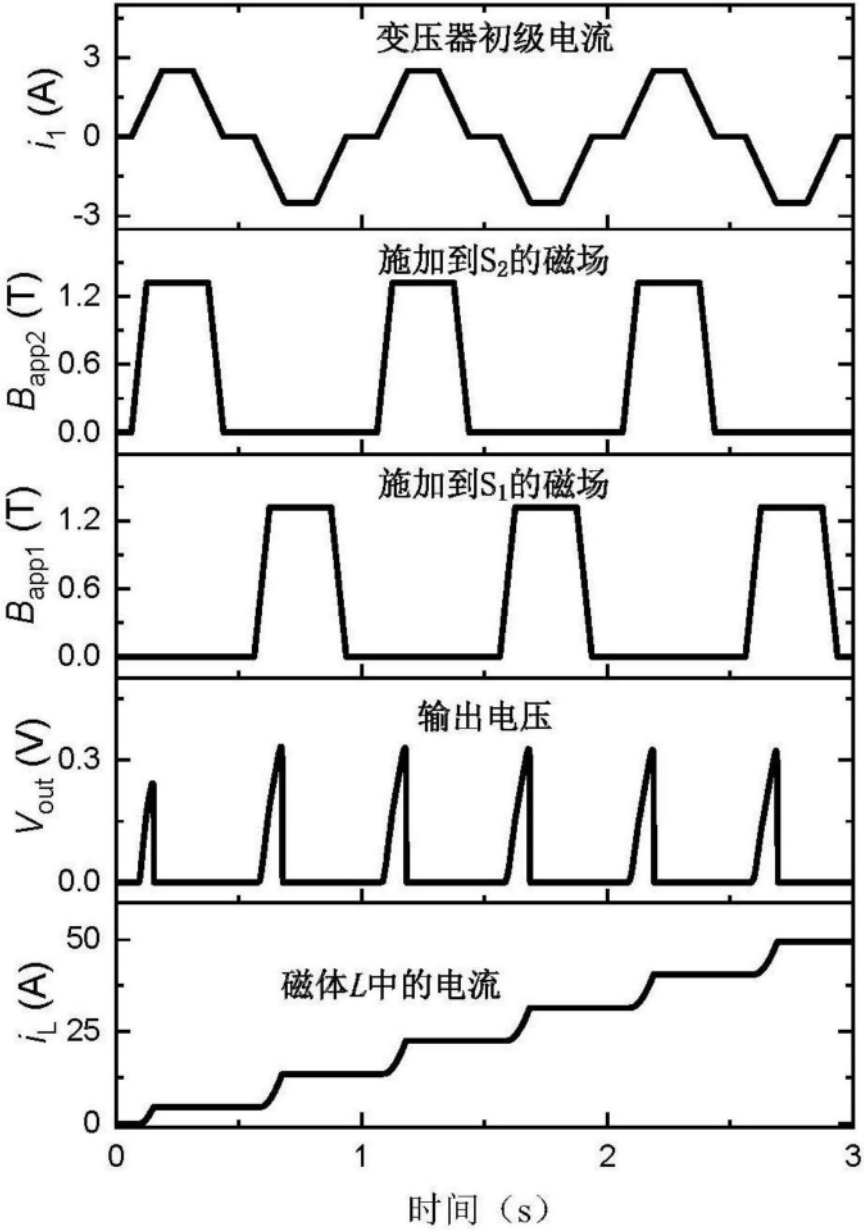


图28

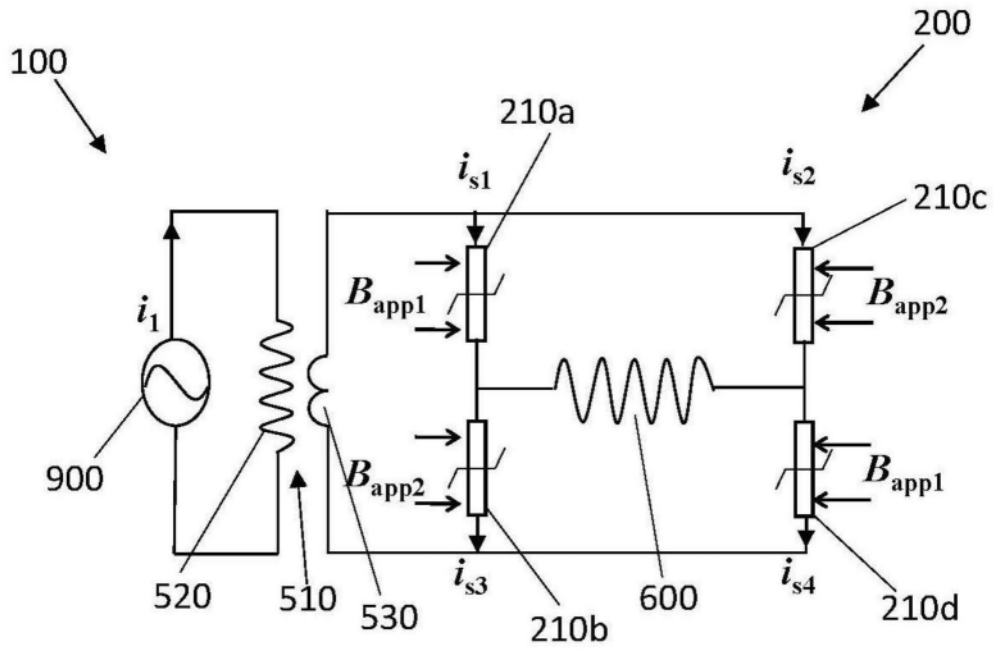


图29

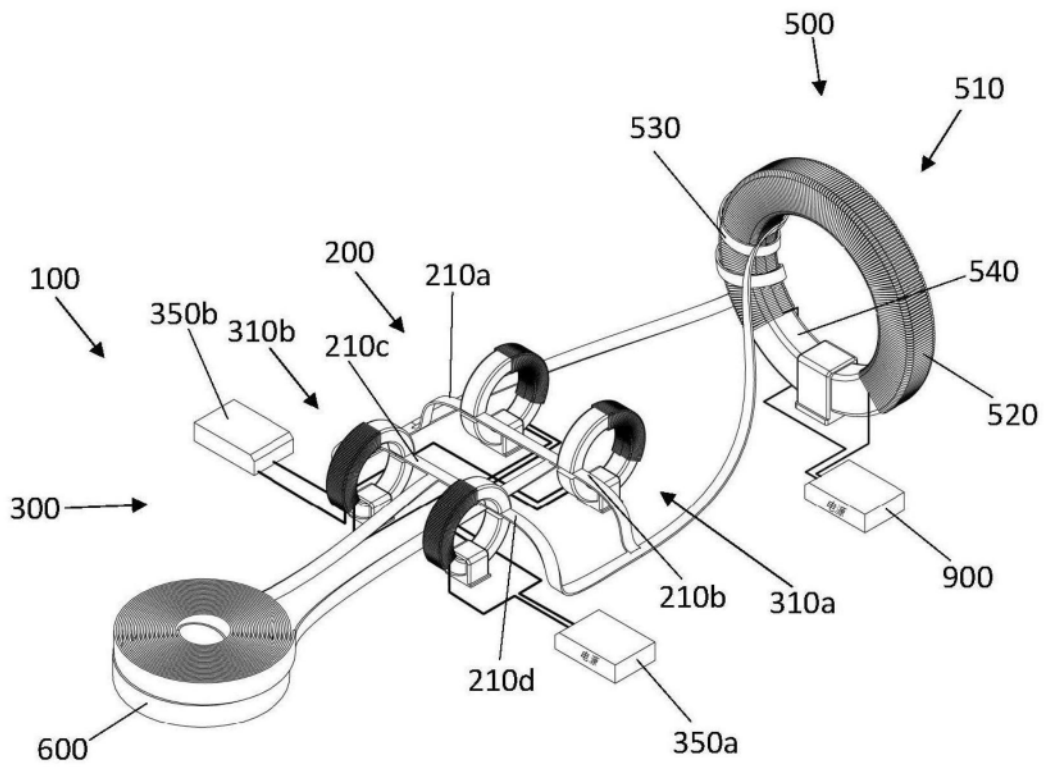


图30

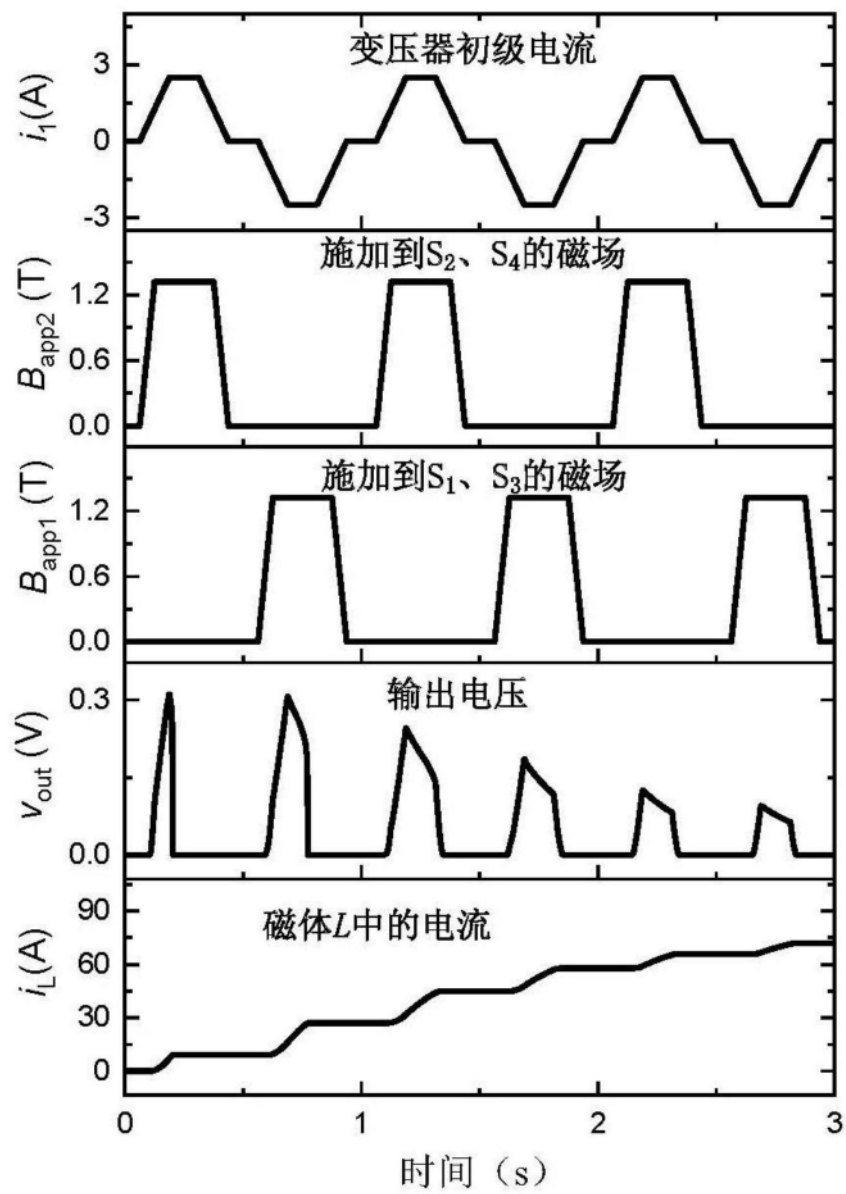


图31

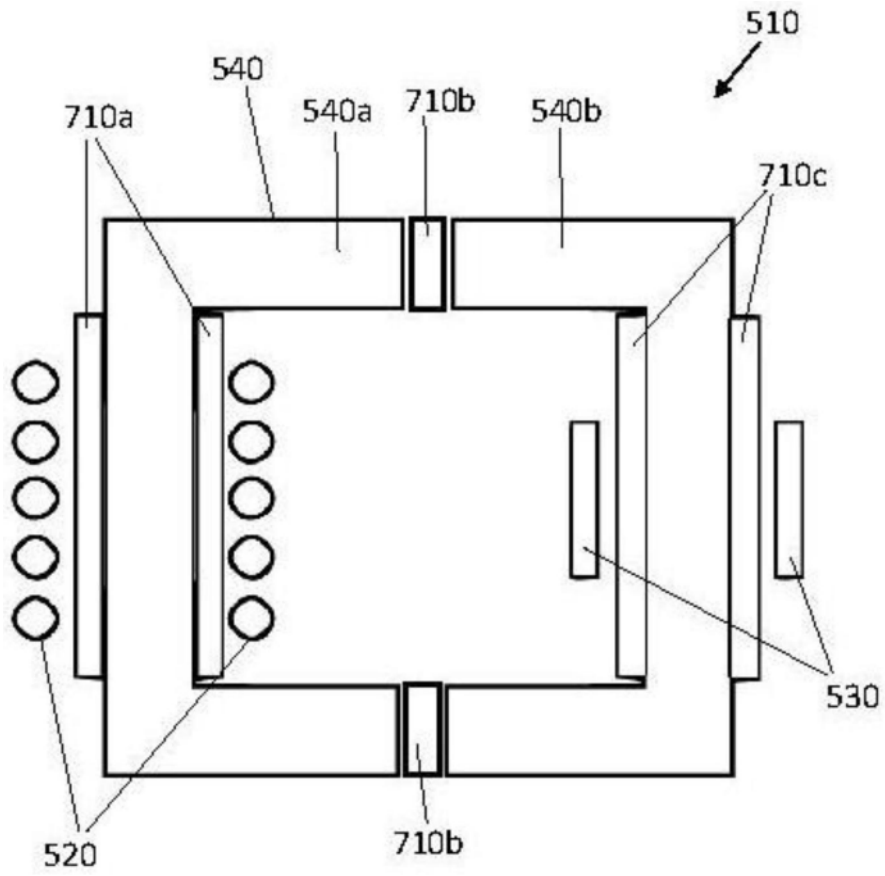


图32

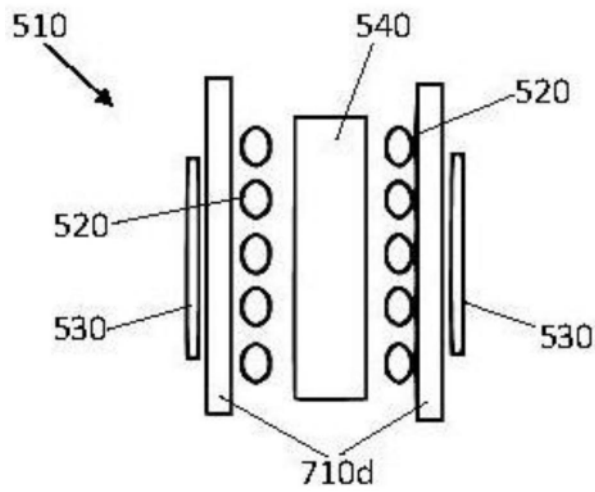


图33

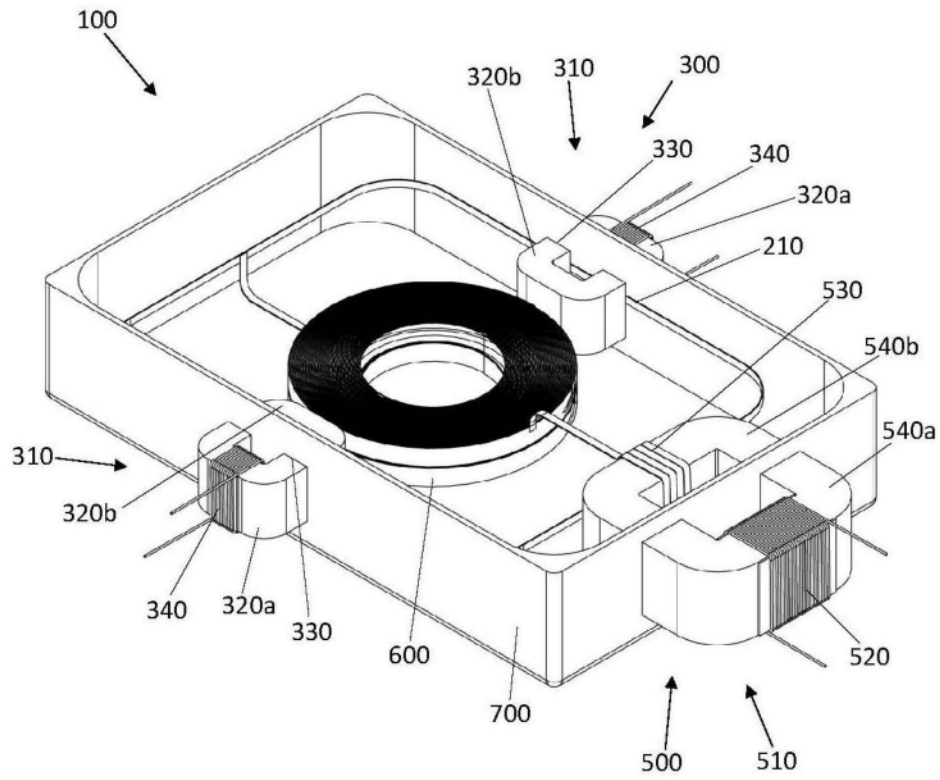


图34

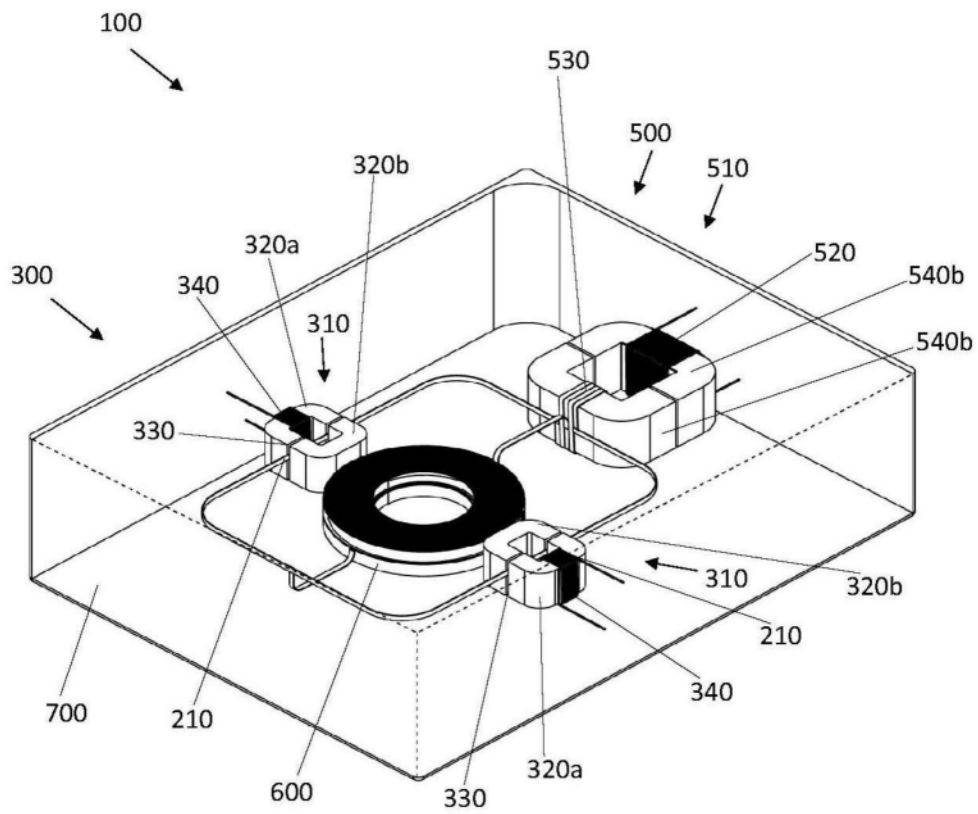


图35

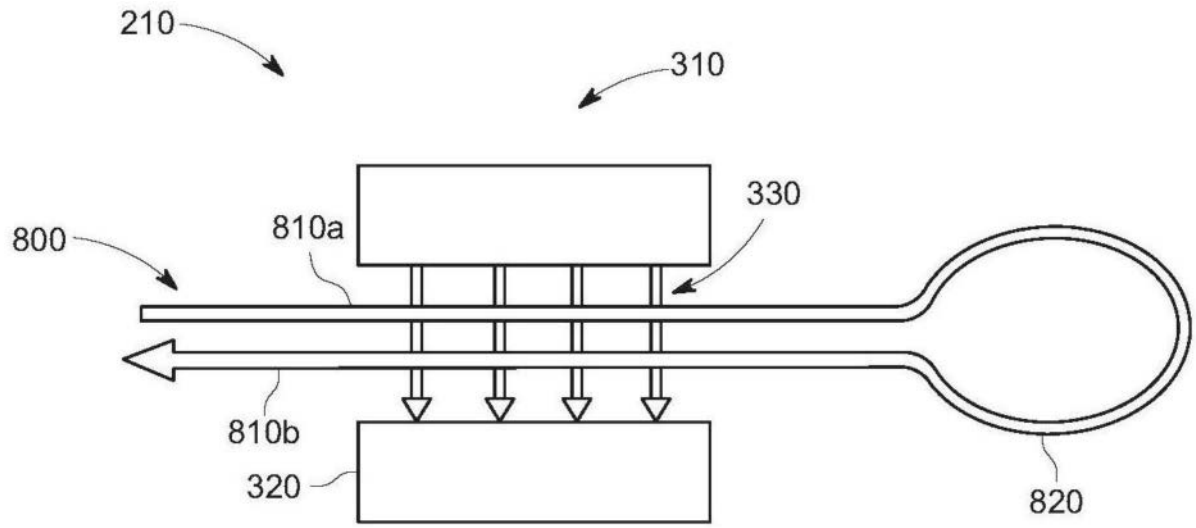


图36A

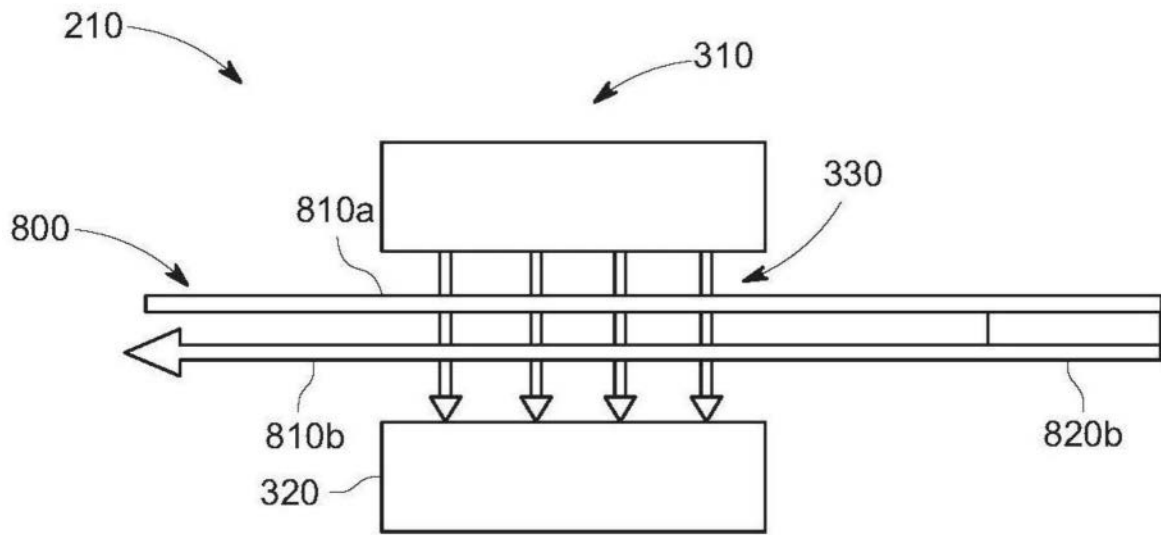


图36B

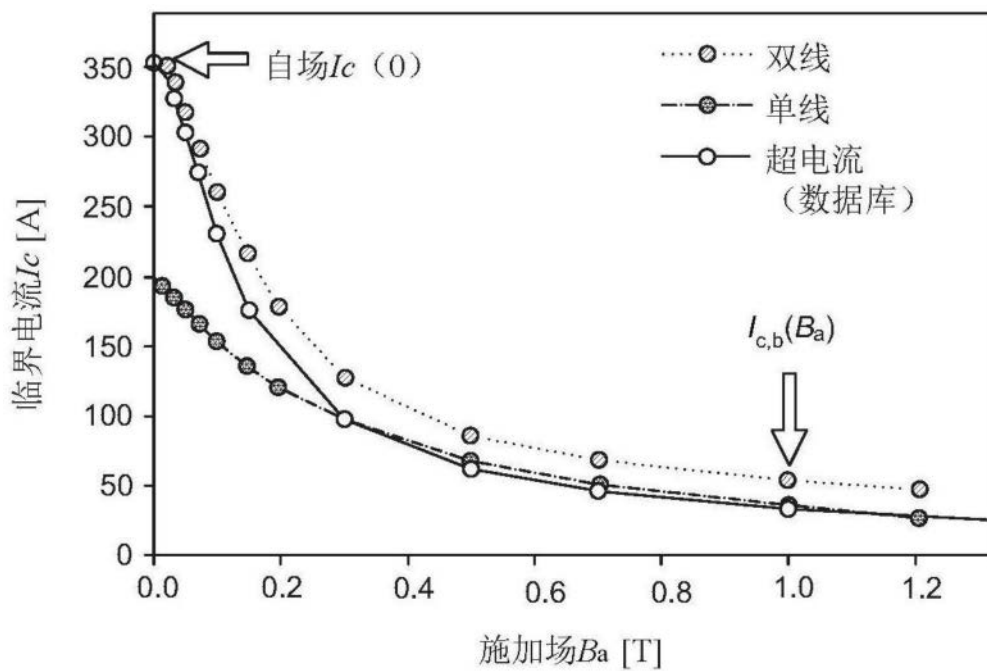


图37

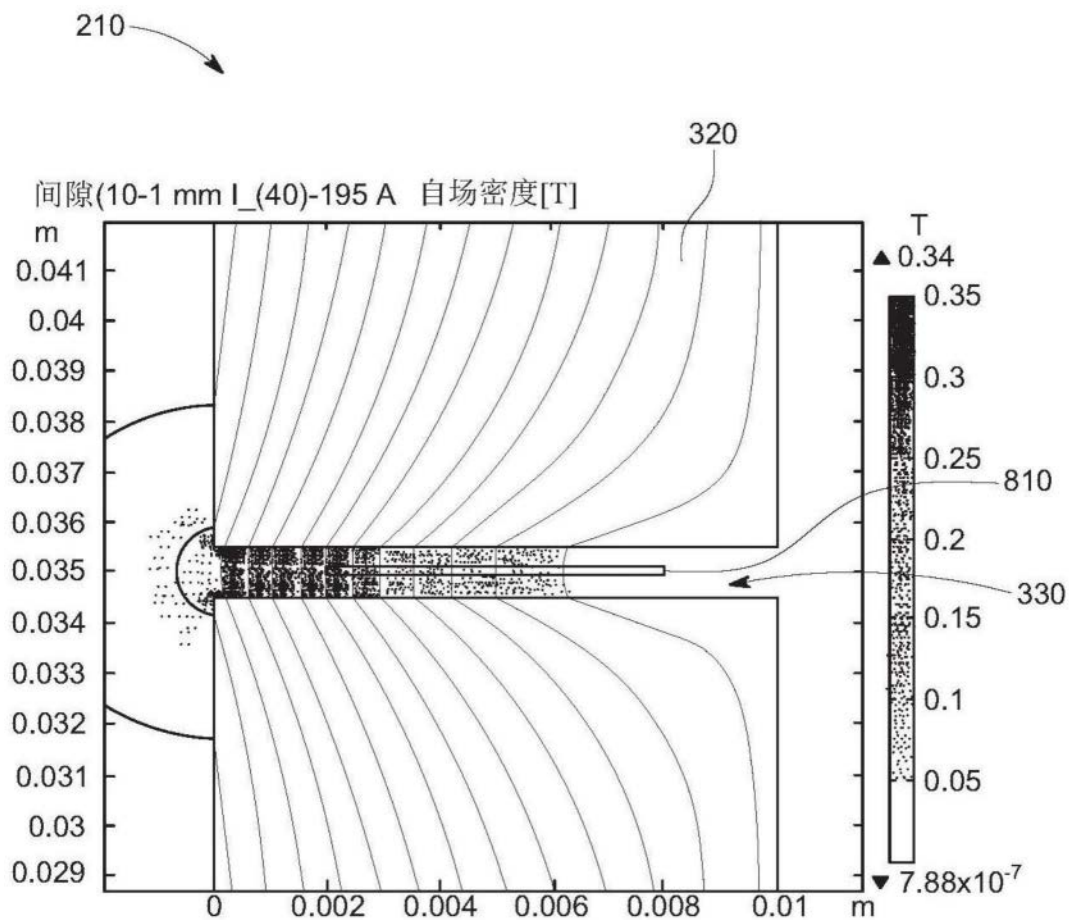


图38A

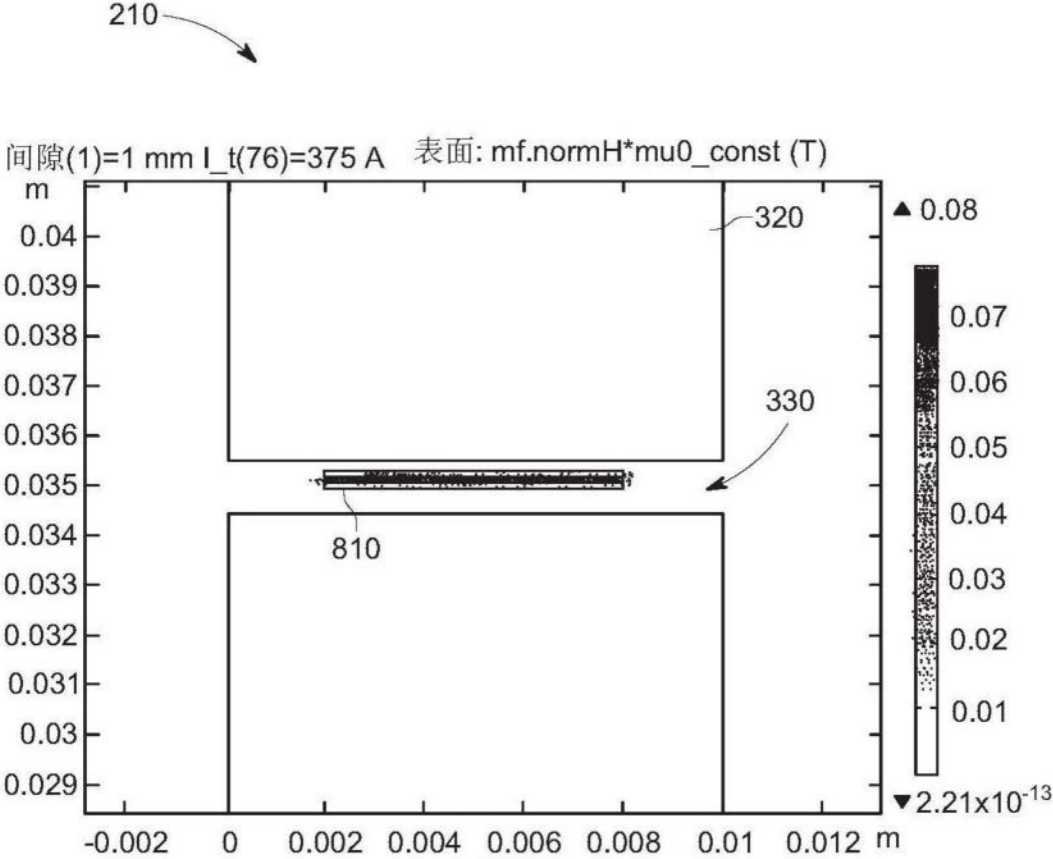


图38B