



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110352465 A

(43)申请公布日 2019. 10. 18

(21)申请号 201880010994.1

(22)申请日 2018.02.07

(30)优先权数据

1702134.6 2017.02.09 GB

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2019.08.08

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/GB2018/050337 2018.02.07

(87)PCT国际申请的公布数据

W02018/146464 EN 2018.08.16

(71)申请人 托卡马克能量有限公司

地址 英国牛津郡

(72)发明人 罗伯特·斯莱德

(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 倪斌

(51)Int.Cl.

H01F 6/00(2006.01)

H01F 6/04(2006.01)

H01F 6/06(2006.01)

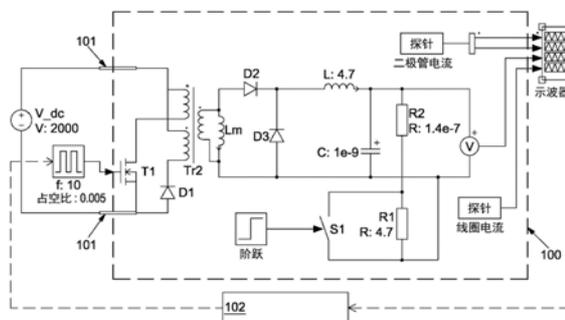
权利要求书3页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

低温磁体电源

(57)摘要

描述了一种磁体组件,包括超导线圈、低温系统、DC电压源、SMPS、电流引线以及控制器。低温系统包括低温恒温器,并且被配置为将超导线圈维持在低于超导体的临界温度的工作温度。DC电压是位于低温恒温器外部的源。SMPS位于低温恒温器内部,并且被配置为从DC电压源向超导线圈供应电力。SMPS包括具有初级绕组和次级绕组的降压变压器。电流引线将DC电压源连接至SMPS。控制器被配置为:使SMPS向磁体供应第一量的电力以便将磁体斜升至工作电流,并且在磁体的稳态工作期间向磁体供应第二量的电力,其中,第一量的电力大于第二量的电力。



1. 一种磁体组件,包括:
 - 超导线圈;
 - 低温系统,包括低温恒温器,并且被配置为将所述超导线圈维持在低于超导体的临界温度的工作温度;
 - DC电压源,位于所述低温恒温器外部;
 - 开关模式电源SMPS,位于所述低温恒温器内部,并且被配置为从所述DC电压源向所述超导线圈供应电力,所述SMPS包括具有初级绕组和次级绕组的降压变压器;
 - 电流引线,将所述DC电压源连接至所述SMPS;
 - 以及控制器,被配置为:使所述SMPS向磁体供应第一量的电力以便将所述磁体斜升至工作电流,并且在所述磁体的稳态工作期间向所述磁体供应第二量的电力,其中,所述第一量的电力大于所述第二量的电力。
2. 一种磁体组件,包括:
 - 超导线圈;
 - 低温系统,被配置为将所述超导线圈维持在低于超导体的临界温度的工作温度;
 - 处于室温的DC电压源;
 - 开关模式电源SMPS,被配置为在小于室温且大于或等于超导体的临界温度的温度下工作;
 - 第一电流引线,将所述DC电压源连接至所述SMPS;
 - 第二电流引线,将所述SMPS连接至磁体;
 - 以及控制器,被配置为:使所述SMPS向所述磁体供应第一量的电力以便将所述磁体斜升至工作电流,并且在所述磁体的稳态工作期间向所述磁体供应第二量的电力,其中,所述第一量的电力大于所述第二量的电力。
3. 根据任一前述权利要求所述的磁体组件,其中,所述变压器具有非隔离绕组。
4. 根据权利要求1或2所述的磁体组件,其中,所述变压器具有隔离绕组。
5. 根据任一前述权利要求所述的磁体组件,其中,所述变压器包括连结绕组的透磁材料的芯体。
6. 根据权利要求1至4中任一项所述的磁体组件,其中,所述变压器具有空心。
7. 一种磁体组件,包括:
 - 超导线圈;
 - 低温系统,包括低温恒温器,并且被配置为将所述超导线圈维持在低于所述超导线圈的临界温度的工作温度;
 - DC电压源,位于所述低温恒温器外部;
 - 开关模式电源SMPS,被配置为从所述DC电压源向所述超导线圈供应电力,所述SMPS包括具有初级绕组和次级绕组的降压变压器,其中,所述初级绕组位于所述低温恒温器外部并且所述次级绕组位于所述低温恒温器内部;
 - 将所述DC电压源连接至所述SMPS的电流引线;
 - 将所述次级绕组连接至磁体的电流引线;
 - 以及控制器,被配置为:使所述SMPS向所述磁体供应第一量的电力以便将所述磁体斜升至工作电流,并且在所述磁体的稳态工作期间向所述磁体供应第二量的电力,其中,所述

第一量的电力大于所述第二量的电力。

8. 根据权利要求7所述的磁体组件,其中,所述变压器是空心的并且是谐振变压器。

9. 根据权利要求7所述的磁体组件,其中,所述变压器包括连结绕组并且穿透所述低温恒温器的壁的透磁材料的芯体。

10. 根据权利要求9所述的磁体组件,其中,所述芯体由以下中的任一项制成:

铁;

无定形钢;以及

铁氧体。

11. 根据任一前述权利要求所述的磁体组件,其中,所述控制器被配置为:使所述SMPS在第一占空比上工作以便供应所述第一量的电力,并且在第二占空比上工作以便供应所述第二量的电力,其中,所述第一占空比大于所述第二占空比。

12. 根据任一前述权利要求所述的磁体组件,其中,所述控制器被配置为:使所述DC电压源向所述SMPS供应第一电压以便供应所述第一量的电力,并且向所述SMPS供应第二电压以便供应所述第二量的电力,其中,所述第一电压大于所述第二电压。

13. 根据任一前述权利要求所述的磁体组件,其中,所述超导线圈用作所述SMPS的储能电感器。

14. 根据任一前述权利要求所述的磁体组件,其中,至少所述变压器的所述次级绕组包括超导材料,并且冷却系统被配置为将所述超导材料维持在所述超导材料的临界温度或所述临界温度以下。

15. 根据权利要求14所述的磁体组件,其中,所述变压器的所述次级绕组包括HTS。

16. 根据任一前述权利要求所述的磁体组件,其中,所述SMPS具有以下中的一种的拓扑结构:

正向转换器;

推挽转换器;

半桥转换器;以及

全桥转换器。

17. 根据任一前述权利要求所述的磁体组件,其中,所述SMPS的开关速度小于或等于1kHz,更优选地小于或等于100Hz,更优选地小于或等于10Hz。

18. 根据任一前述权利要求所述的磁体组件,其中,所述控制器被配置为:监控所述超导线圈中的电流,并且当所述磁体处于稳态工作时调整向所述SMPS供应的所述第二量的电力,以便在所述超导线圈中维持基本上恒定的电流。

19. 根据任一前述权利要求所述的磁体组件,其中,所述超导线圈包括高温超导体HTS和低温超导体LTS中的一者或两者。

20. 一种向磁体组件的超导线圈提供电力的方法,所述方法包括:

提供开关模式电源SMPS,其中,所述SMPS包括具有初级绕组和次级绕组的变压器,并且所述次级绕组在所述磁体组件的低温恒温器内部;

通过经由所述SMPS从所述低温恒温器外部的DC电压源向线圈供应第一量的电力来激励磁体;以及

通过经由所述SMPS从所述DC电压源向所述线圈供应第二量的电力来维持所述磁体的

稳态工作；

其中,所述第一量的电力大于所述第二量的电力。

21. 根据权利要求20所述的方法,其中,所述SMPS在第一占空比上工作以便供应所述第一量的电力,并且在第二占空比上工作以便供应所述第二量的电力,并且所述第一占空比小于所述第二占空比。

22. 根据权利要求20或21所述的方法,其中,所述DC电压源提供第一电压以便供应所述第一量的电力,并且提供第二电压以便供应所述第二量的电力,其中,所述第一电压小于所述第二电压。

23. 根据权利要求20至22中任一项所述的方法,其中,所述初级绕组在所述低温恒温器外部。

24. 根据权利要求20至22中任一项所述的方法,其中,所述初级绕组在所述低温恒温器内部。

低温磁体电源

技术领域

[0001] 本发明涉及用于超导磁体的电源。

背景技术

[0002] 超导磁体是由超导材料的线圈制成的电磁体。因为电磁体线圈具有零电阻,所以超导磁体能够携带具有零损耗(但是会存在来自非超导组件的一些损耗)的大电流,并且因此能够实现比传统的电磁体损耗更低的强场。

[0003] 只在某些材料中并且只在低温下产生超导性。在由超导体的临界温度(材料在零施加磁场中为超导体的最高温度)和超导体的临界场(材料在0K下为超导体的最大磁场)定义的区域中,超导材料将表现为超导体。超导体的温度和存在的磁场在超导体没有变为电阻性(或“正常”,在本文用于表示“非超导的”)的情况下限制了能够由超导体携带的电流。存在两种类型的超导材料:I型超导体完全排除了磁通量穿透并且具有低的临界场,II型允许磁通量在局部的正常区域之内在下临界场之上穿透超导体,这被称为磁通漩涡(flux vortice)。这两种类型的超导材料在上临界场处不再是超导的。该特征使它们能够用作用于构造超导磁体的线。已经做出了大量的努力来将磁通漩涡位置固定(pin)至原子晶格,这提高了较高磁场和温度下的临界电流。

[0004] 概括的说,存在两种类别的II型超导体。低温超导体(LTS)的临界温度通常低于20K(没有外部磁场),而高温超导体(HTS)的临界温度通常高于40K。许多现有HTS材料的临界温度高于77K,这允许使用液氮进行制冷。然而,本领域技术人员将了解,LTS和HTS通过临界温度之外的准则来区分,且HTS和LTS是本领域中用于材料的某些种类的术语。通常(但是非排除性地),HTS材料是陶瓷,而LTS材料是金属。

[0005] HTS磁体的一种应用是在托卡马克(tokamak)聚变反应器中。托卡马克以强环形磁场、高等离子体电流以及通常大的等离子体体积及大量的辅助加热的组合为特征,以提供热稳定等离子体,使得可以发生聚变。需要辅助加热(例如,经由数十兆瓦的高能量H、D或T的中性束注入)来将温度增加至发生核聚变所需的足够高的值,和/或来维持等离子体电流。

[0006] 为了获得经济的发电(即,远多于电力输入的电力输出)所需的聚变反应,传统的托卡马克必须是巨大的,使得能量约束时间(其大致与等离子体体积成比例)可以足够大,从而等离子体可以足够热以使热聚变发生。

[0007] W02013/030554描述了备选方法,涉及用作中子源或能量源的紧凑球形托卡马克的使用。球形托卡马克中的低纵横比等离子体形状改进了粒子约束时间,并且允许小得多的机器中的净发电。然而,小直径的中心柱却是必需品,这对等离子体约束磁体的设计提出了挑战。

[0008] HTS对托卡马克的主要吸引力是HTS在强磁场中携带大电流的能力。这在紧凑球形托卡马克(ST)中是特别重要的,其中中心柱的表面上的磁通量强度将超过20T。次要的优点是HTS在比LTS更高的温度(例如,约20K)下在高磁场中携带大电流的能力。这实现了更薄的

中子屏蔽的使用,从而导致中心柱的更高的中子加热,这将排除使用液氮的操作(即,在4.2K或以下)。这进而实现了具有小于大约2m(例如,将考虑大约1.4m)的主等离子体半径的球形托卡马克的设计;这种设备将使其几个百分点的电力输出再循环用于低温制冷。

[0009] 然而,这种磁体远大于之前使用HTS材料设计的磁体。迄今为止,即使用于相对小的托卡马克的环形场(TF)磁体也将是目前构造的最大的HTS磁体,并且即使是根据LTS标准也表示具有很高的存储能量的大型磁体。

[0010] 给这种磁体提供能量提出了重大的技术挑战。大型HTS磁体中的传输电流可以是50-150kA。即使是匝数更大的磁体(并且因此具有更低的电流、但是具有更大的电感)也仍然可能具有超过20kA的传输电流。必须从低温恒温器的外部引入该电流。在已知的磁体中,这通常通过使用穿过低温恒温器的电流引线来完成-但是对于如此大的电流,所需要的电流引线的尺寸导致它们是非常笨重且昂贵的。在需要把电流从室温下的电源路由至几开尔文或甚至几十开尔文的温度下的磁体时尤其如此。

[0011] 因此,本发明的目的是减小电流引线的尺寸及其相关联的成本、复杂度和泄露到磁体的低温环境的热量。

[0012] 期望的是制造每匝中带有可拆卸接头的超导磁体,以便于在暴露于中子辐射之后易于修理、维护和替换线圈分段。这些接头将具有小的电阻(纳欧数量级)。带有电阻性接头的超导磁体在工作时将消耗少量的电力-在几千瓦的数量级。因此,任何电源都必须能够长期地向磁体供应该电力。然而,使用这种低电力来提升具有约2GJ的所存储的能量的HTS磁体将花费数周,所以期望的是能够输送低电力和高电力这二者的电源。

发明内容

[0013] 根据本发明的第一方面,提供了一种磁体组件。该磁体组件包括超导线圈、低温系统、DC电压源、开关模式电源(SMPS)、电流引线以及控制器。低温系统包括被配置为将超导线圈维持在低于超导体的临界温度的工作温度的热隔离的低温恒温器和冷却电源。DC电压是位于低温恒温器外部的源。SMPS位于低温恒温器内部,被冷却至与磁体相同(或接近相同)的温度并且被配置为从DC电压源向超导线圈供应电力。SMPS包括具有初级绕组和次级绕组的降压变压器。电流引线将DC电压源连接至SMPS。控制器被配置为:使SMPS向磁体供应第一量的电力以便将磁体斜升至工作电流,并且在磁体的稳态工作期间向磁体供应第二量的电力,其中,第一量的电力大于第二量的电力。

[0014] 根据本发明的第二方面,提供了一种磁体组件。该磁体组件包括超导线圈、低温系统、DC电压源、SMPS、电流引线以及控制器。低温系统被配置为将超导线圈维持在低于超导体的临界温度的工作温度。DC电压源处于室温。SMPS被配置为在小于室温且大于或等于超导体的临界温度的温度下工作。第一组电流引线将DC电压源连接至SMPS,并且第二组电流引线将SMPS连接至磁体。每组引线都支持温度梯度。控制器被配置为:使SMPS向磁体供应第一量的电力以便将磁体斜升至工作电流,并且在磁体的稳态工作期间向磁体供应第二量的电力,其中,第一量的电力大于第二量的电力。

[0015] 根据本发明的第三方面,提供了一种磁体组件。该磁体组件包括超导线圈、低温系统、DC电压源、SMPS、电流引线以及控制器。低温系统包括低温恒温器,并且被配置为将超导线圈维持在低于超导体的临界温度的工作温度。DC电压源处于室温。SMPS被配置为从DC电

压源向超导线圈供应电力。SMPS包括具有初级绕组和次级绕组的降压变压器,其中,初级绕组位于低温恒温器外部而次级绕组位于低温恒温器内部。电流引线将次级绕组连接至磁体。控制器被配置为:使SMPS向磁体供应第一量的电力以便将磁体斜升至工作电流,并且在磁体的稳态工作期间向磁体供应第二量的电力,其中,第一量的电力大于第二量的电力。

[0016] 根据本发明的第四方面,提供了一种向磁体组件的超导线圈提供电力的方法。提供了SMPS,其中,该SMPS包括具有初级绕组和次级绕组的变压器,并且次级绕组在磁体组件的低温恒温器内部。通过经由SMPS从低温恒温器外部的DC电压源向线圈供应第一量的电力来使磁体上电(power up)。通过经由SMPS从DC电压源向线圈供应第二量的电力来维持磁体的稳态工作。第一量的电力大于第二量的电力。

[0017] 超导线圈可以包括高温超导体(HTS)材料。

[0018] 在权利要求2及以下权利要求中呈现了另外的实施例。

附图说明

[0019] 图1是根据实施例的电源的示意图;

[0020] 图2A至图2D示出了示例性SMPS拓扑结构;以及

[0021] 图3和图4是图1的电源的特性的曲线图;

[0022] 图5是根据另外的实施例的电源的示意图;

[0023] 图6示出了图5的电源的特性的曲线图。

具体实施方式

[0024] 下文提出的系统不是试图通过低温恒温器供应完整的磁体传输电流,而是向位于低温恒温器之内的开关模式电源(SMPS)供应低的多的电流(在更高的电压下),其中SMAP包括随后向磁体供应所需的高传输电流的降压变压器和整流器。磁体自身是包括HTS、LTS或二者的组合的超导磁体。因为连接低温恒温器外部的DC电源的电阻性电流引线需要携带较低的电流,所以可以在直径上减小该电流引线,从而降低与电流引线自身以及与移除由电流引线引入的热泄露所需的低温系统相关联的成本。从SMPS至磁体的电流引线将是冷的,并且由超导体制成。

[0025] 各种SMPS拓扑结构都适用于这种应用。合适的SMPS必须包括具有大的降压比的变压器。虽然通常将这种SMPS拓扑结构称作“隔离的”,但是所述变压器可以是具有隔离绕组或非隔离绕组(例如,具有公用接地)的变压器。期望的是变压器的初级绕组和次级绕组之间具有高的磁通耦合系数。SMPS通常包括作为储能器件的一个或多个电感器(在该实施例中,磁体自身是电感器)、由外部门信号控制的有源开关(通常被实现为固态开关/晶体管(例如,MOSFET或IGBT)或固态开关的阵列)以及用于对输出电流进行整流的一个或多个无源开关(通常采用二极管的形式)。可以用有源开关(例如,MOSFET或IGBT)来替换二极管。

[0026] 如在图1中示意性地示出的,一种可能是使用正向转换器,但是要了解的是,仅仅以示例方式描述了这种拓扑结构,并且下文的设计考虑因素将适用于任意合适的拓扑结构。在图1中,分界线100表示低温恒温器-在该分界线100之内的任何部件都位于77K或更低温度的低温环境中。只有DC电源 V_{dc} 位于低温恒温器外部,并且通过电流引线101将DC电源 V_{dc} 连接至SMPS。电阻R2只是磁体的电阻。在理想磁体中,电阻将是零,但是在具有超导分

段之间的接头或其它轻微电阻性特征件的磁体中,该电阻可能在几百纳欧的数量级上。电感L通常是SMPS的独立的部件,但是在这种情况下可以使用磁体自身的电感。类似地,电容C可以只是磁体的自电容。电阻R1和开关S1模拟用于磁体的有源“失超保护”系统,其通过在检测到磁体中的局部失超的情况下断开开关S1来将磁体的存储能量转移到电阻性负载R1中。可以用超导体-优选地用HTS(即使磁体自身是LTS-因为SMPS可能处于较高的温度)制造低温恒温器之内的变压器Tr2的次级绕组和连接线。初级绕组可以是超导体或铜。SMPS包括控制开关T1的占空比的控制器102,如将在下文中更详细地描述的。在图1中将控制器示出为在低温恒温器外部,但是其可以位于低温恒温器之内。

[0027] 图1包括表示与向托卡马克提供环形场的超导磁体一起使用的示例性系统的特性的图。将理解的是,这些图仅针对实施例以示例的方式被提供,而不应被视为限制性的。

[0028] 在图2A至图2D中示出了其它示例性SMPS拓扑结构。图2A示出了双开关正向转换器201。图2B示出了推挽转换器202。图2C示出了半桥转换器203。图2D示出了谐振LLC转换器204。在图2B和图2C中,电感器L 221、231可以是磁体自身。在图2D中,磁体将是负载的一部分(因为所示的谐振LLC转换器不在次级侧上使用电感器)。图2B、图2C和图2D示出了开关222、232、242,但是可以使用晶体管或等效的固态部件来替换这些开关。也可以使用包括晶体管在内的其它SMPS拓扑结构。

[0029] 预期的是各种SMPS部件在低温温度下工作。低温开关(例如,通过有意地使超导体的分段失超而发挥作用的超导开关)是众所周知的,但是是缓慢且笨重的。已经表明半导体部件(即,图1的二极管D1至二极管D3以及开关T1、晶体管或更可能的晶体管阵列)在低至20K的低温温度下工作良好-实际上,它们通常具有比在室温下更好的性能,并且因此是用于低温PSU的优选选项。

[0030] 变压器Tr2按照与典型的正向转换器相同的方式工作,但是可能的是,可以用超导体(优选地用HTS)来制作两个绕组或至少制作次级绕组,以最小化电阻性损耗。可以通过使用低开关频率来最小化AC损耗。在传统的SMPS中,开关频率将介于20kHz和500kHz之间,以允许使用小的电感器。因为在这种情况下电感器是高供电超导磁体,其电感为几亨利(例如,对于28kA下的每个线圈具有72匝的1.4m的大半径的TF磁体约为4.7H),所以工作频率可以小得多,例如,小于或等于1kHz、小于或等于100Hz、或小于或等于10Hz。可以选择开关频率,以最小化超导变压器和磁体中的总的AC功率损耗以及变压器的芯体中的涡流和磁滞损耗。然而,低的频率将需要更大的芯体,以使变压器有效地工作。

[0031] 变压器的合适的线圈比率将依赖于由DC电源V_{dc}提供的输入电压。为了接近变压器的100%的磁通匝连数(flux linkage),初级绕组和次级绕组可以被共同缠绕。可以用具有高透磁率的材料(例如,铁或铁氧体)来链结绕组。使用这种材料将需要对变压器屏蔽磁体的杂散场,但是在托卡马克等离子体约束磁体的情况下,这很简单,因为环形几何结构本质上是自屏蔽的并且在磁体的外部生成非常小的磁场。然而,对于聚合托卡马克中也所需要的极向线圈却不是这种情况。如果使用了芯体,则对材料的适当的选择将依赖于对开关频率的选择。由于涡流损耗的减少,相对于铁,使用铁氧体可能有益于更高的开关频率(例如,>1kHz)。备选地,变压器可以是“空心的”,即,没有实芯。

[0032] 作为提供穿过低温恒温器的电流引线的备选方案,SMPS的变压器可以被布置为使得初级绕组(连接至DC电压源V_{dc})位于低温恒温器外部,而次级绕组(连接至磁体)位于低

温恒温器内部。然后,在初级侧上的所有SMPS部件(例如,正向转换器的开关T1)将位于低温恒温器外部,而在次级侧上的所有SMPS部件将位于低温恒温器内部。变压器可以是空心的,这将导致由于SMPS引起的流经低温恒温器的附加热量可忽略不计,但是变压器将由于低磁通耦合而具有差的电力传输。可以通过使用谐振变压器(即,使用了谐振电感耦合的变压器)来改善差的电力传输,如本领域已知的,例如,https://en.wikipedia.org/wiki/Resonant_inductive_coupling。备选地,变压器可以具有穿过低温恒温器的壁的实芯(如上文所述)。

[0033] 图3和图4示出了对图1中所示的电路进行仿真的各种结果,其中DC输入电流为2kV、变压器中的匝数比为25:1,开关频率为10Hz,并且在斜升期间占空比为50%(图3)并且在稳态工作期间占空比为0.5%(图4在 $t < 50$ 时)。这些曲线图示出了:

[0034] • 晶体管T1和二极管D1中的每一个中的(即,通过变压器Tr2的每个输入线圈的)电流301、401;

[0035] • 二极管D2和二极管D3中的每一个中的(即,通过变压器Tr2的输出线圈的)电流302、402;

[0036] • 磁体线圈中的电流303、403和磁体线圈两端的电压304、404

[0037] 所有这些值仅作为示例来使用。图3示出了斜升期间的磁体。开关的每个脉冲(以大约8A/s的速率)来增大磁体中的电流。因为电阻R2如此之小,所以在开关T1断开时磁体电流只存在可忽略的衰减。

[0038] 图4示出了在时间 $t = 50$ 时发生的失超期间的磁体。

[0039] 图5示出了用于另外的仿真的电路,在图6中示出了该另外的仿真的结果。图5中的SMPS具有全桥转换器拓扑结构。如上文所述,电感L是超导磁体线圈,R2是接头电阻器,而次级侧上的电容501、502是磁体部件的固有电容。图6示出了变压器Tr3的初级线圈中的电流601、磁体中的电流602以及二极管D1和D2中的电流603、604,其与变压器Tr2的各个次级中的电流相对应。要注意,在图6中,通过磁体的电流是负的-因此向下的斜线指示电流的增加。

[0040] 一旦获得了期望的电流,就降低占空比以维持期望的电流-这可以通过由控制器使用反馈环路来实现,从而监控磁体中的电流并对应地调整占空比(即,如果电流下降则增加占空比,而如果电流上升至期望值之上则减小占空比)。

[0041] 用于控制输送给负载的电力的备选方案是改变由DC电压源V_{dc}供应的电压,同时保持占空比相同。作为另外的备选方案,可以一起改变由V_{dc}供应的电压和占空比,以控制所输送的总的电力。

[0042] 如果在磁体的任何部分中检测到失超,则通过断开开关S1来切入电阻R1,并且磁体中的电流快速衰减,从而限制了失超区域中的危险的加热。在该模型中,没有停用电源,但是在实际中,当检测到失超时可以停用电源。

[0043] 在上文中使用了术语“低温恒温器”,以表示在其中维持低温温度的隔离的腔室-通常为真空容器。当在上文中将SMPS描述为“在低温恒温器之内”时,这可以表示在与磁体线圈相同的真空容器之内,或者在相连的真空容器之内。作为备选方案,SMPS可以被放置在被冷却至介于室温和磁体线圈的温度的温度的独立低温恒温器之内,或者被放置在这种温度下的磁体低温恒温器之内的某一位置中。当SMPS包括超导(HTS或LTS)部件时,必须

将这些部件冷却至超导体的临界温度之下。

[0044] 虽然围绕聚合反应器呈现了本发明的背景,但是技术人员将了解,本发明适用于包括超导线圈的任何磁体,例如,MRI磁体或适合于储能的磁体。

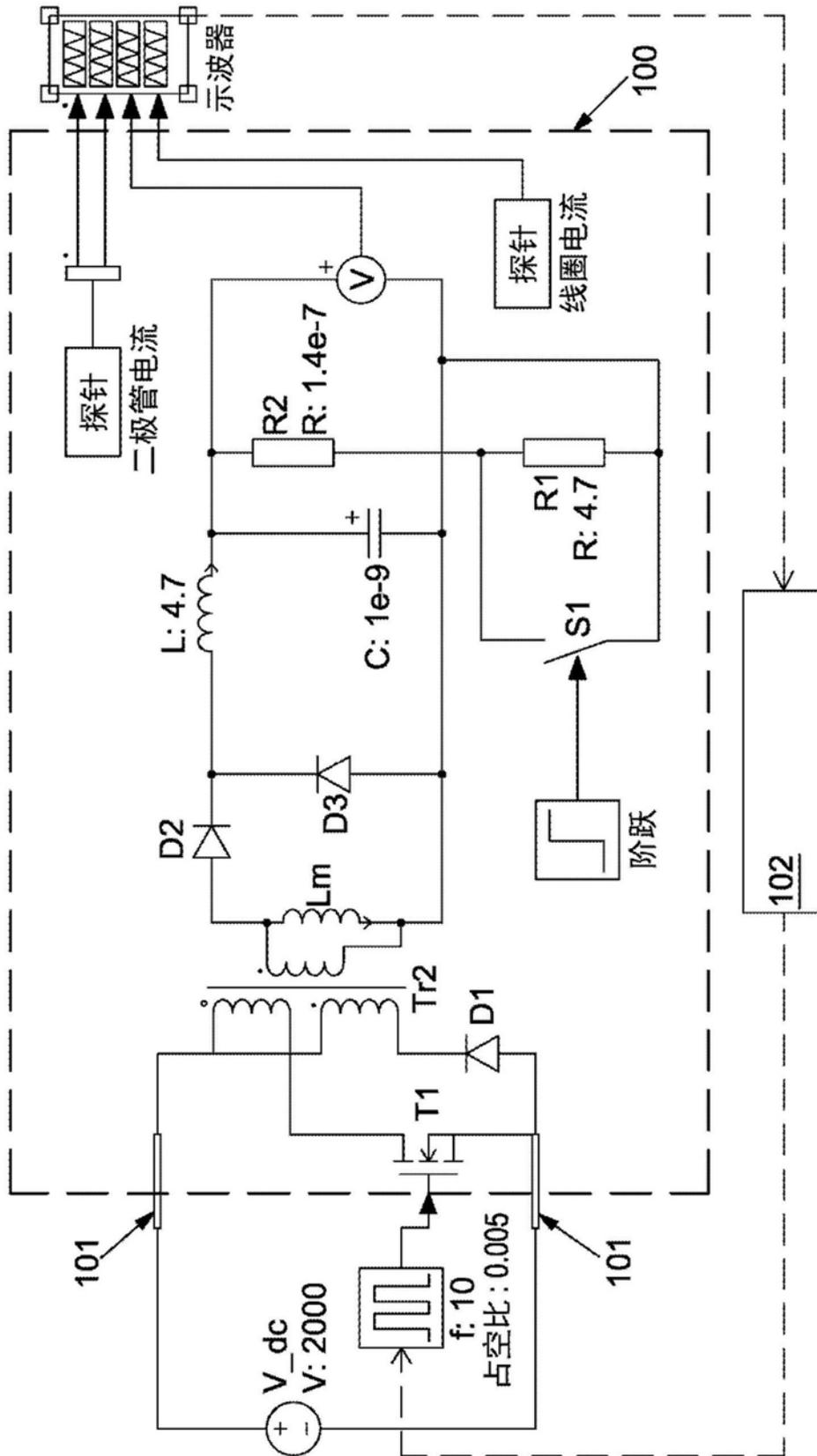


图1

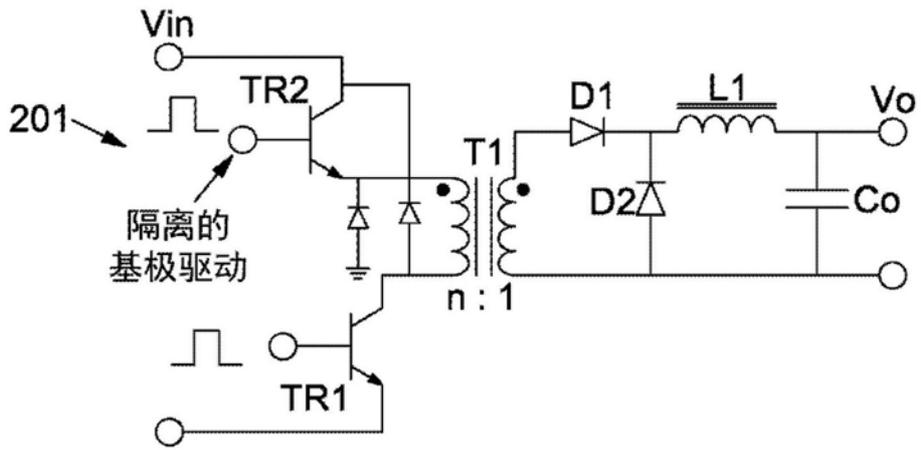


图2A

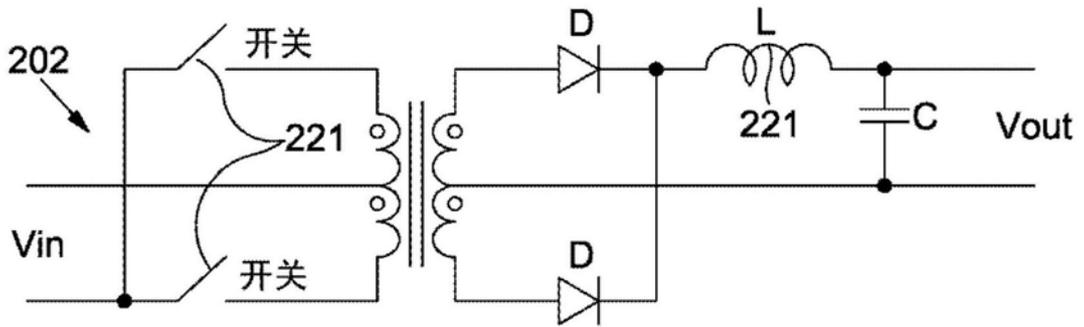


图2B

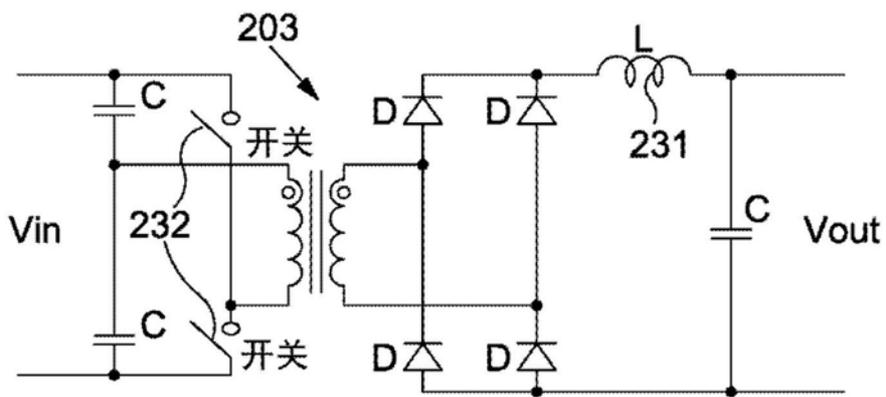


图2C

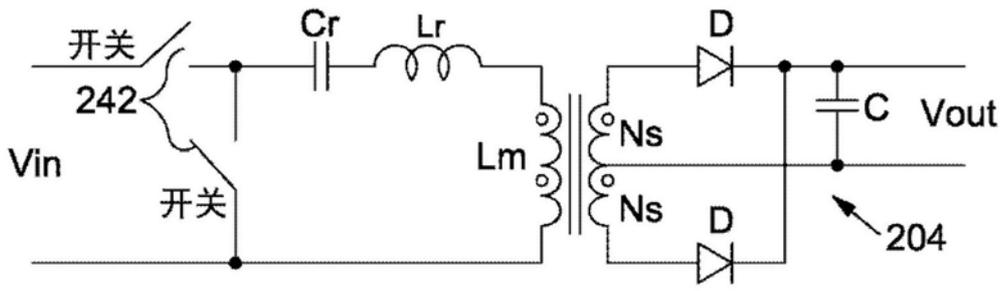


图2D

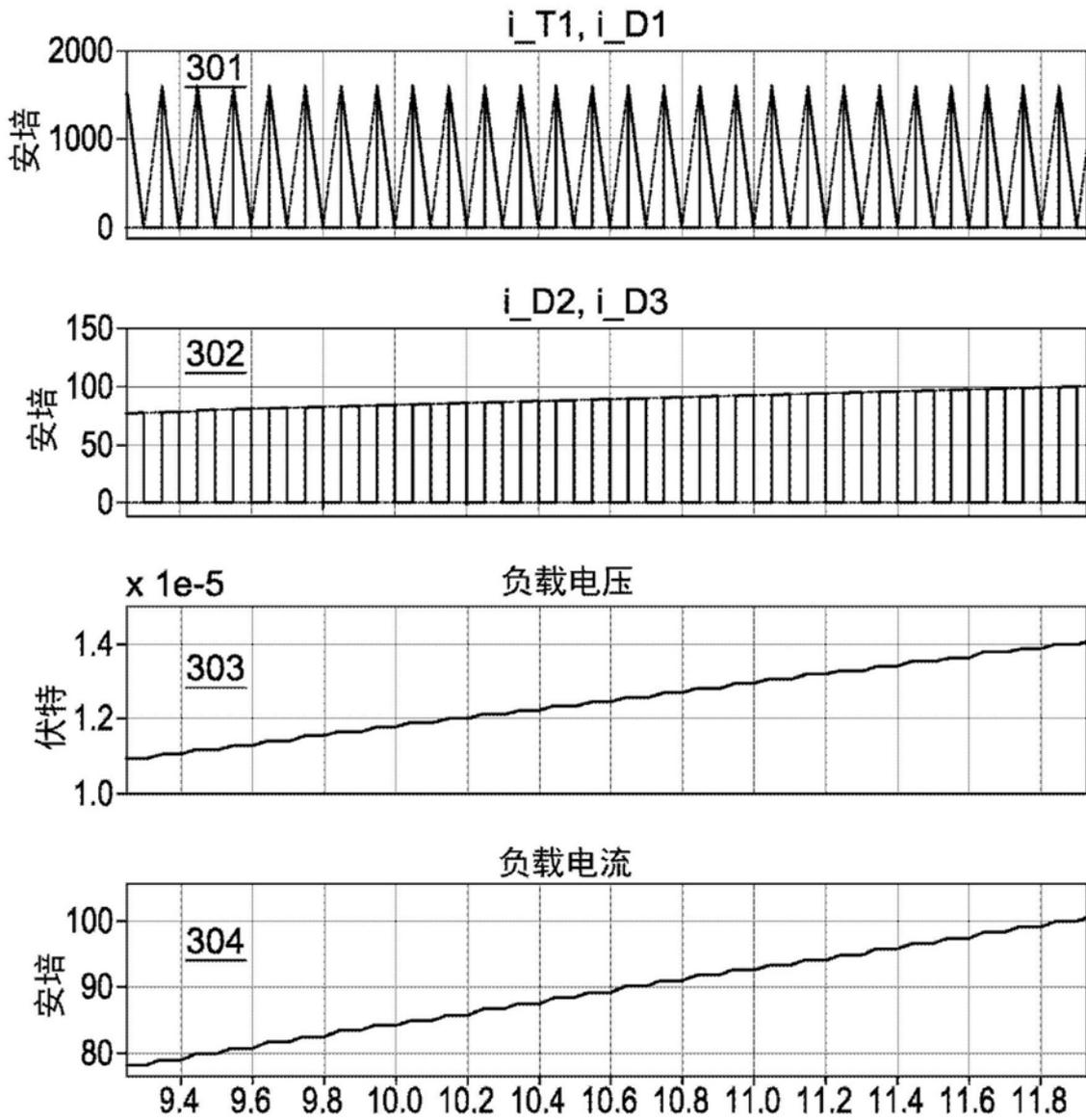


图3

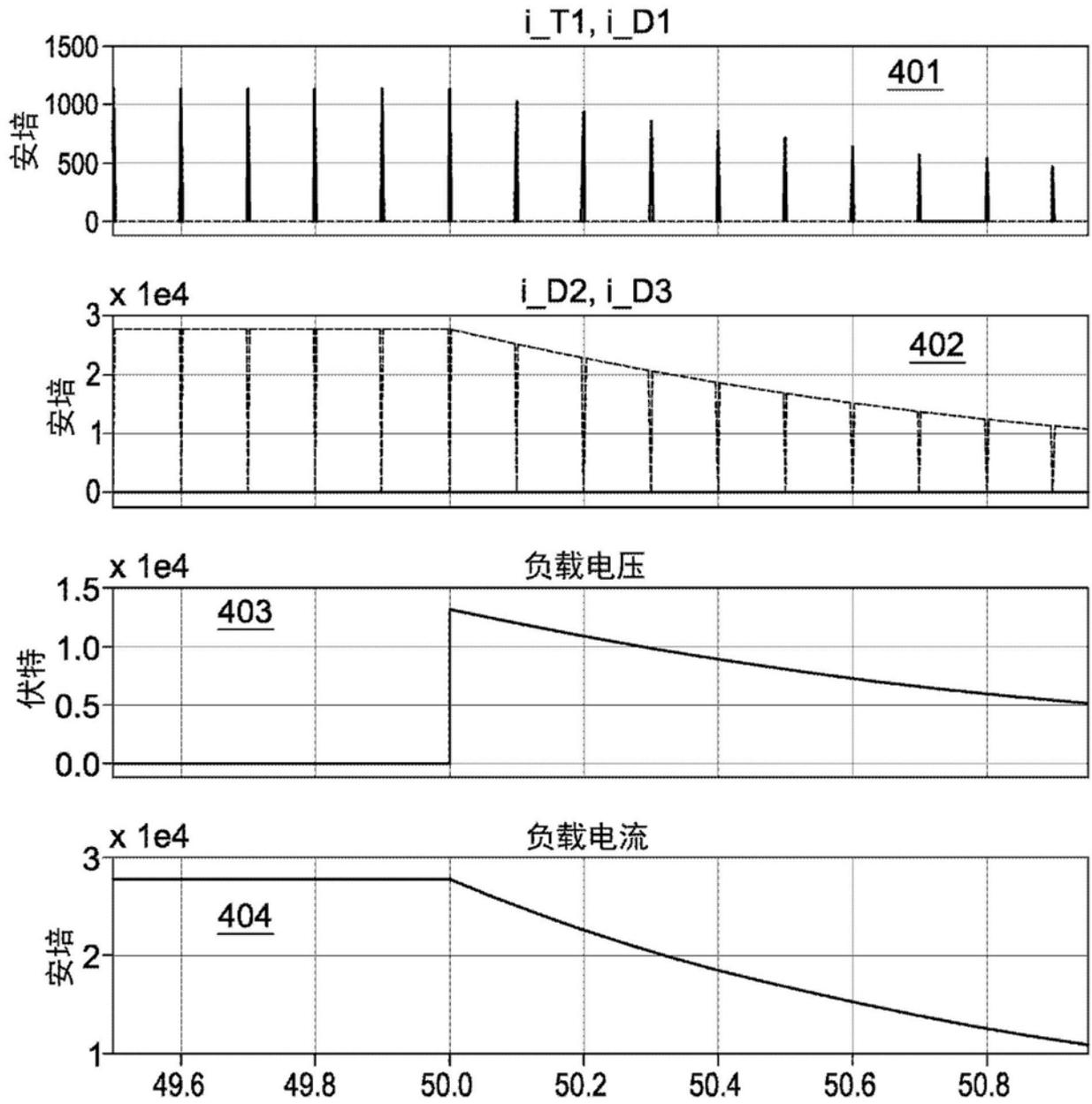


图4

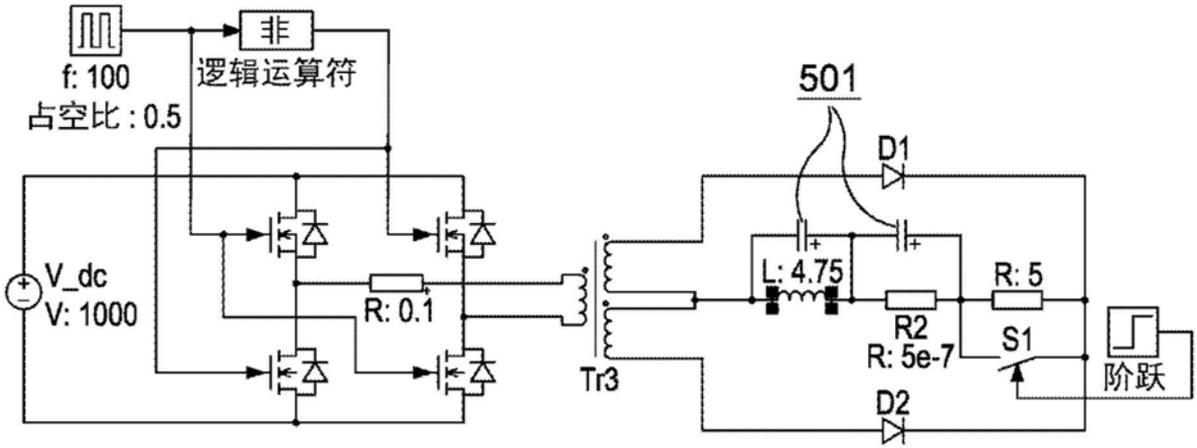


图5

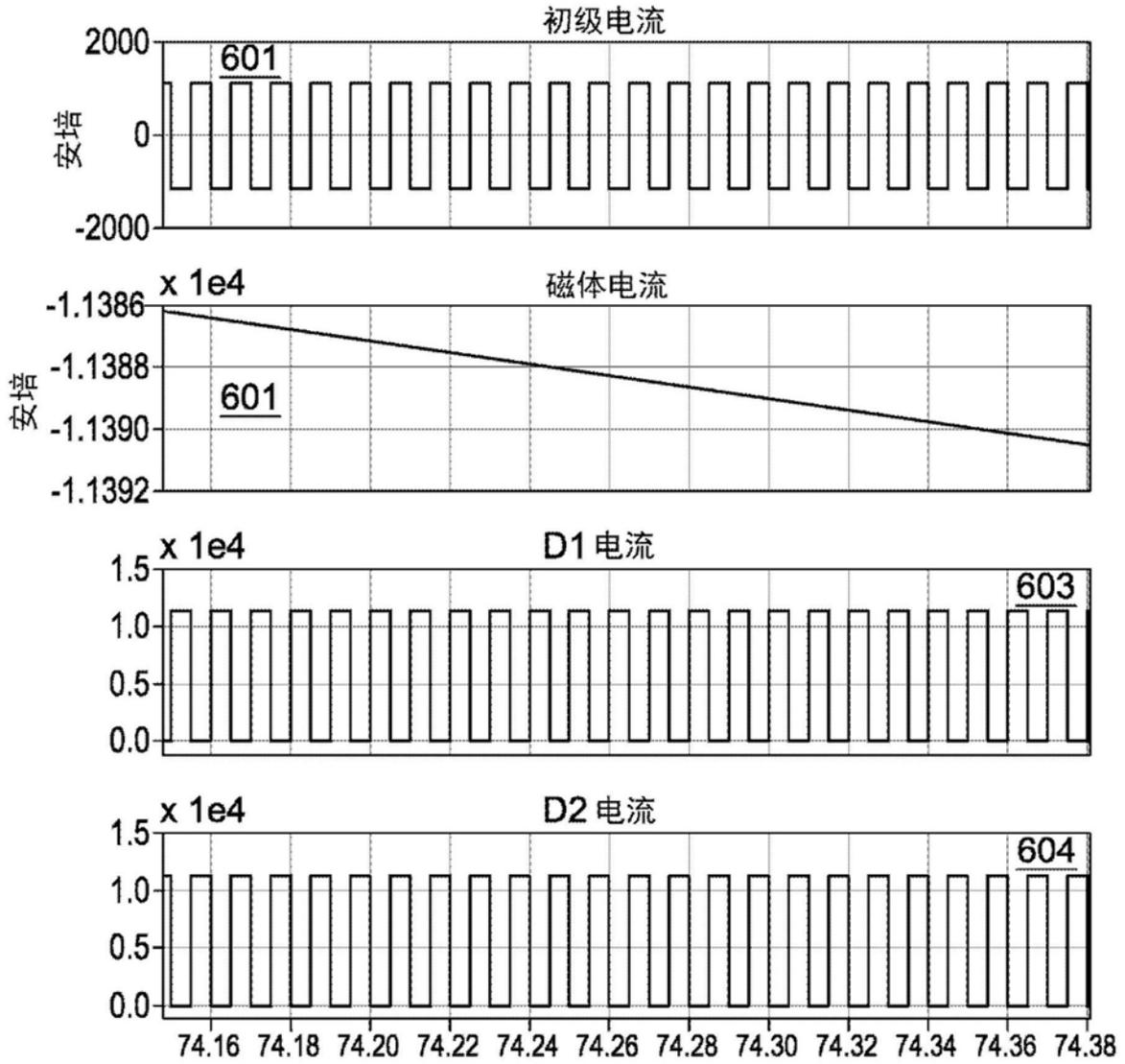


图6