



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103518309 A

(43) 申请公布日 2014. 01. 15

(21) 申请号 201280021435. 3

H01F 6/00 (2006. 01)

(22) 申请日 2012. 03. 16

H01F 6/02 (2006. 01)

(30) 优先权数据

1107765. 8 2011. 05. 10 GB

H01F 6/04 (2006. 01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2013. 11. 01

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2012/054737 2012. 03. 16

(87) PCT国际申请的公布数据

W02012/152484 EN 2012. 11. 15

(71) 申请人 英国西门子公司

地址 英国坎伯利

(72) 发明人 H. 布拉克斯 A. P. 约翰斯通

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 谢强

(51) Int. Cl.

H02J 15/00 (2006. 01)

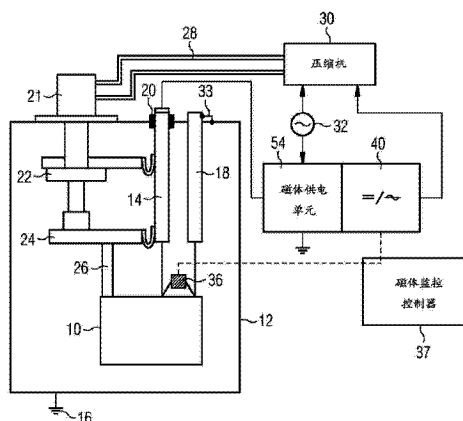
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

用于有序地停止超导磁体的方法和装置

(57) 摘要

本发明涉及一种用于维持结合承载 DC 电流的超导磁体(10)的辅助设备运行的方法,该方法包含如下步骤:将 DC 电流引导流过 DC 至 AC 变换器(40);使流过超导磁体的电流的幅值以受控的速率倾斜下降,由此产生在受控阻抗上的受控电压;通过受控电压和相关的电流来为辅助设备供电;以及控制所述倾斜速率以便维持所需的受控电压。



1. 一种用于维持低温制冷机运行的方法,所述低温制冷机由电源(32)来供电并且用于对承载 DC 电流的超导磁体(10)进行冷却,所述方法包含以下步骤:

- 检测所述电源的故障,并且作为对检测到电源故障的响应,执行下述步骤以便确保在可能的失超之前有序地停止超导磁体:

- 将所述 DC 电流引导通过 DC 至 AC 变换器(40);

- 以受控的倾斜速率使流经所述超导磁体的电流的幅值倾斜下降,由此产生来自 DC 至 AC 转换器的受控功率;

- 通过受控功率来为所述低温制冷机供电;以及

- 控制所述倾斜速率以便维持所要求的受控功率。

2. 按照权利要求 1 所述的方法,其中,控制所述倾斜速率的步骤包含:当在磁体中的电流的幅值降低时,增加该倾斜速率。

3. 按照权利要求 1 或 2 所述的方法,其中,继续为所述低温制冷机供电的步骤直到所有存储在磁体中的能量都已经在制冷机运行中充分消散。

4. 一种用于维持低温制冷机(21)运行的装置,其通过电源(32)供电并且用于对承载 DC 电流的超导磁体(10)进行冷却,所述装置包括:

-DC 至 AC 变换器(40);

- 部件,用于检测所述电源的故障,并且运行所述 DC 至 AC 变换器作为对检测到电源故障的响应;

- 受控阻抗;以及

- 连接,将所述低温制冷机(21)电连接至受控电压,

其中,所述 DC 电流被引导通过所述受控阻抗以便使流过所述超导磁体的 DC 电流的幅值以受控的速率倾斜下降,由此产生在受控阻抗上的受控电压并且由此确保在可能的失超之前有序地停止该超导磁体。

5. 按照权利要求 4 所述的装置,其中,当磁体中的 DC 电流的幅值减小时,布置 DC 至 AC 变换器以便增加倾斜速率。

## 用于有序地停止超导磁体的方法和装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及超导磁体,并且尤其涉及用于在制冷机电源发生故障的情况下实现有序地停止磁体的方法和装置。

[0002] 特别地,本发明涉及这样的方法和装置,其实现将存储在超导磁体的磁场中的能量用于继续制冷机的运行,将超导导线和上述超导磁体冷却至低于其转变温度(transistion temperature)持续足够长时间以确保受控地停止在磁体中的电流,避免失超(quench)并且在低温恒温器之外散失热量。

### 背景技术

[0003] 通常,将超导磁体封装在低温恒温器中,其使得磁体保持在其转变温度之下。尽管曾经通过提供液体制冷剂浴来实现这一点,但是更新的设计将磁体置于真空中,通过与低温制冷机连接传导热来冷却。在这样的布置中,已经成为普遍的是,提供从磁体到可到达外部的终端的电导线,其至少部分是由高温超导体(HTS)所形成。在这样的布置中,制冷机必须保持连续运行,原因在于,如果制冷停止,那么热泄露到低温恒温器中会迅速地将磁体的部分和/或导线的 HTS 部分加热到高于超导转变温度。

### 发明内容

[0004] 因此,在电源故障的情况下,(如典型的那样的)电力供能的制冷机发生问题。众所周知的是,即使缺少外加电压,在超导磁体中电流继续流动。本发明寻求一种在磁体中或在导线的 HTS 部分中开始失超之前降低该电流的有序的方式,该导线的 HTS 部分在下面称为 HTS 导线。

[0005] 一种替换的方法是,有意引起这样的失超,其在磁体材料中扩散,使得磁体的任何部分都没有升高至足够高以至于遭受损害的温度。然而,该方法仍然引起磁体大的温度上升,导致在再次冷却磁体时的显著的停机时间。失超也可以引起在磁体中的线或线圈的一些移动,这可能意味着需要执行费时的再匀场(re-shimming)过程。

[0006] 本发明相应地提供了就像在权利要求中所阐述的方法和装置。

[0007] 本发明的方法和装置提供了,使用在磁体的磁场内所存储的能量以便用于为制冷机供能,将磁体和 HTS 导线足够长时间地保持在低于其转变温度以便实现有序地停止在磁体中的电流。

### 附图说明

[0008] 结合附图,从下面对一些实施方式的解释中,本发明上述的和更进一步的目的、特征和优点会更为明显,附图中:

[0009] 图 1 示出了按照本发明所修改的低温技术冷却的超导磁体的示意图;以及

[0010] 图 2 示意性示出了用于通过断开超导开关来促使停止磁体所需要的控制。

## 具体实施方式

[0011] 按照本发明,提供这样的控制方法和装置,其检测低温制冷机的电源的故障、将能量从磁体引导至转换器(所述转换器将能量转换成对于为低温制冷机有用的形式)、并且使用所转换的电力为低温制冷机供电。以这种方式,制冷机继续运行直到所有存储在磁体中的能量都已经充分消散,使得能量消散在为制冷机自身供电中。因此,在磁体内剩余不充足的能量从而不能对磁体或导线造成任何伤害,或者一旦制冷机停止工作则不能导致在磁体或导线中的明显的温度上升。

[0012] 图 1 示意性地示出了封装在具有外部真空室(OVC)12 的低温恒温器之内的超导磁体 10。在磁共振成像(MRI)设备中,磁体和 OVC 一般都是圆柱形的,尽管从图 1 的示意性表述中不明显。

[0013] 导线 14 电连接至磁体,并且可以从 OVC12 外面到达。这可以通过将导线 14 穿过绝缘套管 20 来实现,所述绝缘套管将导线 14 与 OVC 的材料之间进行电绝缘,所述 OVC 的材料典型地是不锈钢。典型地将 OVC 接地 16,并且磁体 10 通常通过接地连接 18 被电气接地到 OVC。低温制冷机 21 典型地具有两个制冷级。第一制冷级 22 典型地冷却到在 50-80K 范围内的温度。第二制冷级 24 典型地冷却到大约 4K 的温度。在完整的系统中,在磁体和 OVC 之间提供了热辐射屏蔽,尽管在图 1 中没有示出。这些屏蔽中的一个可以热连接至第一级 22 并且冷却到大约 50K,而另一屏蔽可以热连接到第二级 24 并且冷却到大约 4K。在磁体 10 和第二级 24 之间的热连接 26 确保将磁体 10 冷却到低于其超导转变温度。通过压缩气体来运行制冷机 21,所述压缩气体例如是沿着气流管线 28 被传输给制冷机并且从中收回的氦。压缩机 30 通过电源 32 来运行,所述电源例如是电力或专用发电机。压缩机 30 压缩气体并且将其提供给制冷机 21。磁体供电单元 34 也通过电源 32 来运行,所述电源例如是电力或专用发电机。磁体供电单元 34 将所接收的电功率转换成适于应用到磁体的形式。例如,可以从电源 32 处接收 415V 的三相 AC 电能并且将其转换成 5V 的 DC 电源,具有 500A 或更大的电流容量。

[0014] 接地线 33 将接地连接 18 连接到 OVC12 的主体上。所述接地连接可以以类似于导线 14 的方式被构造。不需要绝缘套管 20,尽管接地连接必须以真空密封的方式相对于 OVC 进行密封并且电连接 33 至 OVC。

[0015] 本领域公知的是,当磁体 10 开始运行时,压缩机 30 必须将压缩气体提供给制冷机 21,所述制冷机必须冷却磁体 10 直到该磁体低于由该磁体制造的线的转变温度。一旦磁体的温度在该情况下已经稳定了,则提供来自供电单元 34 的电流。通过倾斜所供应的电流的幅值(例如以 10A/ 分钟的速率)来逐步地并且逐渐地实现这一点。在该过程中,在电路的任何阻性部分、例如导线 14 中生成显著量的热量。接地连接 18 和至少部分导线 14 可以包含超导线,或者高温超导(HTS)线,其会减少所生成的热量。

[0016] 一旦磁体在运行状态,具有流动于其中的所要求的电流,超导开关 36 可以被闭合,并且流过供电单元 34 的电流可以被逐渐地倾斜下降至零。在磁体中的电流然后会在闭合超导电路中流过超导开关 36 并且在导体 14 中没有电流。

[0017] 在正常运行状态中,通过电源 32 和供电单元 34 来供电,压缩机 30 和制冷机 21 必须连续运行,以便避免流入到 OVC12 中的热量将磁体加热到高于其转变温度并且引起失超。如果压缩机 30 和制冷机 21 连续运行,磁体可以在该状态保持扩展的时间段,生成在诸

如磁共振成像(MRI)这样的应用中使用的磁场。

[0018] 如果出于任何原因,电源 32 可能发生故障,制冷机 21 会停止冷却磁铁。流经 OVC 的热量会导致磁体和 HTS 导线的温度上升。典型地,大约在制冷机停止工作之后 10 分钟,该温度上升会达到失超磁体的点。

[0019] 本发明意图增加在电源 32 故障和磁体达到足够高的引起失超的温度之间的时间,以及倾斜下降在磁体中的电流,以便当磁体达到足够高的引起失超的温度时在磁体中仅留下极小的或零值的电流。

[0020] 本发明实现这两个要求,方法是,通过提供方法和装置用于将存储在磁体中的能量转换成用于运行制冷机 21 的能量。以这种方式,制冷机继续运行更长时间,并且存储在磁体中的能量逐步地消散。当在磁体中剩余的能量不足以继续为制冷机供电时,制冷机将停止运行并且磁体将变热直到发生失超。然而,在此时,在磁体中将存在极少的能量,并且失超不会对磁体造成任何伤害,并且不会造成在磁体中的大的温度上升。

[0021] 磁体然后将保持在这种状态:没有流动的电流,并且高于超导体的转变温度,直到电源 32 恢复。

[0022] 一旦电源 32 恢复,压缩机 30 会再次为制冷机提供压缩气体,所述制冷机会开始将磁体冷却至其运行温度,并且如上描述的运行可以再次开始。

[0023] 在该发明中的挑战是,将存储在磁体中的能量转换为适合为压缩机 30 供电以便使制冷机 21 保持运行的形式。存储在磁体中的能量被存储在由磁体生成的磁场中。该磁场与线圈的大电感 L 一起抵抗在流过该电感的电流中的任何变化。就像公知的那样,任何在电流中的变化将伴随着与电流变化率成比例的电压  $V=L \cdot dI/dt$ 。然而,在超导磁体中,在任何匝上的电压必须为零,所以  $dI/dt$  也必须为零。

[0024] 在正常运行中,电流流经磁体 10 并且流经超导开关 36。磁体监控系统 37 用于检测来自电源 32 的功率损耗并且断开超导开关 36,所述超导开关促使磁体停止。如果磁体监控控制器 37 检测到电源 32 的故障,那么控制器断开超导开关 36,并且在磁体中的电流然后流经导体 14、OVC12 和接地连接 18 到达供电单元 34。供电单元 34 然后接收来自于磁体的 DC 电流。供电单元 34 和控制器 37 包含 DC 至 AC 转换器 40,从其自身可知,用于将由磁体供应的 DC 电流转换成适合供应给压缩机 30 的形式。在其他实施方式中,根据由压缩机 30 所要求的电源类型,可以提供不同的转换器。依据在磁体中的电流的降低速率按照  $V=L \cdot dI/dt$ ,将会在供电单元 34 和电流路径的阻性部分 14、12、18 上生成电压。通过选择在磁体中的电流的合适的降低速率,可以获得合适的并且相对稳定的用于运行压缩机 30 的功率。

[0025] 存储在磁体中的能量大小与  $I^2$  成比例,并且由此,在一分钟时间上将磁体中的电流从  $I_1$  降低至  $I_2$  的情况下,从磁体中获取的能量大小与  $(I_1^2 - I_2^2)$  成比例,并且,通过这样实施所获得的平均功率与  $(I_1^2 - I_2^2)/60$  瓦成比例。为了维持不变的来自磁体的功率输出,当电流的幅值降低时,磁体中电流的降低速率必须增加。

[0026] 在示例中,压缩机 30 可以要求 6kW 的电功率以便运行制冷机 21。假设转换效率是 75%,这意味着能量必须以 8kW 的速率从磁体中移除以便为制冷机供电。当检测到电源 32 故障时,在示例的以 500A 的电流运行的 3T 磁体中,-10A/分钟的倾斜速率一直到磁体中的电流达到 400A,这将持续 10 分钟提供需要的 8kW 的平均功率。然而,在 200A 和 100A 之间的磁体电流将要求 -30A/分钟的倾斜速率,以便继续持续 3.33 分钟释放 8kW 的功率。当

然,控制器 40 将典型地比此更频繁地调整倾斜速率,以便使供应压缩机 30 的功率保持相对不变。

[0027] 这样的示例 3T 磁体在运行中存储大约 12MJ 的能量。假设本发明的装置完美地控制倾斜速率以便从磁体中得到不变的 8KW,这些 12MJ 将保持压缩机 30 运行  $12000000/8000=1500$  秒,或者 25 分钟。事实上,不完美的倾斜速率控制可能减少该时间。

[0028] 在很多 MRI 磁体上,实际上也通过连接在磁导线上的二极管来限制恒定功率运行。这些二极管将限制导线上的电压并且由此限制磁体的最大倾斜速率。

[0029] 相应地,在理想化的示例中,尽管发生电功率中断高达 25 分钟,制冷机 21 仍然保持运行。如果在那段时间内电功率恢复,那么压缩机继续工作,并且磁电流可能会向上倾斜回到运行电流,而无需任何中断用于冷却磁体。如果电功率的中断持续得稍微比 25 分钟长,那么将磁体再次冷却至运行温度所花的时间将已经被减少了适度的时间。如果电功率的中断持续得远超过 25 分钟,那么再次冷却磁体可能花费与在常规布置中一样长的时间,但是本发明已经提供了磁体的受控停止并且避免了磁体的加热,所述加热否则可能由失超引起。

[0030] 在本发明的特别实施方式中,导体 14 包含高温超导体(HTS)部分。这打算主要在持久模式运行期间降低在制冷机上的热负载,既然导体 14 的 HTS 部分的热泄露是低的。典型地导体的 HTS 部分仅仅在制冷机的第一级 22 和第二级 24 之间延伸,典型地在制冷机第一级之上使用黄铜,并且在第二级之下使用磁体的超导材料。设计 HTS 部分以便具有比黄铜部分更大的热阻抗,并且由此将对流过导体 14 的材料的热流量大小进行限制。

[0031] 作为电路示意图,图 2 示出了上述控制电路的更多细节。磁体线圈 10 被超导开关 36 分流。超导开关 36 由磁体监控控制器 37 来控制。磁体监控控制器连接到磁体供电单元 34 和 DC 至 AC 转换器 40,以便检测电源 32 的故障。磁体供电单元 34 被接地 16,从电源 32 接收功率并且生成 DC 输出 42 至磁体 10 的一侧。磁体 10 的另一侧被接地 16。

[0032] 在磁体的任何倾斜下降中,尤其当制冷机是不工作时,存在这样的危险:流过导体的电流将引起 HTS 部分加热到高于其转变温度并且变成阻性的。一旦其变成了阻性,大量的热量将消散在 HTS 导线中,所述 HTS 导线可能会被热量损坏。

[0033] 磁体的热惯量将在一段时间内保持在磁体线圈中的超导线低于转变温度。就像公知的那样,材料在低温温度处具有低的热容量,并且在示例中在功率损耗和磁体失超之间的时间段是大约 10 分钟。该 10 分钟的示例假设,铜比热是  $0.2\text{J/kg/K}$ 、铜磁体质量是  $3000\text{kg}$ 、容许的磁体线圈温度上升是  $0.5\text{K}$ ,并且在  $4\text{K}$  质量中的热输入是  $0.5\text{W}$ 。当超导线超过了转变温度,则磁体将失超。

[0034] 为了在这段时间内使磁体中的电流完全倾斜下降,将会需要  $-50\text{A/分钟}$  的倾斜速率,其可能是不可接受的,原因在于当其快速下降能够引起失超时在超导线圈中产生的高的热负载。

[0035] 通过磁体的热惯量,将在某种程度上冷却 HTS 导线的最接近磁体的一端。然而,就像上文中描述的那样,磁体将仅仅为 HTS 导线提供足够的冷却,以便保持其超导直到磁体失超。

[0036] 本发明另一方面允许制冷机在电源中断之后的倾斜下降步骤期间继续运行,以确保超导磁体和 HTS 导线足够长时间地保持超导以便使磁体倾斜至零。在上文中讨论的示

例中,在电源中断开始之后,存储在磁体中的能量可能保持冷却机运行 25 分钟,在那之后,磁体的热惯量使超导磁体和 HTS 导线保持超导持续另一个 10 分钟。超导磁体和 HTS 导线相应地保持在超导状态足够长的时间以便允许在电源中断之后有序地停止磁铁。

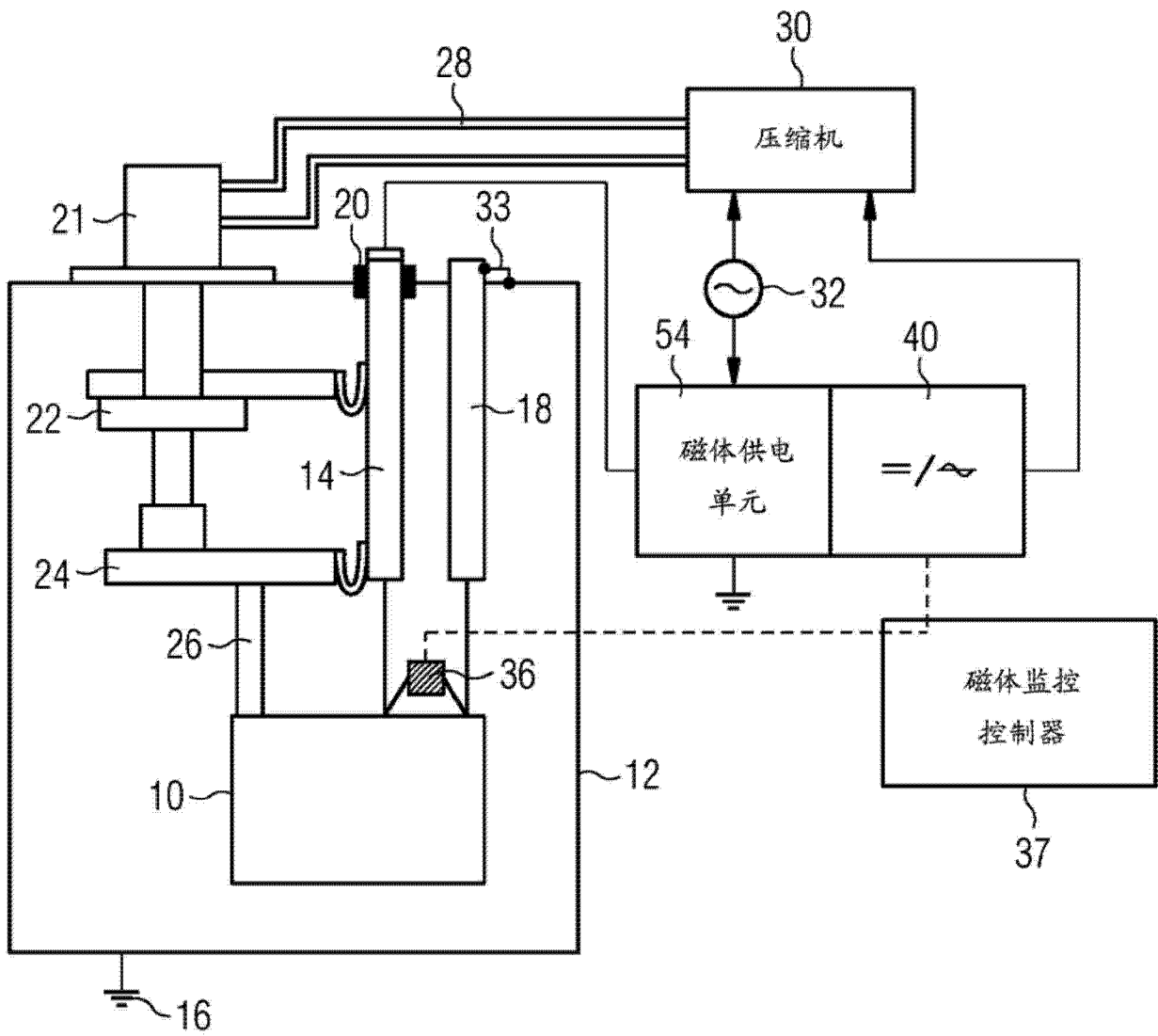


图 1



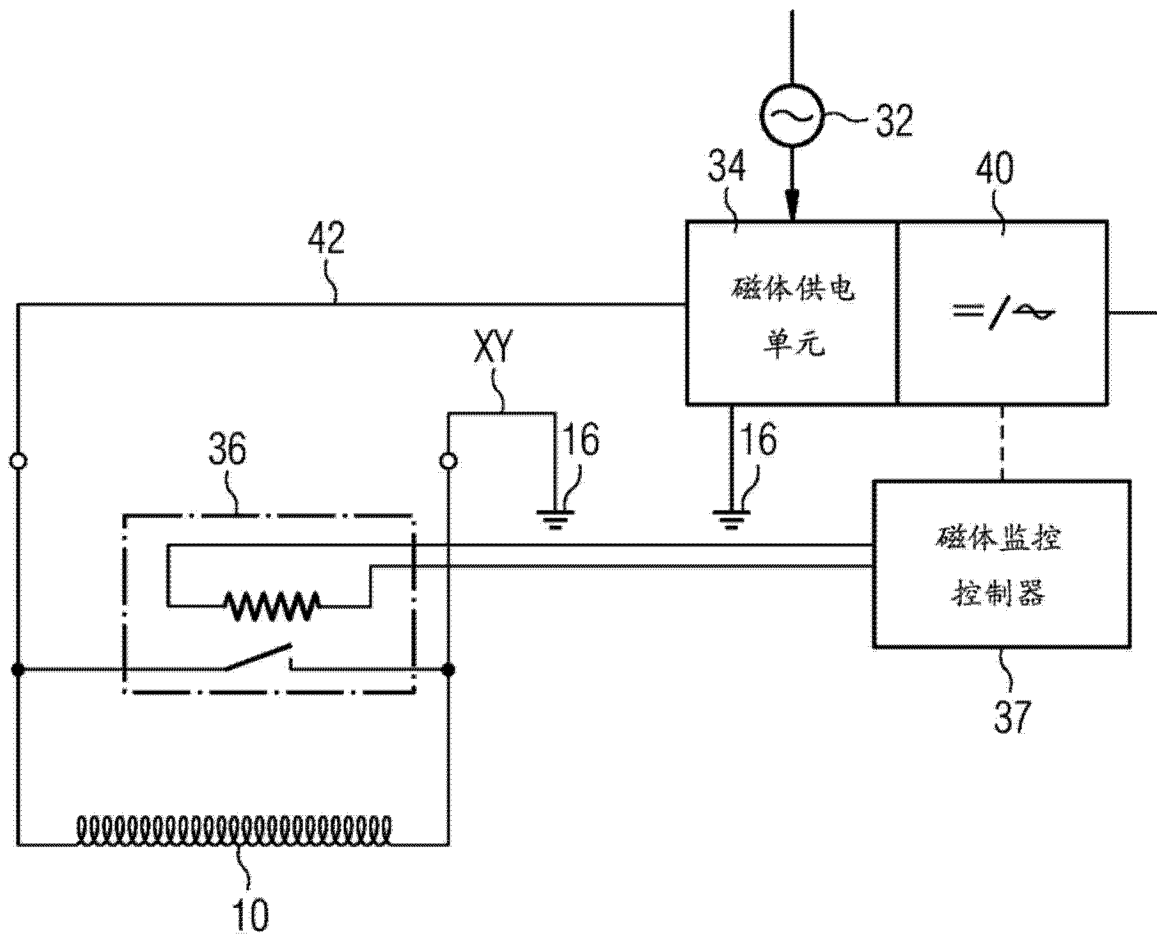


图 2