



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103166327 B

(45)授权公告日 2017.04.12

(21)申请号 201210545095.6

(22)申请日 2012.12.14

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 103166327 A

(43)申请公布日 2013.06.19

(30)优先权数据  
13/325,959 2011.12.14 US

(73)专利权人 凌力尔特公司  
地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 埃科·塔恩·利苏万迪  
蒂拉尼·伊曼西卡·迪萨纳亚克·  
博戈达

(74)专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理  
有限公司 11112  
代理人 陈源 崔利梅

(51)Int.Cl.  
H02J 50/10(2016.01)

(56)对比文件  
CN 1954472 A,2007.04.25,  
US 2010/0133917 A1,2010.06.03,  
CN 101978571 A,2011.02.16,  
JP 特开2010-88143 A,2010.04.15,  
审查员 周香

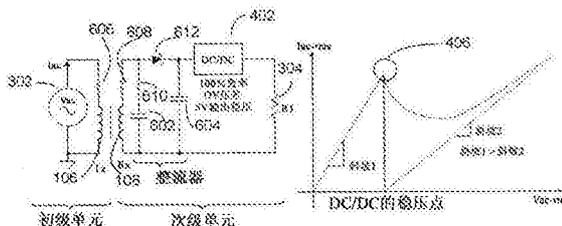
权利要求书4页 说明书10页 附图9页

(54)发明名称

最佳效率的谐振感应功率传输系统的初级  
单元控制

(57)摘要

本发明提供用于在电能源和至少一个负载  
之间无线耦合电能的电路和方法。该电路包括初  
级单元和至少一个次级单元。初级单元包括：输  
入节点，用于接收能量源所产生的输入电压；发  
射器电路，包括配置为产生电磁场的发射器线  
圈；和稳压器。该稳压器被配置成感测初级单元  
的电流消耗，确定相对于不同的输入电压的电流  
消耗的梯度，并基于该梯度确定最佳的输入电  
压。至少一个次级单元包括接收器电路和负载。  
该接收器单元包括线圈，用于与初级单元的电磁  
场无线和感应地耦合，以从其接收功率。接收器  
单元还包括稳压器电路，其被配置为将恒定功率  
提供到输出节点。



1. 一种用于在电能源和至少一个负载之间无线耦合电能的电路,所述电路包括:  
初级单元,其包括:  
输入节点,用于接收电能源所产生的输入电压;  
发射器电路,其包括配置为产生电磁场的发射器线圈;和  
稳压器,其配置为:  
感测初级单元的电流消耗,  
确定相对于不同输入电压的电流消耗的梯度,并且  
基于所述初级单元相对于不同输入电压的电流消耗的梯度来确定最优输入电压;和  
至少一个次级单元,每个次级单元包括:  
接收器电路,其包括:  
接收器线圈,用于与初级单元的电磁场无线和感应地耦合,以从其接收功率;  
稳压器电路,其配置为将恒定的功率提供到输出节点;和  
耦接至输出节点的负载。
2. 权利要求1的电路,其中:  
所述发射器电路还包括DC/AC转换器;并且  
所述电能源为直流电源。
3. 权利要求1的电路,还包括DC/DC转换器,用于响应于输入直流电压和反馈信号来生成直流输出。
4. 权利要求1的电路,其中输入电压的最优点基于初级单元对至少一个次级单元的功率需求的间接确定。
5. 权利要求1的电路,其中输入电压的最优点是基于电流消耗相对于输入电压的等于或低于预定阈值的梯度。
6. 权利要求2的电路,其中:  
初级单元还包括耦接至输入节点的DC/DC转换器,用于进行操作以生成直流信号并接受反馈信号;并且  
所述稳压器包括:  
感测电阻器,其耦接至DC/DC转换器的输出端;  
电流传感器,其配置为感测流经所述感测电阻器的电流,并生成正比于流经感测电阻器的电流的输出信号;和  
数字逻辑和存储器电路,其耦接至电流传感器的输出端,并配置为将反馈信号提供至DC/DC转换器,并分别存储每个电压阶跃的电流值。
7. 权利要求2的电路,其中:  
初级单元还包括耦接至输入节点的DC/DC转换器,用于进行操作以生成直流信号并接受反馈信号;并且  
所述稳压器包括:  
感测电阻器,其耦接至DC/DC转换器的输出端;  
跨导放大器,其感测流经所述感测电阻器的电流,并在输出电阻器两端生成与流经感测电阻器的电流成正比的输出信号;  
A/D转换器,其耦接至所述跨导放大器的输出端,并配置为感测跨导放大器的输出电阻

器两端的电压；

数字逻辑和存储器电路，其耦接至A/D转换器的输出端，其中所述存储器配置为存储每个电压阶跃的电流值；和

D/A转换器，其耦接至所述数字逻辑和存储器电路的输出端，并配置为将反馈信号提供至DC/DC转换器。

8. 权利要求1的电路，其中所述至少一个次级单元配置为通过感应式耦合从初级单元无线地获得功率。

9. 一种用于控制电功率传递系统中的无线电功率传递的方法，所述电功率传递系统包括初级单元和至少一个次级单元，所述初级单元配置为产生电磁场，所述至少一个次级单元配置为与所述电磁场耦合并对各个负载提供稳压输出电压，所述方法包括：

在第一方向使初级单元的输入电压斜坡变化；

感测初级单元在预定输入电压阶跃处的电流消耗；

将针对每个输入电压的电流消耗存储在存储器中；

针对每个电压阶跃计算电流消耗相对于输入电压的梯度；

将针对每个电压阶跃的电流消耗的梯度记录在存储器中；

将每个电压阶跃之间的梯度与预定的第一阈值相比较；

确定初级单元的最优输入电压，其中所述最优输入电压是梯度等于或小于预定的第一阈值处的输入电压。

10. 权利要求9的方法，还包括：

将输入电压设置为所确定的最优输入电压在第一方向上增加一个电压阶跃；和

在预定的延迟周期内将输入电压保持固定为所确定的最优输入电压在第一方向上增加一个电压阶跃。

11. 权利要求10的方法，其中所述预定的延迟周期是基于 (i) 所述至少一个次级单元的负载多快地变化以及 (ii) 初级单元能够对其电源电压的变化作出反应的最低速度中的至少一个。

12. 权利要求9的方法，其中在预定的延迟周期期满之后，所述方法还包括：

在第二方向使初级单元的输入电压斜坡变化，其中所述第二方向与所述第一方向相反；

感测初级单元在预定输入电压阶跃处的电流消耗；

将针对每个输入电压的电流消耗存储在存储器中；

针对每个电压阶跃计算电流消耗相对于输入电压的梯度；

将针对每个电压阶跃的电流消耗的梯度记录在存储器中；

将每个电压阶跃之间的梯度与预定的第二阈值相比较；并且

如果一个电压阶跃处的梯度大于预定的第二阈值，则返回在第一方向使初级单元的输入电压斜坡变化的步骤。

13. 权利要求12的方法，其中所述预定的第二阈值与所述预定的第一阈值相同。

14. 权利要求9的方法，其中在第一方向使输入电压斜坡变化包括以预定的电压阶跃和预定的时间间隔来增大输入电压。

15. 权利要求14的方法，其中：

所述电压阶跃为均匀的;并且  
每个样本的时间间隔为均匀的。

16. 权利要求9的方法,其中在第一方向上大于预定的第一阈值但小于前一电压阶跃中梯度的梯度表明至少一个次级单元实现了各自负载的稳压。

17. 权利要求12的方法,其中在第二方向上大于预定的第一阈值的梯度表明至少一个次级单元脱离了各自负载的稳压。

18. 权利要求9的方法,其中:

存在多个次级单元;并且

初级单元的最优输入电压位于最后一次梯度变化处。

19. 权利要求12的方法,其中第一方向上的每个电压阶跃大于第二方向上的每个电压阶跃。

20. 权利要求12的方法,其中每当斜坡方向改变时降低电压阶跃大小,直到到达预定的最小电压阶跃大小。

21. 一种用于控制电功率传递系统中的无线电功率传递的方法,所述电功率传递系统包括初级单元和至少一个次级单元,所述初级单元配置为产生电磁场,所述至少一个次级单元配置为与所述电磁场耦合并对各自负载提供稳压输出电压,所述方法包括:

根据输入电压改变初级单元的输入电流;

在每个递增阶跃的输入电压处测量初级单元的电流梯度;

将所述电流梯度与预定阈值相比较;和

确定初级单元的最优输入电压,其中所述最优输入电压是电流梯度等于或小于预定的第一阈值处的输入电压。

22. 一种用于控制电功率传递系统中的无线电功率传递的方法,所述电功率传递系统包括初级单元和至少一个次级单元,所述初级单元配置为产生电磁场,所述至少一个次级单元配置为与所述电磁场耦合并对各自负载提供稳压输出电压,所述方法包括:

在步骤1:

将初级单元的输入电压设置为预定的 $V_{\min}$ 值;

将输入电压增加预定的电压阶跃;

感测初级单元在每个输入电压值处的电流消耗;和

将每个输入电压值处的电流消耗存储在存储器中;

在步骤2:

针对电压阶跃计算电流消耗相对于输入电压的梯度;和

将所述梯度作为当前梯度存储在存储器中;

在步骤3:

将当前梯度与第一基准梯度相比较;

如果当前梯度小于或等于第一基准梯度,则在预定的延迟周期内保持输入电压固定;并且在预定的延迟周期期满后返回步骤1;

如果当前梯度大于第一基准梯度,则前进至步骤4;

在步骤4:

将初级单元的输入电压变成预定的 $V_{\max}$ 值减去预定的电压阶跃,其中预定的 $V_{\max}$ 值大于

预定的 $V_{\min}$ 值；

将输入电压增加预定的电压阶跃；

感测初级单元在每个输入电压值处的电流消耗；

将针对每个输入电压值的电流消耗存储在存储器中；

针对电压阶跃计算电流消耗相对于输入电压的梯度；和

将电流消耗的梯度作为当前梯度存储在存储器中；

在步骤5：

将当前梯度与第一基准梯度相比较；

如果当前梯度大于第一基准梯度，则：

将输入电压设置为 $V_{\max}$ ；

在预定的延迟周期内保持输入电压固定在 $V_{\max}$ ；和

在延迟周期期满后返回步骤1；

如果当前梯度小于或等于第一基准梯度，则：

将当前梯度作为最小基准梯度存储；

将 $V_{\text{low}}$ 设置为 $V_{\min}$ ，将 $V_{\text{high}}$ 设置为 $V_{\max}$ ；和

继续步骤6；

在步骤6：

将初级单元的输入电压变成  $(V_{\text{low}}+V_{\text{high}})/2$ ；

将输入电压增加预定的电压阶跃；

感测初级单元在每个输入电压值处的电流消耗；

将针对每个输入电压值的电流消耗存储在存储器中；

针对电压阶跃计算电流消耗相对于输入电压的梯度；和

将计算的梯度作为当前梯度存储在存储器中；

在步骤7：

针对电压阶跃计算电流消耗相对于输入电压的梯度；和

将计算的梯度作为当前梯度存储在存储器中；

在步骤8：

将当前梯度与第一基准梯度和最小基准梯度相比较；

如果当前梯度大于最小基准梯度，并且小于或等于第一基准梯度，则前进至步骤10；

否则前进至步骤9；

在步骤9：

如果当前梯度大于第一基准梯度，则将 $V_{\text{low}}$ 设置为初级单元的当前输入电压；

如果当前梯度小于或等于最小基准梯度，则将 $V_{\text{high}}$ 设置为初级单元的当前输入电压；并

且

重复步骤6至8；

在步骤10：

在预定的延迟周期内保持输入电压固定；和

在预定的延迟周期期满后，返回步骤1重复所述方法。

## 最佳效率的谐振感应功率传输系统的初级单元控制

### 技术领域

[0001] 本公开涉及无线能量传输及其控制。

### 背景技术

[0002] 人们对于无线传输功率以为从手机到重型工业设备(如起重机马达)的各种消费电子设备充电或供电具有越来越大的兴趣。在这方面,感应充电使用电磁场在两个对象之间传递能量。能量通过感应耦合发送至电子设备,以对设备充电或供电。取消了发送器和接收器之间的直接(即有线)电接触可以提供多种优点。

[0003] 例如,与导电充电相比,感应式充电可以降低触电的危险,因为没有暴露的导体。另外,提供了密封发射器电路和接收器电路的能力。这种电路封装提供了需要提供防水密封的应用,例如为可能与水接触的植入式医疗设备或个人卫生设备(如牙刷,剃须刀)充电。

[0004] 即使在触电或卫生不是最重要关注点的应用中,感应式功率传输也是可取的。例如,要供电的设备及其电源之间的连接可能随着时间的推移而变得不可靠。此外,在充电器和设备之间建立物理接触比较耗时。

[0005] 因此,无线功率传输增加了安全性、可靠性、和时间效率,同时降低了维护成本。

[0006] 图1示出一个典型的无线功率传输系统100,其包括发射器电路104(即初级单元)和接收器电路110(即次级单元)。发射(Tx)线圈106通电以发射随时间变化的磁场。由发射线圈106产生的磁场在所产生的磁场附近的接收(Rx)线圈108中感生出电流。在谐振系统100中,此交流电流在产生输出电压的接收器电路中的接收线圈108和储能电容器(图中未示出)之间往返流动。随后可以对该交流电压整流,以在跨接负载 $R_L112$ 的输出端产生交流电压。在接收器电路110的输出端稳压的输出电压能够传递直流电流,以对接收器侧的负载 $R_L112$ 供电。

[0007] 次级单元110可以利用稳压来控制传递到负载112的功率量。在一个示例中,该稳压器可以是稳压其输出电压的DC/DC转换器。对于固定的电阻性负载,稳压的输出电压控制负载112中的电流量,并因此控制传递到电阻112的功率总量。

[0008] 注意,从接收器电路110到发射器电路不存在直接的反馈。如果没有这样的反馈,则初级单元104上的发射电路可以将发射线圈通电至最大程度,以容纳次级单元110上的最坏情况操作条件。例如,最坏情况操作条件可以包括最大负载电流和两个线圈(即,线圈106和108)之间的最低耦合。以最大程度对发射线圈106通电会导致发射器电路104以及发射线圈106的较大功耗,因为实际的发射器电路104和实际的发射线圈106不够理想。

[0009] 因此,即使不存在接收器电路110或 $R_L112$ ,发射器电路104和发射线圈106也会耗散功率。非理想因素(例如发射器电路104中的耗能元件)包括开关损耗。此外,发射线圈106中的损耗包括 $I^2R$ 损耗。一个显著的非理想因素可以是发射线圈106自身的寄生串联电阻。这些非理想因素降低了能量效率。

[0010] 因此,如果接收器电路110不将其操作的主要部分用于将最大功率传递至负载 $R_L112$ ,以最大程度对发射线圈106通电是不可取的。例如,如果负载112是移动电话的电池,

则只需要在每个充电周期开始的短时间段内以最大电流为电池充电。在此短时间段之后持续以最大电流对发射线圈106通电是低能量效率的。

[0011] 在一种对从初级侧106到次级侧110的功率传输的整体效率进行优化的方法中,使用从接收器电路110到发射器电路106的物理反馈。关于这一点,存在多种提供这种反馈的方法。

[0012] 例如可以是从接收器电路110到发射器电路104的提供直接反馈信息的光电耦合器。在另一示例中,可以是具有提供这种反馈信息的无线通信协议的专用射频链路。其它方法可以通过次级谐振电容器的轻微调制来间接观测初级单元交流波形。随后可以将这种调制用作低带宽射频链路,以将反馈信息从接收器电路110发送到发射器电路104。

[0013] 然而,现有技术基本上依赖于从接收器电路110到发射器电路104的直接反馈信息,以便稳压从接收器电路110到发射器电路104的功率传递。

[0014] 因此,通过间接确定接收器电路和负载的状态来提供从发射器电路到接收器电路和负载的功率传递的主动控制是有利的。

## 发明内容

[0015] 本发明提供用于在电能源和至少一个负载之间无线耦合电能的电路和方法。该电路包括初级单元和至少一个次级单元。初级单元包括:输入节点,用于接收能量源所产生的输入电压;发射器电路,包括配置为产生电磁场的发射器线圈;和稳压器。该稳压器被配置成感测初级单元的电流消耗,确定相对于不同的输入电压的电流消耗的梯度(gradient),并基于该梯度确定最佳的输入电压。至少一个次级单元包括接收器电路和负载。该接收器单元包括线圈,用于与初级单元的电磁场无线和感应地耦合,以从其接收功率。接收器单元还包括稳压器电路,其被配置为将恒定的输出电流或电压提供到输出节点。

[0016] 本发明的电路和方法使得能够通过间接确定接收器电路和负载的功率需求来对从发射器电路到接收器电路及其负载的功率传递进行主动调节。这种确定是间接的,因为所述功率要求不直接由接收器电路提供;相反是由发射器电路确定的。在一个实施例中,初级单元的输入电压在第一方向(例如,正向)上斜坡变化。电流消耗被感测并存储在存储器中。对于每个电压阶跃(step),确定相对于每个阶跃的输入电压的电流消耗的梯度,并记录在存储器中。特定电压阶跃处的梯度的变化表明对次级单元上的负载进行主动稳压的点。例如,通过将每个电压阶跃的梯度与预定的第一阈值相比较,可以确定最佳的输入电压。如果梯度大于第一阈值,则斜坡变化(ramp)继续。如果等于或小于第一阈值,则意味着到达了最优点。

[0017] 在一个实施例中,输入电压设置为超过预定最优输入电压的一个阶跃。这是为了确保系统中的固有变动不会干扰对次级单元中负载的稳压。该输入电压可以在预定时间内保持固定。该预定的延迟周期可以基于所述至少一个次级单元的负载变化多快和/或初级单元能够多快地对次级单元的负载变化作出反应。此外,该预定延迟可以基于初级单元可以就其电源电压的变化作出反应的最低可接受速度。

[0018] 在此延迟周期之后,电压在(与第一方向相反的)第二方向上斜升。在每个电压阶跃,感测初级单元中的电流消耗。与第一方向中相同,针对每个电压阶跃确定电流消耗相对于输入电压的梯度。这些值存储在存储器中。计算每个电压阶跃处的梯度并与预定第二阈

值相比较。在一个实施例中，第二阈值与第一阈值相同。同样的，如果超过第二阈值，则表示次级单元已经失去了对其负载的稳压。然后电压斜升改变方向(变成第一方向)并且循环继续。

[0019] 由此，无需来自次级单元的直接反馈，就可以维持初级单元针对有效功率传递的最优输入电压。

[0020] 上述及其它部件、步骤、特征、对象、优点和益处将通过对下面示例实施例和附图等的详细说明进行浏览而变得清楚。

## 附图说明

[0021] 附图是示例实施例。它们不说明所有的实施例。可以另外使用其它实施例或作为代替使用其它实施例。显而易见或不必要的详细信息可以省略以节省空间或进行更有效地说明。一些实施例可以利用额外的部件或者步骤和/或不利用所例示的全部部件或步骤来实现。在不同的附图中出现相同的附图标记时，它指示相同或类似的部件或步骤。

[0022] 图1例示了典型的无线功率传递系统的示例。

[0023] 图2例示了在次级单元上具有固定负载并具有稳压后的输出电压的初级单元的功耗的示例。

[0024] 图3例示了提供固定负载上的电压的电压源。

[0025] 图4例示了具有100%效率和0V压差(drop out)的稳压器402的系统。

[0026] 图5例示了具有耗能元件和负载的系统。

[0027] 图6例示了根据本发明实施例的无线感应式功率传递系统的模型。

[0028] 图7例示了根据本发明实施例的感应式功率传递系统的初级单元针对次级单元上的不同负载的功耗曲线。

[0029] 图8例示了根据本发明实施例的具有最优功率传递稳压器(OPTR)模块的无线功率传递系统的简化框图。

[0030] 图9例示了根据本发明实施例的具有OPTR的简化框图的无线功率传递系统的简化框图。

[0031] 图10示出了根据本发明实施例的DC/AC转换器电路的示例。

[0032] 图11示出了根据本发明实施例的DC/AC转换器电路的另一示例。

[0033] 图12A例示了根据本发明实施例的接收器电路的示例。

[0034] 图12B例示了根据本发明另一实施例的接收器电路的示例。

[0035] 图13示出了在具有稳压输出的次级单元的感应式功率传递系统中初级单元电流(I)如何随着初级单元电压(V)的增加而变化的示意图。

[0036] 图14示出了在无线功率传递系统中具有N(N>1)个次级单元耦接至单个初级单元的感应式功率传递系统中，初级单元电流(I)如何随着初级单元电压(V)的增加而变化的示意图。

[0037] 图15示出了在具有稳压输出的次级单元并且其中对最优电源电压执行二值搜索的感应式功率传递系统中初级单元电流(I)如何随着初级单元电压(V)的增加而变化的示意图。

## 具体实施方式

[0038] 下面对示例实施例进行说明。可以另外使用其它实施例或作为代替使用其它实施例。显而易见或不必要的详细信息可以省略以节省空间或进行更有效地说明。一些实施例可以利用额外的部件或者步骤和/或不利用所例示的全部部件或步骤来实现。

[0039] 下文所讨论的各种示例能够通过间接确定接收器电路和负载的功率需求来提供从发射器电路到接收器电路及其负载的功率传递的主动控制。对于功率需求的间接确定不是由接收器电路直接提供,而是由发射器电路通过对发射器电路的电流消耗的分析来确定。

[0040] 例如考虑在图1的电路100中,从发射器电路104到接收器电路110(即通过与接收器线圈108耦合的发射器线圈106)无线传递系统功率,整个系统中没有功率放大。换句话说,次级单元上消耗的所有增量功率都是由初级单元无线提供的。进一步考虑次级单元的接收器电路110包括稳压器的情况,其中稳压器对负载 $R_{L112}$ 上的输出电压进行稳压。针对每个给定的负载 $R_{L112}$ ,存在到初级单元的最优总输入功率。超过此最优点的初级单元消耗的额外功率均为浪费。初级单元通过监测初级单元上的电流消耗能够在发射足够功率时检测到该点(即输入电压)。例如,通过在监测电流消耗的增量变化的同时对发射器电路104的电源电压进行调制(例如增加或减少),可以确定在次级单元和初级单元之间提供最高效率功率传递的发射器电路的最优电源电压。在一个实施例中,最高效率功率传递的最优点是在电流消耗的增量变化开始降低时。

[0041] 在图1中,在发射线圈(Tx)106中,所产生的磁场强度正比于流经线圈106的交流电流。该交流电流正比于施加在线圈106上的交流电压。此交流电压的幅度可以通过控制初级单元电源102的输出功率来调制。

[0042] 在一个实施例中,通过DC源生成发射器线圈106两端的交流电压。使用DC/AC转换器(未示出)将直流源转换为交流。该交流电压可以正比于施加在发射器电路104上的直流或平均电压。因此,直接改变直流电压可以改变发射器线圈106的磁场强度,这反过来改变了次级单元可以获得的功率量。

[0043] 所述初级单元的感应功率耦合到辅助单元。换句话说,接收器电路110的接收器线圈108适合于同发射器电路104的发射器线圈106的磁场耦合,而无需直接电接触。由此可以将功率感应地从初级单元传递至次级单元。由于提供至次级单元的功率来自初级单元,因此通过监测初级单元的功耗能够获得对次级单元状态的间接观察。

[0044] 作为示例,现在参照图2,图2例示了在次级单元上具有固定负载 $R_{L112}$ 的典型初级单元的功耗,其中 $R_{L112}$ 上的电压被稳压。图2是发射器电路104供电电流( $I_{SUPPLY}$ )对电源电压( $V_{SUPPLY}$ )102的曲线图,其中负载 $R_{L112}$ 上的次级输出电压被稳压,并且负载 $R_{L112}$ 固定。例如, $V_{SUPPLY}$ 102可以从低电压(如0V)到高电压(如15V)变化。随着功率(即 $I_{SUPPLY} \times V_{SUPPLY}$ )的增加,在实现负载 $R_{L112}$ 上的输出电压稳压时的次级增量功耗降低。图2中的点202代表最优操作点。通过下面的示例可以对稳压输出电压的最优操作点的概念获得更好的理解。

[0045] 作为示例,图3例示了提供固定负载304上的电压的电压源302。随着负载304上的电压302的增加,电流线性增加。于是,随着提供至负载304的电压的增加,功耗增大。相反,图4例示了具有100%效率和0V压差的稳压器402(如DC/DC)的系统。其将负载304上的电压

稳压至预定水平(如5V)。消耗电流在达到预定水平之前根据所施加的电压线性增加(如图3所示)。不过,一旦输入电压302到达预定水平(如本示例中的5V),则消耗电流下降。这是因为稳压器402提供了恒定的功率负载(即, $P=V \times I=5^2/R=25/R$ )。一旦输入到达预定电压水平稳压器就能够实现稳压,使得电源302提供的任何多余电压过剩。

[0046] 作为示例,图5例示了具有耗能元件R2(502)和负载R1(304)的系统。随着输入电压302增大至预定水平(如5V),电流以 $1/(R1R2) = (R1+R2)/R1R2$ 的梯度线性增加。一旦通过稳压器402获得了负载304上的期望电压,则增量功率需求降低。这是因为,负载304上的功耗现在固定为 $25/R$ ,任何增量功耗现在由耗能元件R2(502)管理。因此随着电压302的增加,可以在较高电压处以新的梯度 $1/R2$ 来估计电流。由此,通过确定电流梯度相对所施加的电压发生变化的点406,可以确立系统的最优输入电压。例如,最优标准可以是在允许对R1上的电压进行稳压的同时在R2(502)上具有最小功率耗散。

[0047] 图6例示了根据发明实施例的无线感应式功率传递系统的模型。交流电源302为发射器线圈106提供交流电流,发射器线圈106感应耦合至接收器线圈108。电阻606和608分别代表发射器线圈106和接收器线圈108的寄生电阻。例如可以具有包括二极管612和电容器604的整流器,其将来自包括电容器602和接收器线圈108的谐振储能电路的交流电压转换成直流信号。该直流信号提供至转换器402(如DC/DC),其为负载304提供稳压后的输出电压。发射线圈106和接收线圈108由于寄生电阻(即606和608)而通常为耗能性的,因此获得与图5相似的曲线图。如针对图5所讨论的,电流相对所施加的输入电压的梯度在到达稳压点之前和到达稳压点之后是不同的(即负载稳压之前的梯度>负载稳压之后的梯度)。

[0048] 如上文所述,图6中曲线的梯度变化表示当次级单元上没有足够的功率实现稳压时,次级单元尽量从初级单元吸收功率以将其传递至负载304的情况。一旦可获得足够多的功率来实现稳压,次级单元就减少其增量功率需求。这由稳压点406代表。初级单元上可见的任何增量功耗是由于初级单元和次级单元上的寄生低效率因素。梯度(即斜坡)变化的幅度可以取决于初级和次级固有效率而变化。注意,一旦次级单元实现稳压,则梯度必然发生变化。这种梯度变化可以用于确定从初级单元传递至次级单元的最优功率传递。

[0049] 图7例示了根据本发明实施例的感应式功率传递系统的示例初级单元针对次级单元上的不同负载的功耗曲线图。该曲线图例示了随着负载的电阻增加,最优电流供应(及电压供应)降低。这是由不同电源电压针对不同负载的梯度变化所表示的。在一个实施例中,随着负载渐渐趋于较高或较低而主动调节从初级单元提供到次级单元的功率。例如,由于在较高温度操作,负载的电阻随着时间而增加。因此,提供至次级单元的电源电压和电流随着负载增加而主动降低。类似地,如果负载的电阻变小,则提供到次级单元的电源电压和电流主动增加,直到到达最优点,如梯度变化所示。

[0050] 在一个实施例中,对初级单元电压进行周期性调制,以确定出现梯度变化的电压。该电压可以是直流或交流电压。关于这点,调节初级单元压以确保该电压。最终梯度的幅值基于预定值,其可以基于初级单元和次级单元的效率而在不同的应用中不同。该方法能够从次级单元直接感测次级功耗,从而允许初级单元恰好地对次级单元的线圈供能,以实现输出电压的次级单元稳压。这降低了初级电路中的任何存储损耗,优化了整体系统效率。这些最优操作点由图7中针对每个不同的负载电阻的圆点来表示。

[0051] 图8是根据本发明实施例的具有最优功率传递稳压器(OPTR)模块的无线功率传递

系统的简化框图。图8的无线功率传递系统包括初级单元和次级单元。该初级单元包括耦接至DC/DC转换器804的电压源802(其可以是直流电压源)。转换器804具有用于稳压输出信号的输出电容器806。初级单元还包括为转换器804提供反馈的电阻分压器(即 $R_{FB1}$ 和 $R_{FB2}$ )。转换器804的输出通过感测电阻 $R_{S808}$ 提供至OPTR 824。后文部分对OPTR进行更详细的说明。初级单元还包括DC/AC转换器810和发射器线圈812。至于次级单元,其包括接收器线圈814、接收器电路816和负载 $R_L$ 818。

[0052] DC/AC转换器810的电源电压由DC/DC转换器804提供。DC/DC转换器804的输出电压由OPTR 824稳压。OPTR模块通过感测流过感测电阻 $R_{S808}$ 的电流来执行梯度检测和电源电压调制。OPTR 824对进入DC/DC转换器反馈电阻822的电流进行调制。这些模块将在后文进行详细描述。

[0053] 图9例示了根据本发明实施例的具有OPTR的简化框图的无线功率传递系统的简化框图。发射器电路包括如下模块:DC/DC转换器804、DC/AC转换器910、和OPTR电路模块824。OPTR电路模块824包括对流经感测电阻 $R_{SENSE808}$ 的电流进行感测的电流传感器1006和1008,以及其中包括存储器元件的逻辑模块1012。流经感测电阻808的电流表示初级单元的电流消耗。电流传感器1006和1008将周期性电流测量的电流存储在逻辑模块1012的存储器中。

[0054] 在此示例中,电流传感器是其输出连接至电阻1008的跨导放大器1006。因此,在VC生成的电压正比于流过感测电阻808的电流。可以通过A/D转换器1010对输出电阻1008上的电压采样,以生成输出电阻1008上的电压的数字表示。

[0055] 数字逻辑和存储器模块1012可以使用例如复杂可编程逻辑器件(CPLD)来实现。在一个实施例中,CPLD实现各种运算步骤,包括对每次采样中通过电流感测放大器1006确定的电流值(I)进行存储和比较。

[0056] 图9的OPTR电路模块824还可以包括耦接至数字逻辑和存储器模块1012的输出的D/A转换器1014。D/A转换器1014将数字逻辑1012的CPLD的数字值输出在D/A转换器的输出端处变换成电流。该电流用于改变提供至DC/DC转换器804的反馈(FB)电压。

[0057] 图10示出了根据本发明实施例的DC/AC转换器电路的示例。振荡器1102以预定频率产生方波。该方波提供至驱动器1104的输入端。驱动器1104可以是例如半桥门驱动器。驱动器1104的输出耦接至与高电压(如 $V_{SUPPLY}$ )耦接的晶体管以及与低电压(如地)耦接的晶体管。在一个实施例中,与高电压耦接的晶体管是PFET 1106,与低电压耦接的晶体管是NFET 1108。DC/AC转换器的输出提供能够反馈至发射线圈1110的低阻抗方波信号。线圈1110上的方波电压的幅度基本上等于高电压(如 $V_{SUPPLY}$ )。

[0058] 图11示出了根据本发明实施例的DC/AC转换器电路的另一示例。该DC/AC转换器可以是自振结构(如Royer振荡器),用于在发射线圈1216上产生正弦电压。通过如下方式实现振荡,即,使用紧耦合的电感器1210、1212和1102将与各自的集电极的信号具有相反极性的信号驱动至NPN的基极(即1202和1204)。

[0059] 图12A和图12B例示了根据本发明不同实施例的不同接收器电路的示例。图12A包括调谐的LC储能电路(即1302和1304)。LC储能电路的输出耦接至包括二极管1306和电容器1308的整流器。该整流器的输出耦接至DC/DC转换器1310。

[0060] 图12B包括代替图12A的DC/DC转换器1310的调谐控制1318。在两个实例中,在输出负载1314上提供稳压输出。

[0061] 前述示例中包括的无线功率传递系统的不同构成模块是为了对相关技术提供透彻的理解。不过,本领域技术人员应当理解,本发明无需这些细节也可以实现。在其它的实例中,相对上位地对已知的方法、过程、部件、和/或电路进行了无关细节的描述,以避免不必要地模糊本发明的各个方面。本领域技术人员将会意识到,基于本文的指教,可以使用其它的电路来实现各个构成模块,并且可以使用其它构造。在每个实施例中,初级单元通过间接确定次级单元的功率需求来对传递至次级的功率进行调制,以将稳压的输出电压提供至负载。

[0062] 现在参照图13,其例示了一个样本实施例中确定最优电压点的方法。图13提供了表示电流(I)随着电压(V)增加而变化的简化图。其中的电流和电压值是在无线功率传递系统的初级中。

[0063] 例如,在开始时(即步骤1),输入电压以预定的阶跃大小斜坡上升。在一个实施例中,电压阶跃大小是统一的。基于应用来设置阶跃大小。例如,阶跃大小越小,则可以获得越高的分辨率,导致更精确的操作点(即在初级单元设置的电压)。在另一实施例中,对于最优操作点使用二值搜索。在每个样本(即电压阶跃)中确定初级的电流消耗。该电流值记录在存储器中。例如,电流值可以存储在图9的数字逻辑和存储器模块1012中。

[0064] 在步骤2,确定第一电流值( $I_1$ )和原始电流值( $I_0$ )之差。针对每个电压阶跃确定电流对电压的梯度,并存储在存储器中。

$$[0065] \quad \Delta I_c = (I_1 - I_0) \quad (\text{公式1})$$

[0066] 在一个实施例中,在预定电压范围内扫描之后来执行计算。在另一实施例中,在每个电压阶跃执行计算。

[0067] 在步骤3,将针对每个阶跃所计算的电流对输入电压的梯度(即斜坡)与预定阈值(即 $\Delta I_{REF}$ )相比较。

$$[0068] \quad \Delta I_c \leq \Delta I_{REF} ? \quad (\text{公式2})$$

[0069]  $\Delta I_{REF}$ 值可以基于具体应用的需求。例如,当次级不存在负载时( $\Delta I_{STDBY}$ ), $\Delta I_{REF}$ 与初级单元的增量电流消耗越接近,则操作点越精确。不过,如果 $\Delta I_{REF}$ 值过于接近 $\Delta I_{STDBY}$ (即在系统的误差之内),则可能获得错误的操作点。可以通过对系统进行初始校准并找出最优效率的可靠和可接受的值,来设置 $\Delta I_{REF}$ 值。例如可以基于 $\Delta I_{STDBY}$ 并带有足够裕量来设置该值,以将次级单元不带负载时初级单元电流的最坏情况固有变动纳入考虑。换言之,将阈值设置为大于初级单元和至少一个次级单元中的固有随机偏差、重复动态变化和系统误差。

[0070] 例如,为了使系统中的随机偏差和其它系统误差不造成影响,考虑初级和次级固有效率。这是为了确保梯度(即斜坡)上的变化足够显著以便于检测,从而不构成系统的固有误差。由此,在设计良好的系统中,在每个最优点将最大功率传递至次级单元的负载,而不是被无线功率传递系统中的低效率因素耗散。

[0071] 如果 $\Delta I_c > \Delta I_{REF}$ ,则初级单元的最优电源电压尚未达到。不过,对于具有单个次级单元的系统, $\Delta I_c > \Delta I_{REF}$ 的第一种情况(instance)表示次级单元已经实现了其负载稳压,并且初级单元到达了最优电源电压。注意,这种确定不使用来自次级单元的直接反馈。

[0072] 在一个实施例中,即使梯度改变的点表示最优操作状态,在实际实现中电源电压也可以设置为略超过该点。例如,其可以在梯度改变的点之上一个电压阶跃,或者在梯度改变的点之上一个固定但可编程的水平。这是为了确保任何随机偏差和负载电流上的略微变

化不会导致接收器电路立即脱离稳压。

[0073] 步骤4处在建立最优电源电压之后。在一个实施例中，电压步进暂停预定时间( $T_d$ )。在一个实施例中，通过找到确保特定系统在次级单元的输出处维持稳压并且在大部分时间里维持以最优功率效率点操作的系统最小频率，来设置 $T_d$ 。换句话说，考虑接收器负载能够多快地变化以及初级单元响应于负载变化的可接受延迟是多少来设置 $T_d$ 。关于这一点，可以考虑发射器和接收器电路的稳定速度。

[0074] 在步骤5，在经过 $T_d$ 后，电源电压连续步降。在一个示例中，步降大小与步进大小相同。在另一实施例中，步降大小小于步进大小。在又一实施例中，每当电压步进方向改变时降低阶跃大小。

[0075] 在每次步降之后将电流值记录到存储器中。确定新的电流值( $I_0$ )和先前电流值( $I_1$ )之差。针对每个电压阶跃确定电流对电压的梯度并存储在存储器中。该值与预定阈值进行比较。在一个实施例中，该预定阈值与步进时使用的预定阈值相同。

[0076] 如果 $\Delta I_c \leq \Delta I_{REF}$ ，则未达到初级单元的最优电源电压，继续进行电压步降。不过， $\Delta I_c > \Delta I_{REF}$ 的第一种情况表明了最优点就在附近。

[0077] 在步骤6，电压再次步进，并以步骤1继续循环。

[0078] 前面的示例方法对无线功率传递系统的初级单元的最优电压值进行持续调节，而无需来自次级单元的直接反馈。因此，仅将足够的功率传递至次级单元，以实现负载电压的适当稳压。此外，随着负载的变化，系统自动为初级单元调节至适当的电压水平，以有效地将功率传递至次级单元。

[0079] 前述方法为了简明起见基本上只讨论单个次级单元的情况，但本发明的概念可以扩展为包括多个接收器线圈(如通过单个初级单元供电的数个次级单元)。例如，如果每个次级单元针对各自的负载使其输出电压(电流)稳压，则可以对初级单元使用基本上类似的方法来检测使所有接收器电路稳压的点。多个梯度(即斜坡)变化可以在发射器电路电源电流上可见。因此，初级单元的输入电压在梯度变化的最后一个点(或者该点加上另外的一个电压阶跃)处稳压。下面的说明进一步论述此概念。

[0080] 图14例示了当无线功率传递系统中的 $N(N>1)$ 个次级单元耦合至单个初级单元时如何确定最优电压点的示例。图14提供了电流( $I$ )如何随着电压( $V$ )的增加而变化的简化图，其中所述电流和电压值是在无线功率传递系统的初级单元中。这些步骤与具有单个次级单元的情况类似，除了是在最后一次梯度变化处确定最优点(即此示例中为2)。注意， $N$ 个不同接收器中的两个或更多个可以同时实现稳压。由此可能观察到少于 $N$ 个梯度变化。

[0081] 例如，在开始时(即步骤1)，输入电压以预定的阶跃大小斜坡升高。在每个样本(即电压阶跃)中，确定初级单元的电流消耗。将此电流值记录在存储器中。

[0082] 在步骤2，确定第一电流值( $I_1$ )和原始电流值( $I_0$ )之差。针对每个电压阶跃确定电流对电压的梯度，并存储在存储器中。

[0083]  $\Delta I_c = (I_1 - I_0)$  (公式3)

[0084] 将该值与预定第一阈值(即 $\Delta I_{REF}$ )进行比较。

[0085]  $\Delta I_c \leq \Delta I_{REF}?$  (公式4)

[0086] 例如，如果 $\Delta I_c > \Delta I_{REF}$ ，则未达到多个次级单元的最优电源电压。梯度值改变但保持 $\Delta I_c > \Delta I_{REF}$ 状态的第一种情况表明至少一个次级单元的最优电源电压尚未达到。不过，

由于存在额外的次级单元,因此初级单元的电压继续斜坡升高。

[0087] 在步骤3,当最终满足 $\Delta I_c \leq \Delta I_{REF}$ 的条件时,初级单元达到最优电源电压。无需来自任何次级单元的任何直接反馈即可确定最优操作点。在一个实施例中,预定的第二阈值与第一阈值相同。

[0088] 步骤4处在N个次级单元已经建立最优电源电压之后。在一个示例中,电压步进暂停(即保持在相同电压)预定的时间( $T_d$ )。

[0089] 在步骤5,在经过 $T_d$ 后,电源电压继续步降。在一个实施例中,步降大小等于步进大小。在另一实施例中,步降大小小于步进大小。在又一实施例中,每当电压步进的方向改变时降低阶跃大小,以提供更精细的分辨率,直到到达最小的阶跃大小。

[0090] 在每次步降之后,将电流值记录在存储器中。确定新的电流值( $I_0$ )和前一电流值( $I_1$ )之差。针对每个电压阶跃确定电流对电压的梯度,并存储在存储器中。将该值与预定第三阈值(即 $\Delta I_{REF3}$ )进行比较。在一个实施例中,该预定第三阈值与步进期间使用的第二阈值相同。如果 $\Delta I_c \leq \Delta I_{REF3}$ ,则未达到初级单元的最优电源电压,继续进行电压步降。不过, $\Delta I_c > \Delta I_{REF3}$ 的第一种情况表明了最优点就在附近。

[0091] 在步骤6,电压再次步进,并以步骤1继续循环。

[0092] 前面的示例方法对无线功率传递系统的初级单元的最优电压值进行持续调节,而无需来自次级单元的直接反馈。尽管对在斜坡降低之前进行斜坡上升的情况进行了描述,但同样的概念可以应用于使用斜坡降低然后斜坡上升的情况。

[0093] 图15例示了如何使用二值搜索来确定最优电压点的示例。其提供了电流(I)在不同的电压(V)水平下变化的简化图,其中所述电流和电压值是在无线功率传递系统的初级单元中。

[0094] 例如在开始时(步骤1),将输入电压设置为变量 $V_{min}$ (即此示例中为0V)。此电压以预定的电压阶跃增加。例如,该电压阶跃可以是1V。与前述相同,针对施加的每个输入电压确定电流消耗并记录在存储器中。

[0095] 在步骤2,确定第一电流值( $I_1$ )和原始电流值( $I_0$ )之差。针对每个电压阶跃确定电流对电压的梯度,并存储在存储器(即 $\Delta I_c$ 变量中)。

[0096]  $\Delta I_1 = (I_1 - I_0)$  (公式5)

[0097] 在步骤3将 $\Delta I_c$ 与第一基准斜坡(即 $\Delta I_{ref}$ )进行比较。如果 $\Delta I_c$ 小于等于预编程的值( $\Delta I_{ref}$ ),则不存在负载。这种情况下的最优电源电压为 $V_{min}$ 。由此,电压步进暂停预编程的时间( $T_d$ )。当 $T_d$ 期满后,该方法返回步骤1。

[0098] 如果 $\Delta I_c$ 大于 $\Delta I_{ref}$ ,则表明最优输入电压还未到达,并且该方法继续下面的步骤4。

[0099] 在步骤4,电源电压变成 $[V_{max}-1]$  V。例如, $V_{max}$ 代表初级单元的最大电源电压。在图15的示例中为18V。

[0100] 对电流值( $I_0$ )进行采样并存储。接下来将电源电压变成 $V_{max}$ 。还对此电压的电流值( $I_1$ )进行采样并存储。计算等于 $[I_1 - I_0]$ 的新的梯度(此示例中为 $\Delta I_2$ )。存储第二斜坡(例如存储在 $\Delta I_c$ 变量中)。

[0101] 在步骤5,将 $\Delta I_c$ 与 $\Delta I_{ref}$ 进行比较。如果 $\Delta I_c$ 大于 $\Delta I_{ref}$ ,则最优电压是发射器的最大电源电压。输入电压设置为 $V_{max}$ , $T_d$ 计数器开始。一旦 $T_d$ 期满,则该方法返回步骤1。

[0102] 不过,如果 $\Delta I_c$ 小于或等于 $\Delta I_{ref}$ ,设置 $\Delta I_{min}=\Delta I_c$ ,则最优输入电压还未到达,该方法继续下面的方法6。

[0103] 在步骤6,电源电压变成下式:

$$[0104] \quad V_{SUPPLY}=(V_{low}+V_{high})/2 \quad (\text{公式6})$$

[0105] 在上面的公式6, $V_{low}$ 是初始化为 $V_{min}$ 的变量, $V_{high}$ 初始化为 $V_{max}$ 。对 $V_{SUPPLY}$ 的电流值( $I_0$ )进行采样并存储。接下来将 $V_{SUPPLY}$ 增加预定量(例如1V)并再次采样电流( $I_1$ )。

[0106] 在步骤7,计算当前电压处的梯度(如 $\Delta I_3$ )。

$$[0107] \quad \Delta I_3=(I_1-I_0) \quad (\text{公式5})$$

[0108] 以新的梯度来更新 $\Delta I_c$ 变量。

[0109] 在步骤8,确定 $\Delta I_c$ 是否大于 $\Delta I_{min}$ 并小于等于 $\Delta I_{ref}$ 。如果确定,则该方法继续下面的步骤10。否则该方法继续下面的步骤9。

[0110] 在步骤9,将计算的 $\Delta I_c$ 与 $\Delta I_{min}$ 和 $\Delta I_{ref}$ 进行比较。如果 $\Delta I_c$ 大于 $\Delta I_{ref}$ ,则最优电源电压处在电压 $V_{SUPPLY}$ 和 $V_{high}$ 之间。因此将 $V_{low}$ 设置为当前的电源电压( $V_{SUPPLY}$ )。

[0111] 不过,如果 $\Delta I_c$ 小于或等于 $\Delta I_{min}$ ,则最优电源电压处在电压 $V_{SUPPLY}$ 和 $V_{high}$ 之间。因此将 $V_{high}$ 设置为当前的电源电压( $V_{SUPPLY}$ )。

[0112] 针对 $V_{low}$ 和 $V_{high}$ 的新值重复步骤6至8。

[0113] 步骤10代表退出条件。这是因为到达了最优电源电压。电压步进暂停预编程的时间( $T_d$ ) (即保持在恒定电压)。一旦 $T_d$ 期满,则该方法继续步骤1,从而连续地调节至最优输入电压水平。

[0114] 尽管针对单个斜坡变化描述了前述方法,但本领域技术人员能够容易地理解还可以支持多种斜坡变化(即多个次级单元)。例如,可以对 $\Delta I_{ref}$ 编程以使该值处在 $\Delta I_{min}$ 和IV曲线的第二最低斜坡之间。

[0115] 除非另外指明,此说明书中提出的包括在下面的权利要求中的所有度量、值、比率、位置、幅度、大小和其他规格均为近似的而非精确的。它们应当具有与所涉及的功能相关的合理范围,并且是所涉及领域的常用选择。

[0116] 本公开所引用的所有论文、专利、专利申请及其他公开均通过引用并入本文。

[0117] 权利要求中使用的表述“用于……的装置”意为并应当理解为包括所描述的相应结构和材料及其等价物。类似地,权利要求中使用的表述“用于……的步骤”意为并应当理解为包括所描述的相应动作及其等价部分。权利要求中这些表述的缺失意味着该权利要求不是意为并不应当理解为限制于任何相应的结构、材料、动作或其等价物。

[0118] 保护范围仅由后面的权利要求限定。该范围意为并应当理解为结合说明书和后面的诉讼历史所理解的权利要求中所用语言的普通含义的范围相一致,并且包括所有等同结构和功能。不过,这些权利要求不包括违反专利法第101、102或103节的要求的主题,也不应理解为包括这些主题。本文不保护任何非本意包含的这些主题。

[0119] 除了上面所述,无论是否记录在权利要求中,所声明或例示的内容并不意在或不理解应为将任何部件、步骤、特征、对象、益处、优点或等价物公之于众。

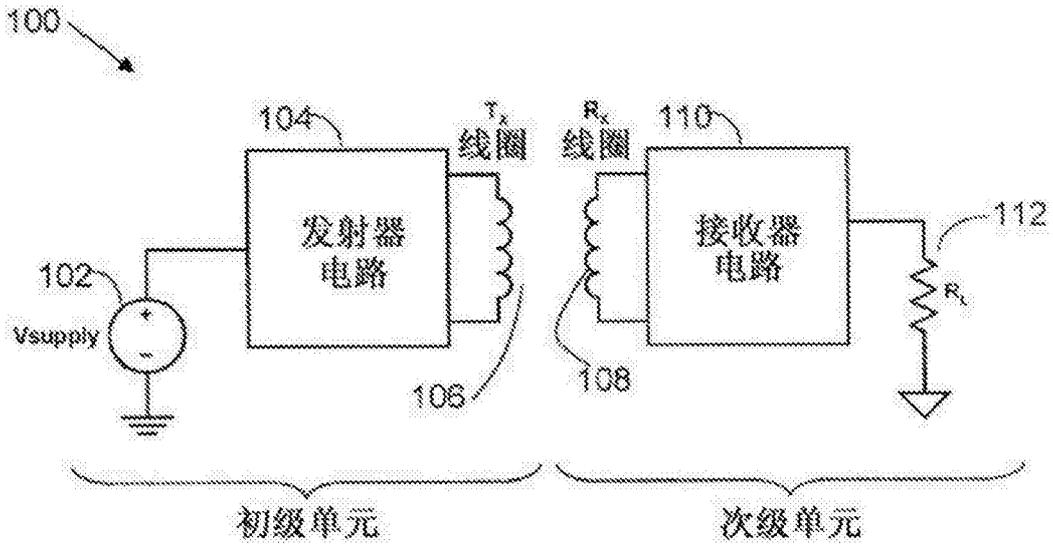


图1

在次级输出电压被固定电阻性负载稳压的情况下发射器电路电源电流对电源电压的关系图

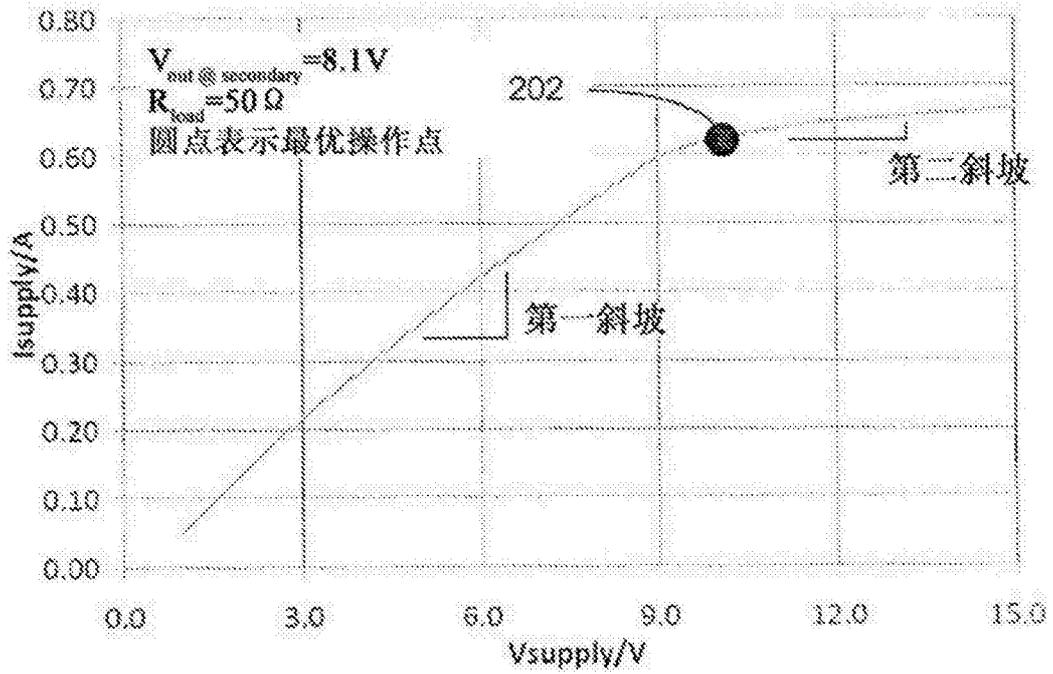


图2

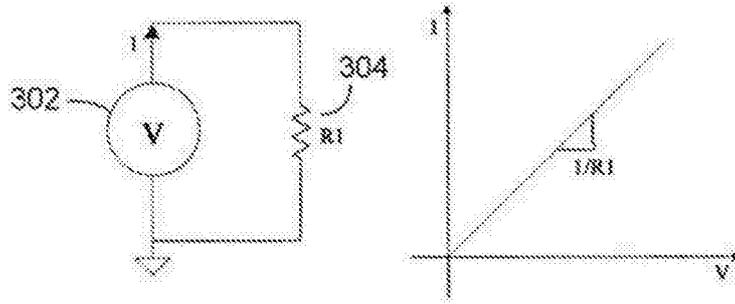


图3

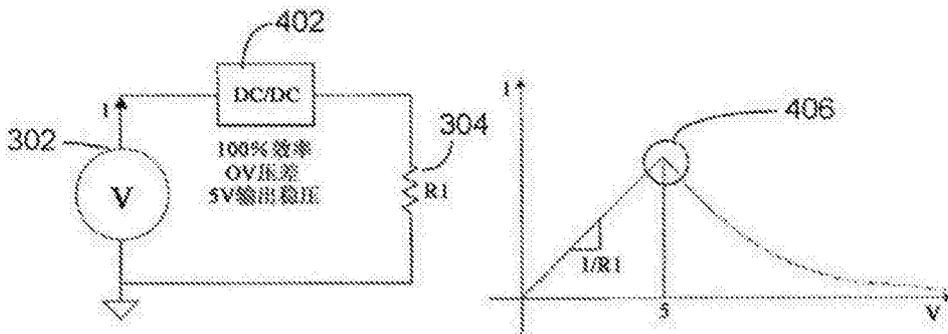


图4

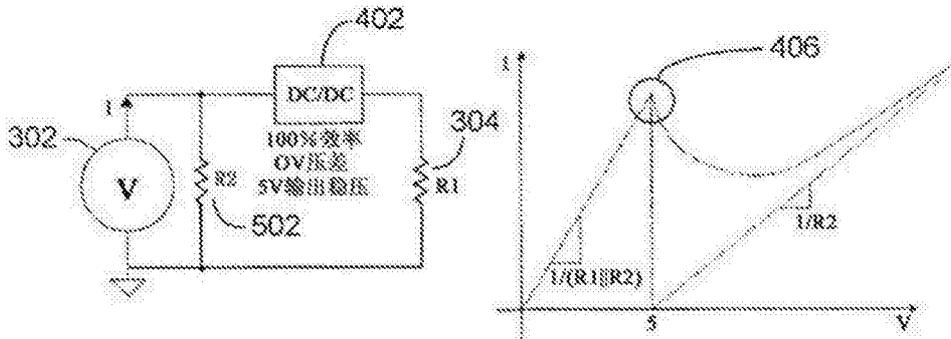


图5

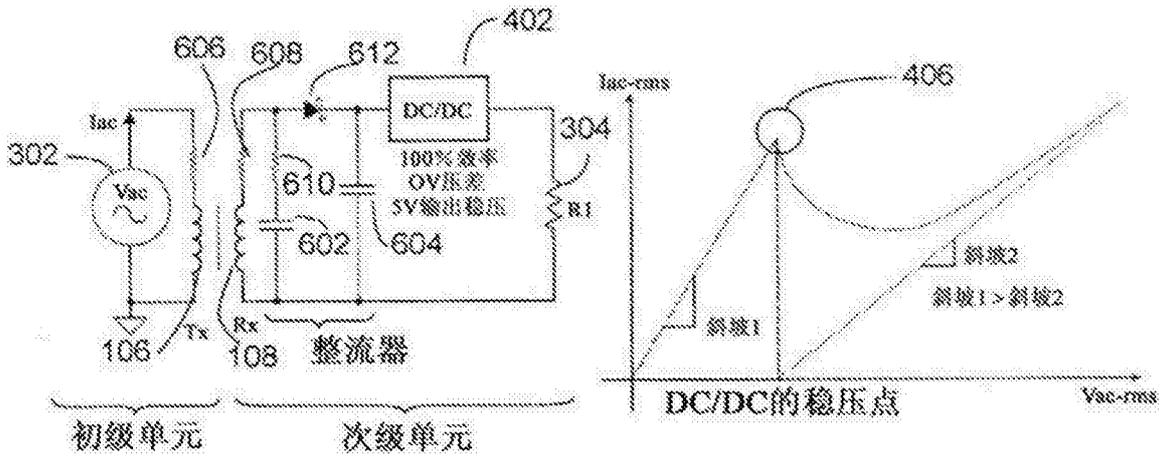


图6

各种次级电阻性负载情况下的发射器  
电路电源电流对电源电压的关系图

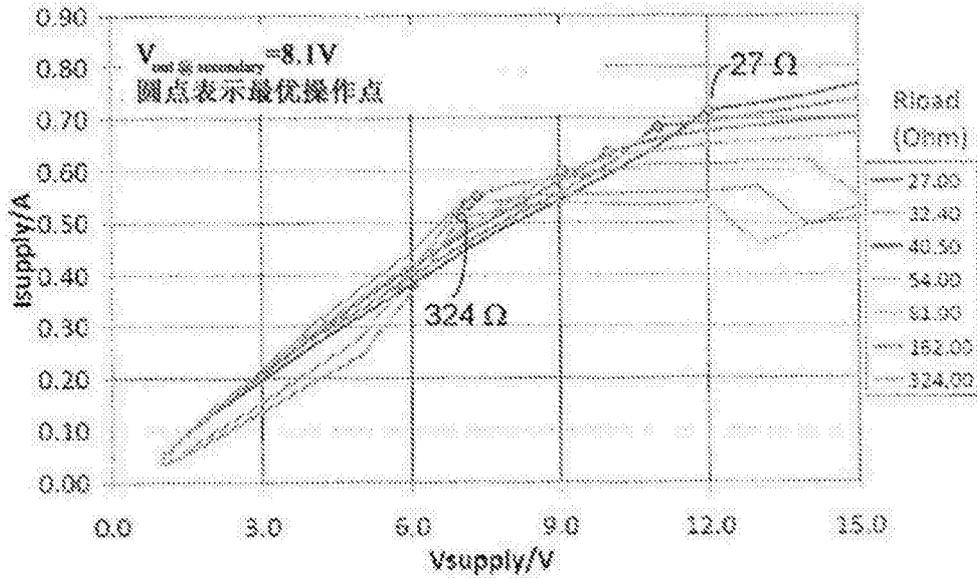


图7

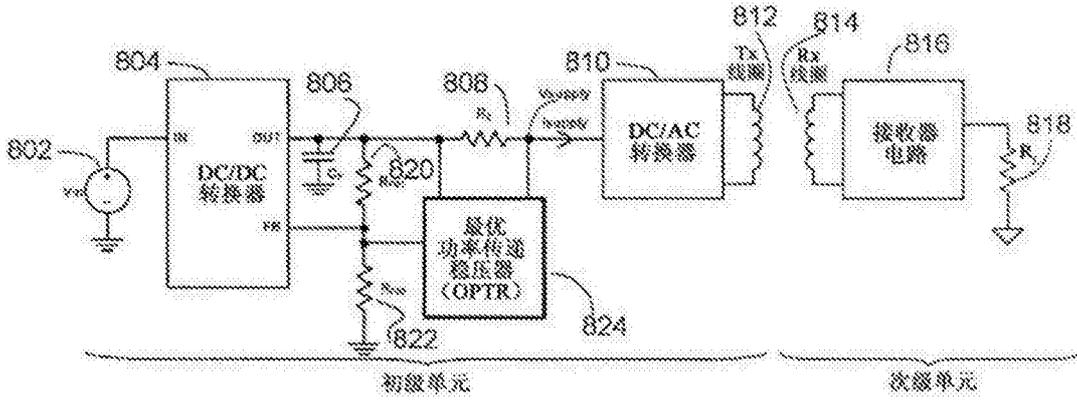


图8

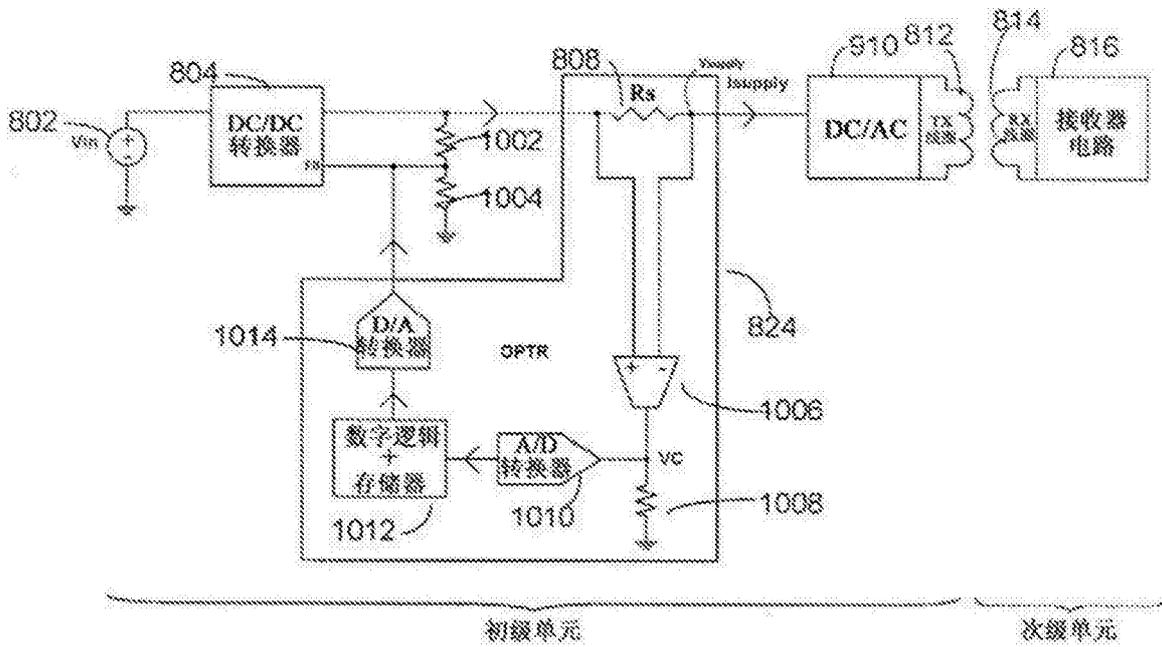


图9

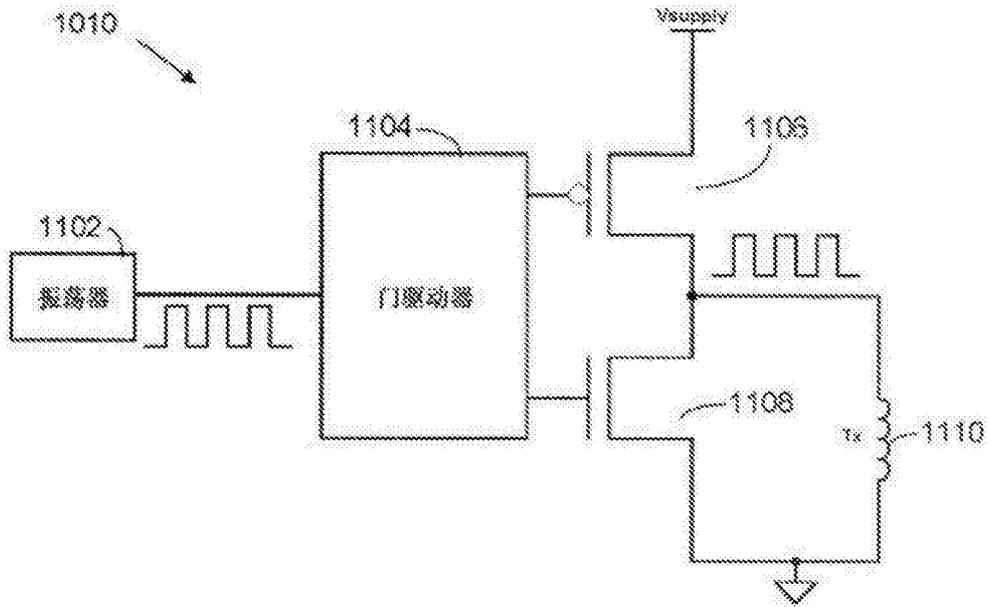


图10

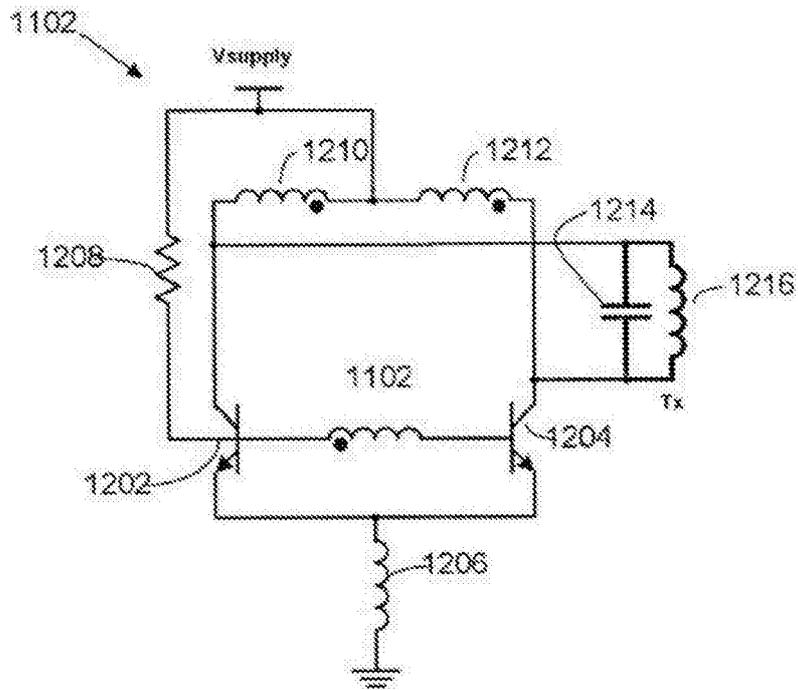


图11

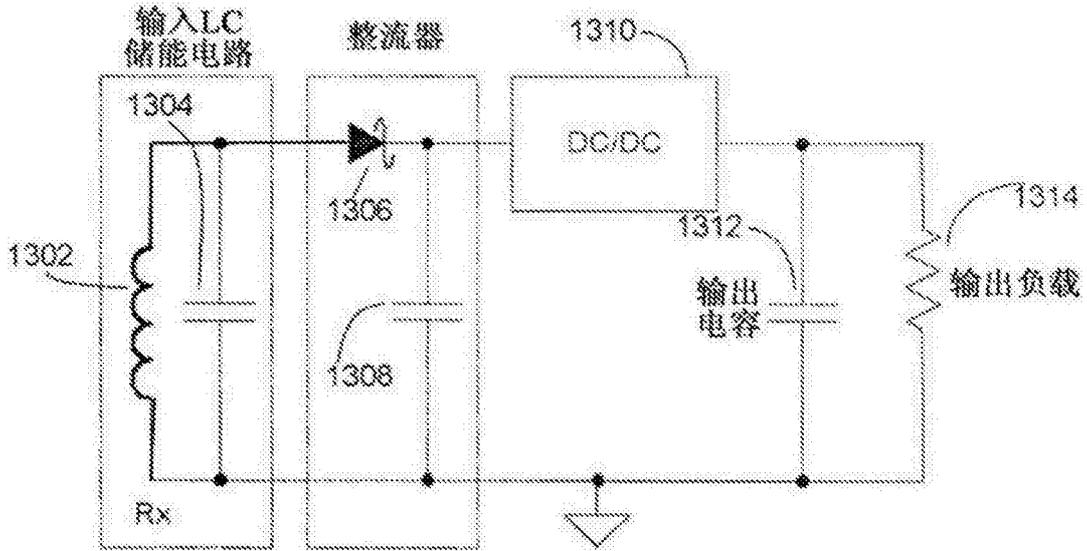


图12A

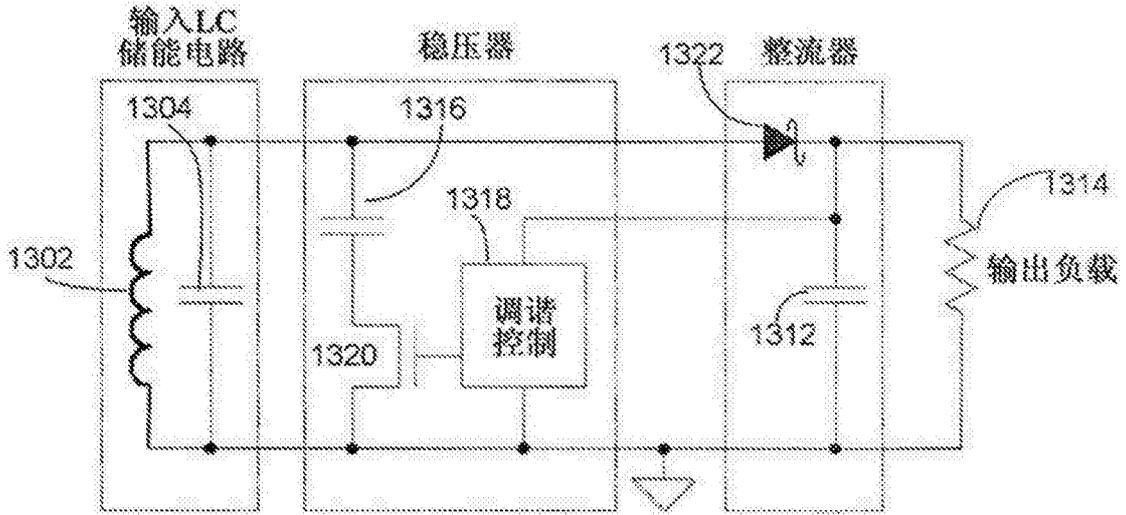


图12B

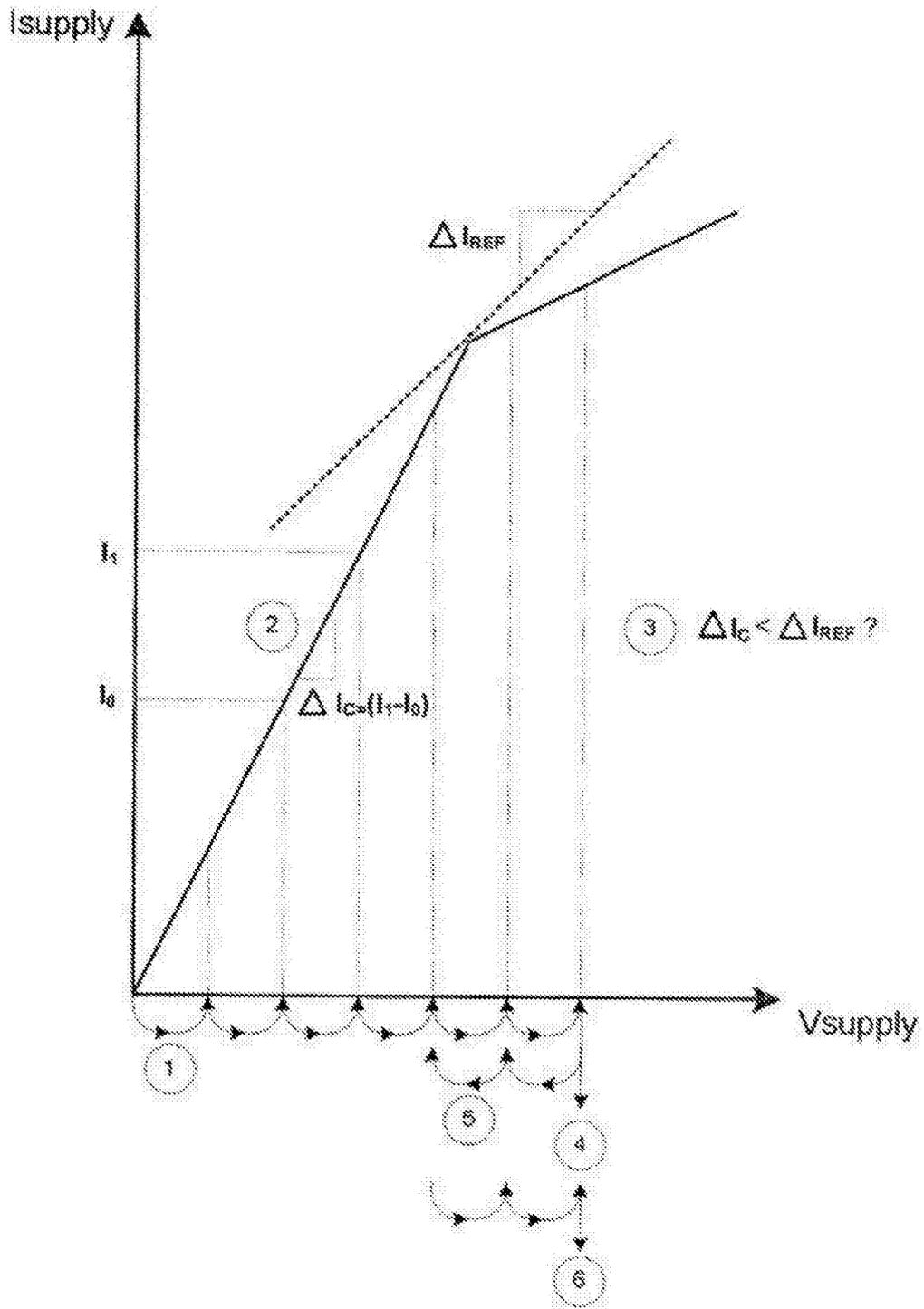


图13



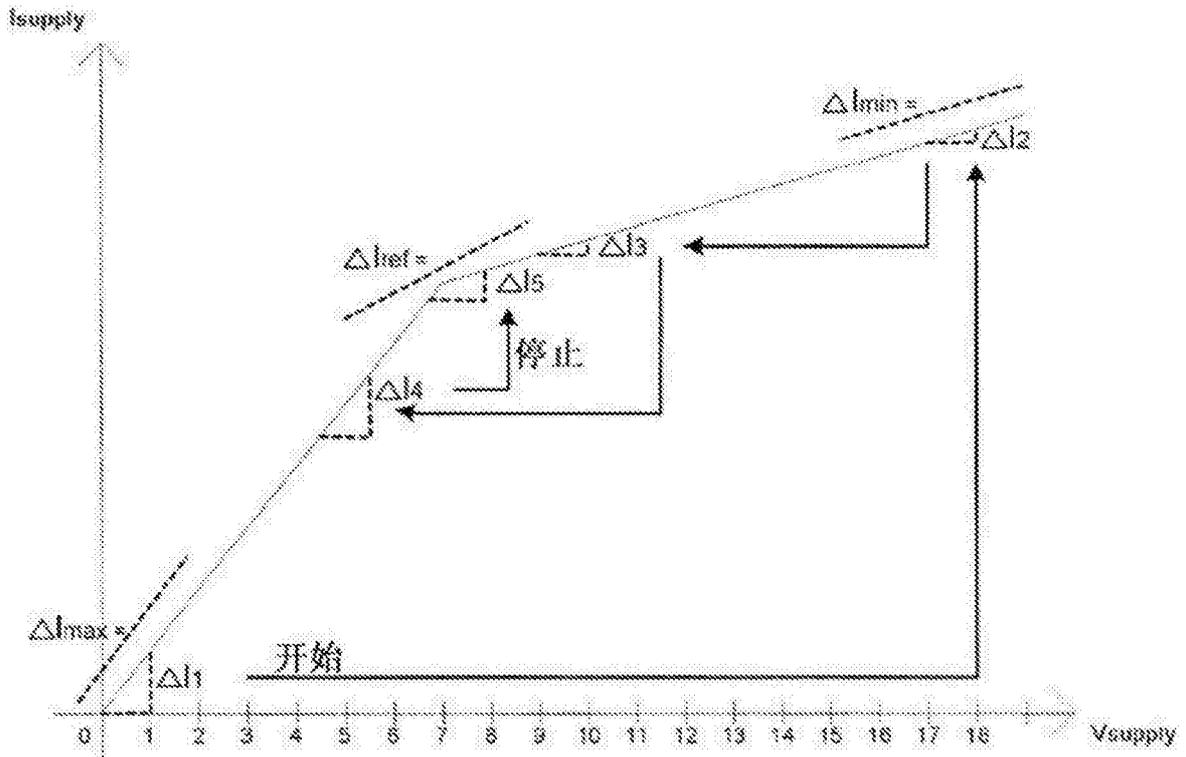


图15