

[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 01800175.0

[43] 公开日 2002 年 8 月 7 日

[11] 公开号 CN 1363136A

[22] 申请日 2001.1.30 [21] 申请号 01800175.0

[30] 优先权

[32]2000.2.7 [33]US [31]09/499,836

[86] 国际申请 PCT/CN01/00103 2001.1.30

[87] 国际公布 WO01/59917 英 2001.8.16

[85] 进入国家阶段日期 2001.10.22

[71] 申请人 香港大学

地址 中国香港

[72] 发明人 F·N·K·潘 B·M·H·庞

J·C·P·廖

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

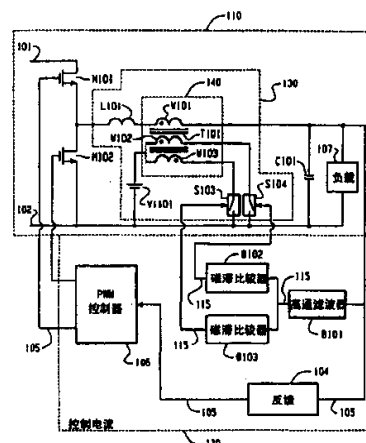
代理人 陈 霁 傅 康

权利要求书 9 页 说明书 15 页 附图页数 11 页

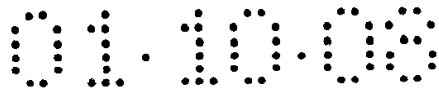
[54] 发明名称 用于开关变换器的快速瞬态响应的阶跃电感器

[57] 摘要

本发明公开了一种快速瞬态响应电力变换器,该电力变换器使用一个可变电感器以便在快速瞬态状态下加速变换器的输出电压响应。在一个开关变换器中的电感元件可以由两个串联或并联连接的电感元件来代替,其中一个电感元件具有一个较小的电感值而另一个电感元件具有较大的电感值。在快速瞬态状态期间,总的电感被显著地减小了以便在瞬态状态期间允许迅速的电流变化。



ISSN 1008-4274



权 利 要 求 书

1. 一个电力变换器, 包括:

一种用于接收输入功率的输入;

一个用于提供稳压输出功率的输出;

5 一个连接在输入和输出之间的可变电感装置, 所述可变电感装置具有一个较高电感状态和一个较低电感状态, 所述可变电感装置可控制地在所述较高电感状态与所述较低电感状态之间转换; 和

10 一个控制电路, 该控制电路能够检测输出上的电压并且能够给所述可变电感装置提供信号, 以便响应在输出电压中的偏差使可变电感装置从一个所述电感状态转换到所述其它电感状态。

2. 根据权利要求1的电力变换器, 其特征是所述可变电感装置包括一个固定电感部分和一个可变电感部分, 所述可变电感部分与所述固定电感部分串联连接, 所述可变电感部分包括一个具有多个线圈的变压器。

15 3. 根据权利要求2的电力变换器, 其特征是所述变压器有三个线圈。

4. 根据权利要求2的电力变换器, 其特征是所述变压器的第一线圈与所述固定电感部分串联连续。

20 5. 根据权利要求4的电力变换器, 其特征是还包括一个与所述变压器的第二线圈和一个第一开关串联连接的附加电源。

6. 根据权利要求5的电力变换器, 其特征是所述附加电源与所述变压器的第三线圈和一个第二开关串联连接。

7. 根据权利要求5的电力变换器, 其特征是所述附加电源与所述输入电源连接。

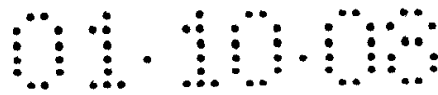
25 8. 根据权利要求5的电力变换器, 其特征是所述附加电源与所述输出连接。

9. 一种电力变换器, 包括:

一种用于接收输入功率的输入;

一个用于提供稳压输出功率的输出;

30 一个连接在输入和输出之间的可变电感装置, 所述可变电感装置具有一个较高电感状态和一个较低电感状态, 所述可变电感装置可控制地在所述较高电感状态与所述较低电感状态之间转换; 所述可变电



感装置还包括:

一个较低电感元件;

一个与所述较低电感元件串联连接的开关, 从而形成一个开关与较低电感元件的串联结构; 和

5 一个与所述开关和较低电感元件的串联结构并联连接的较高电感元件; 和

其中所述开关能够在所述较低电感状态和所述较高电感状态之间转换所述可变电感装置, 和

10 一个控制电路, 该控制电路能够检测输出上电压并且能够给所述可变电感装置提供信号, 以便响应检测的输出电压使可变电感装置从一个所述电感状态转换到所述其它电感状态。

10. 根据权利要求9的电力变换器, 其特征是所述控制电路包括一个第一比较器, 所述第一比较器能够检测所述输出上的电压并且给所述可变电感装置提供信号以便根据检测的输出电压使所述可变电感装置从所述高电感状态转换到所述低电感状态。

11. 根据权利要求10的电力变换器, 其特征是所述控制电路包括一个第二比较器, 所述第二比较器能够检测所述输出上的电压并且给所述可变电感装置提供信号以便根据检测的输出电压使所述可变电感装置从所述低电感状态转换到所述高电感状态。

20 12. 根据权利要求11的电力变换器, 其特征是还包括:

一个与所述开关连接的脉冲宽度调制控制器, 所述脉冲宽度调制控制器能够给所述开关提供信号以便在所述较低电感状态与所述较高电感状态之间转换所述可变电感装置。

13. 一种装置包括:

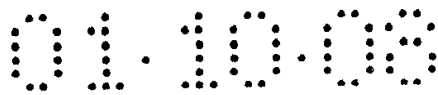
25 一种用于接收输入功率的输入;

一个用于提供稳压输出功率的输出;

一个与所述输出连接以便接收稳压输出功率的电负载;

30 一个连接在输入和输出之间的可变电感装置, 所述可变电感装置具有一个较高电感状态和一个较低电感状态, 所述可变电感装置可控地在所述较高电感状态与所述较低电感状态之间转换; 和

一个控制电路, 该控制电路能够检测输出上电压并且能够给所述可变电感装置提供信号, 以便响应在输出电压中的一个偏差使可变电



感装置从一个所述电感状态转换到所述其它电感状态。

14. 根据权利要求13的装置，其特征是所述可变电感装置包括一个固定电感部分和一种可变电感部分，所述可变电感部分与所述固定电感部分串联连接。所述可变电感部分还包括一个具有多个线圈的变
5 压器。

15. 根据权利要求14的的装置，其特征是所述变压器有三个线圈。

16. 根据权利要求14的装置，其特征是所述变压器的第一线圈与所述固定电感部分串联连续。

17. 根据权利要求16的装置，其特征是还包括一个与所述变压器的第二线圈和一个第一开关串联连接的附加电源。
10

18. 根据权利要求17的装置，其特征是所述附加电源与所述变压器的第三线圈和一个第二开关串联连接。

19. 根据权利要求17的装置，其特征是所述附加电源与所述输入
15 电源连接。

20. 根据权利要求17的装置，其特征是所述附加电源与所述输出连接。

21. 根据权利要求13的装置，其特征是所述可变电感装置包括：
一个较低电感元件；

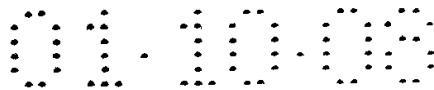
20 一个与所述较低电感元件串联连接的开关，从而形成一个开关与较低电感元件的串联结构；和

一个与所述开关和较低电感元件的串联结构并联连接的较高电感元件；和

其中所述开关能够在所述较低电感状态和所述较高电感状态之
25 间转换所述可变电感装置

22. 根据权利要求21的装置，其特征是所述控制电路包括一个第一比较器，所述第一比较器能够检测所述输出上的电压并且给所述可变电感装置提供信号以便根据检测的输出电压使所述可变电感装置从所述高电感状态转换到所述低电感状态。

23. 根据权利要求22的电力变换器，其特征是所述控制电路包括一个第二比较器，所述第二比较器能够检测所述输出上的电压并且给所述可变电感装置提供信号以便根据检测的输出电压使所述可变电
30



感装置从所述低电感状态转换到所述高电感状态。

24. 根据权利要求23的装置，其特征是还包括：

5 一个与所述开关连接的脉冲宽度调制控制器，所述脉冲宽度调制控制器能够给所述开关提供信号以便在所述较低电感状态与所述较高电感状态之间转换所述可变电感装置。

25. 一种开关电力变换器装置，包括：

一个提供开关电压脉冲的装置的第一结点；

一个第一电感器；

10 一个具有多个彼此磁耦合的线圈的第一变压器，所述变压器包括一个与所述第一电感器连接的第一线圈，一种第二线圈和一种第三线圈；

一个电压源；

一个与所述第二线圈连接并且能够把电压由所述电压源提供给所述第二线圈的第一开关；

15 一个与所述第三线圈连接并且能够把电压由所述电压源提供给所述第三线圈的第二开关；

一个第一控制电路，该控制电路能够使所述第一开关把所述电压由所述电压源提供给所述第二线圈；

20 一个第二控制电路，该控制电路能够使所述第二开关把所述电压由所述电压源提供给所述第三线圈；

一个单元，该单元包括所述第一电感器和第一变压器，并且与提供开关电压脉冲的所述第一结点连接；

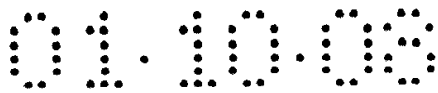
一个与所述单元和所述变换器的一个返回结点连接的输出电容器；

25 与所述输出电容器连接的输出端，用于连接一个负载；和

一个过电压保护电路，该过电压保护电路能够防止所述第一和第二开关过电压。

26. 根据权利要求25的装置，其特征是还包括用于监视所述输出端上变换器负载电压的装置；和

30 其中当所述负载电压下降到低于一个第一电压电平时，所述第一控制装置能够使所述第一开关把所述电压由所述电压源提供给所述第二线圈，当所述负载电压超越一个大于所述第一电压电平的第二电



压电平时，所述第一控制装置能够使所述第一开关把所述电压源与第二线圈断开；和

其中当所述负载电压超过一个第三电压电平时，所述第二控制装置能够使所述第二开关把所述电压源与所述第三线圈连接，当所述负载电压下降到低于所述第三电压电平的第四电压电平时，所述第二控制装置还能够使所述第二开关把所述电压源与第三线圈断开；和
5 所述第三和第四电压电平大于所述第一和第二电压电平。

27. 一种开关电力变换器装置，包括：

一对用于与一个直流电压源连接的输入端，所述输入端中的第一
10 输入端是一个正端而所述输入端的第二输入端是一个负端；

一个提供开关电压脉冲的装置的第一结点；

一个第一电感器；

一个具有多个彼此磁耦合的线圈的第一变压器，所述线圈包括一个与
15 所述第一电感器连接的第一线圈，一个第二线圈和一个第三线圈；

一个与所述第二线圈连接的第一开关；

一个与所述第三线圈连接的第二开关；

一个单元，该单元包括所述第一电感器和第一变压器，并且与提供
20 开关电压脉冲的所述第一结点连接；

一个与所述单元和所述变换器的一个返回结点连接的输出电容器；

一对输出端，所述输出端中的第一端是一个正端而所述输出端中的
25 第二端是一个负端，该对输出端与用于给一个负载提供一个连接点的所述输出电容器连接；

一个第一控制电路，该控制电路能够使所述第一开关把所述第二
线圈与所述输出电容器连接；

一个第二控制电路，该控制电路能够使所述第二开关把所述第三
线圈与所述输出电容器连接；和

一个过电压保护电路，该过电压保护电路能够防止所述第一和第二
30 开关过电压。

28. 根据权利要求27的装置，其特征是所述过电压保护电路包括：

一个第一二极管，它的阴极与所述正输入端连接和它的阳极与所述第二线圈和所述第一开关的连接节点连接；和

一个第二二极管，它的阴极与所述正输入端连接和它的阳极与所述第三线圈和所述第二开关的连接节点连接。

5 29. 根据权利要求27的装置，其特征是所述过电压保护电路包括：

一个第一二极管，它的阳极与所述第一电感器和所述第一变压器线圈的连接节点连接和它的阴极与所述正输入端连接；和

10 一个第二二极管，它的阳极与所述负输入端连接和它的阴极与所述第一二极管的所述阳极连接。

30. 根据权利要求27的装置，其特征是还包括用于监视所述输出端上变换器负载电压的装置；和

15 其中当所述负载电压下降到低于一个第一电压电平时，所述第一控制电路能够使所述第一开关把所述第二线圈与所述输出电容器连接起来，当所述负载电压超越一个大于所述第一电压电平的第二电压电平时，所述第一控制电路同样地能够使所述第一开关把所述第二线圈与所述输出电容器断开；和

20 其中当所述负载电压超过一个第三电压电平时，所述第二控制电路能够使所述第二开关把所述第三线圈与所述输出电容器连接起来，当所述负载电压下降低于一个小于所述第三电压电平的第四电压电平时，所述第二控制电路能够使所述第二开关把所述第三线圈与所述输出电容器断开；和

所述第三和第四电压电平大于所述第一和第二电平。

31. 根据权利要求30的装置，其特征是还包括：

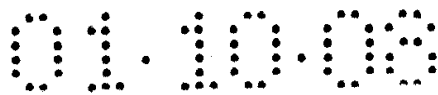
25 用于只有当一个高脉冲被耦合至所述第一电感器时才把所述第一开关转换到一个导通状态的装置；

用于只有当一个低脉冲电压被耦合到所述第一电感器时才把所述第二开关转换到导通状态的装置；

32. 一种开关电力变换器装置，包括：

30 一对用于与一个直流电压源连接的输入端，所述输入端中的第一输入端是一个正端而所述输入端的第二输入端是一个负端；

该装置的一个第一结点，该结点提供具有一个高电压电平和一个



低电压电平的开关电压脉冲;

一个与所述第一节点连接的第一电感器;

一个与一个第一串联开关连接的第二电感器, 从而形成一个电感器串联开关电路结构, 所述电路结构与所述第一电感器并联连接;

5 一个第一二极管, 它的阴极与所述正输入端连接和它的阳极与所述第二电感器和所述第一串联开关的连接节点连接;

一个第二二极管, 它的阳极与所述负输入端连接和它的阴极与所述第二电感器和所述第一串联开关的连接节点连接;

10 一个控制电路, 该控制电路能够使所述第一串联开关把所述第二电感器与所述第一电感器并联连接;

一个与第一电感器和该变换器的一个返回结点连接的输出电容器;

一对与所述输出电容器连接的输出端, 用于为一个负载提供一个连接点; 和

15 一个过电压保护电路, 该过电压保护电路能够防止所述第一开关过电压。

33. 根据权利要求32的装置, 其特征是还包括用于监视所述输出端上变换器负载电压的装置; 和

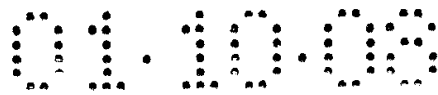
20 其中当所述负载电压下降到低于一个第一电压电平时, 所述控制电路能够使所述第一串联开关把所述第二电感器与所述第一电感器并联连接, 当所述负载电压超过一个大于所述第一电压电平的第二电压电平时, 所述控制电路同样地能够使所述第一串联开关把所述第二电感器与所述第一电感器断开, 当所述负载电压超越一个第三电压电平时, 所述控制电路还能够使所述第一串联开关把所述第二电感器与
25 所述第一电感器并联连接, 当所述负载电压下降到低于一个比所述第三电压电平还低的第四电压电平时, 所述控制电路同样地能够使所述第一串联开关把所述第二电感器与所述第一电感器断开; 和

所述第三和第四电压电平是大于所述第一和第二电压电平。

34. 根据权利要求33的装置, 其特征是还包括:

30 用于只有当一个高脉冲被耦合至所述第一电感器时才把所述第一串联开关转换到一个导通状态的装置;

用于只有当一个低脉冲电压被耦合到所述第一电感器时才把所



述第一串联开关转换到一个关断状态的装置；

35. 根据权利要求1的电力变换器，其特征是所述控制电路包括一个第一比较器，所述第一比较器能够检测所述输出上的电压并且给所述可变电感装置提供信号以便根据检测的输出电压使所述可变电感装置从所述高电感状态转换到所述低电感状态。

36. 根据权利要求35的电力变换器，其特征是所述控制电路包括一个第二比较器，所述第二比较器能够检测所述输出上的电压并且给所述可变电感装置提供信号以便根据检测的输出电压使所述可变电感装置从所述低电感状态转换到所述高电感状态。

37. 根据权利要求36的电力变换器，其特征是还包括：

与所述可变电感装置连接的开关装置，所述开关装置具有一个第一状态和一个第二状态，当在所述第一状态时所述开关装置能够允许把输入功率提供给可变电感装置，当在所述第二状态时所述开关装置能够阻挡输入功率流入到可变电感装置；和

一个与所述开关装置连接的脉冲宽度调制控制器，所述脉冲宽度调制控制器能够给所述开关装置提供信号以便转换到所述第一状态或所述第二状态。

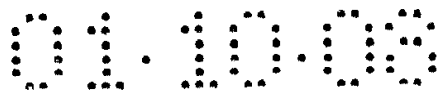
38. 根据权利要求37的电力变换器，其特征是还包括当所述开关装置处于所述第一状态时能够给所述可变电感装置提供信号以便使所述可变电感装置从所述高电感状态转换到所述低电感状态的装置，当所述开关装置处于所述第二状态时，所述装置也能够给所述可变电感装置提供信号以便使其从所述低电感状态转换到所述高电感状态。

39. 根据权利要求13的装置，其特征是所述控制电路包括一个第一比较器，所述第一比较器能够给所述可变电感装置提供信号以便使其从所述高电感状态转换到所述低电感状态。

40. 根据权利要求39的装置，其特征是所述控制电路包括一个第二比较器，所述第二比较器能够给所述可变电感装置提供信号以便使其从所述低电感状态转换到所述高电感状态。

41. 根据权利要求40的装置，其特征是还包括：

与所述可变电感装置连接的开关装置，所述开关装置具有一个第一状态和一个第二状态，当在所述第一状态时所述开关装置能够允许



把输入功率提供给可变电感装置，当在所述第二状态时所述开关装置能够阻挡输入功率流入所述可变电感装置；和

一个与所述开关装置连接的脉冲宽度调制控制器，所述脉冲宽度调制控制器能够给所述开关装置提供信号以便使其转换到所述第一状态或所述第二状态。

5 42. 根据权利要求41的电力变换器，其特征是还包括当所述开关装置处于所述第一状态时能够给所述可变电感装置提供信号以便使所述可变电感装置从所述高电感状态转换到所述低电感状态的装置，当所述开关装置处于所述第二状态时，所述装置也能够给所述可
10 变电感装置提供信号以便使其从所述低电感状态转换到所述高电感状态。



说明书

用于开关变换器的快速瞬态响应的阶跃电感器

发明领域

5 本发明涉及开关型电力变换器。

技术背景

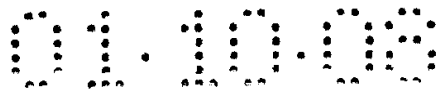
开关变换器电路结构被广泛地用作为像在计算机中使用的电源一样的高效率 and 重量轻的电源中的主要结构单元。然而开关变换器的一个主要缺点是它对于一个快速负载变化的瞬态输出响应。因为大多数的开关电力变换器包括一个输出电感器，所以一个开关电力变换器的瞬态响应固有地被限制。例如，一个典型的补偿变换器包括一个具有多个开关和一个电感器-电容器滤波器的电源级和一个反馈电路。反馈电路监视变换器的输出电压并且对开关进行脉冲宽度调制控制。当有一个快速动态负载变化时，由反馈电路和电源级限制了变换器的响应能力。通过传统的线性或非线性方法能够设计反馈电路的响应更快。然而由电源级和特别是输出电感器限制了变换器的原有响应。

一些人已经尝试利用具有一个小电感值的电感器来改进电力变换器的动态响应。因为当使用一个小的电感器时电流流动能够迅速地变化，所以该方法增加了电力变换器的动态响应。然而该方法的缺点在于使用一个小的电感器导致了在正常操作期间的一个脉动电流。高的脉动电流把高的均方根电流引入到变换器开关和无源部件中，其结果是增加了功率损耗。

其他人已经尝试通过使用并联开关来分配该电流以便减小功率损耗，但是这种方法增加了变换器的费用和复杂性。还有其他人已经尝试通过增加变换器的开关频率来改进变换器的瞬态响应。该技术的缺点在于它在开关中产生了额外的开关损失和在电感器铁芯中产生了额外的磁损耗。此外，高频操作需要使用高性能的驱动电路，该驱动电路能够进一步扩大变换器的费用。

30 因此，依然需要一种提供一种具有快速瞬态响应同时把变换器的功率损失减到最小的开关电力变换器的方法。

发明的内容



为了改进在前面公开的现有技术中的技术方案，本发明公开一种改进开关电力变换器的瞬态响应的装置和方法。本发明通过在瞬态期间使输出电感器进入到一种低电感状态同时在稳定状态期间通过把输出电感器保持在一个更高的电感状态，能够显著地增加流过变换器的输出电感器中电流的变化速率。

本发明提供了许多优于目前已知电力变换电路结构之处。实现作为权利要求的本发明不是同时需要所有的这些优点，下面列出的优点仅仅是说明各种益处，这些益处由本发明可以单独或结合的设置。这些优点包括：(1)快速动态响应；(2)低输出电感器脉动电流；(3)增加了供电效率；(4)不需要在高开关频率上操作；(5)对于负载需求的可调节性；(6)非复杂的控制方法；和(7)适用于大多数的电力变换器电路结构。

根据本发明提供一种电力变换电路，该电力变换电路包括用于接收输入电源的输入装置，一个用于提供稳压输出电源的输出端和一个连接在输入装置和输出端之间的可变电感装置。可变电感装置具有一个较高电感状态和一个较低电感状态。该可变电感装置可控制地在较高电感状态和较低电感状态之间转换。在一个实施例中，电力变换器进一步包括一个控制电路，该控制电路能够给可变电感装置提供控制信号以便使可变电感装置从一种电感状态转换到另一种电感状态。

根据本发明，在一种实施例中可变电感装置包括一种固定部分和一个与固定部分串联的可变部分。该可变电感装置作为选择包括一个变压器，该变压器多个彼此磁耦合的线圈，其中第一线圈与固定电感部分串联连接。第二和第三线圈中的每个线圈可选择地与一个电源和一个开关串联连接，其中通过利用开关把电源施加到第二或第三线圈中的一个线圈中有效地减小了可变电感部分的有效电感。

在另一个实施例中，可变电感装置包括一个较低电感元件，一个与较低电感元件串联连接的开关，从而形成一个开关与较低电感元件的串联连接结构，和一个与该开关和较低电感元件串联连接结构并联连接的较高电感元件。该开关通过把较低电感元件与较高电感元件的并联连接或断开连接，能够在较低电感状态与较高电感状态之间转换可变电感装置。

附图说明

通过下面结合附图的描述本发明将变得更明显:

图1是一个现有技术中补偿电力变换器的简化等效电路;

图2是一个用于在图1中所示的补偿变换器电路在负载瞬态期间的波形图;

5 图3是在一个补偿变换器电路中实现的本发明的第一实施例的一个电路图;

图4是一个表示当在负载电流中有一个快速瞬态增加时本发明的第一实施例的响应波形图;

10 图5是一个表示当在负载电流中有一个快速瞬态减小时本发明的第一实施例的响应波形图;

图6是在一个补偿变换器电路中实现的本发明的第二实施例的一个电路图;

图7是在一个补偿变换器电路中实现的本发明的第三实施例的一个电路图;

15 图8是在一个补偿变换器电路中实现的本发明的第四实施例的一个电路图;

图9是在一个补偿变换器电路中实现的本发明的第五实施例的一个电路图;

20 图10是一个表示当在负载电流中有一个快速瞬态增加时本发明的第五实施例的响应波形图;

图11是一个表示当在负载电流中有一个快速瞬态减小时本发明的第五实施例的响应波形图;

优选实施例的详细描述

25 下面的讨论是当结合一个补偿电力变换器的电路结构时来描述本发明的实施例。本发明还可以被应用到其它电力变换器电路结构, 例如一个升压变换器、一个回扫变换器、一个正向变换器、一个推挽式变换器、一个谐振变换器, 一个全桥式变换器、一个Cuk变换器、一个Sepic变换器、一个半桥式变换器和其它变换器电路结构, 这对于本领域里普通技术人员来说是显而易见的。现在来参照附图, 30 图1示出了一种现有补偿变换器, 该补偿变换器具有两个开关M1和M2、一个输出电感器L1和一个输出电容器C1。附图2示出了当在负载电流中具有一个阶跃增加时一个典型的补偿变换器的操作, 如在图1

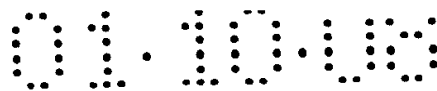
中所示的，假设反馈电路4和脉冲宽度调制控制器6足够快地改变该变换器开关M1和M2的占空比，以便能够使电感器L1中的电感电流上升到一个新的平均值。通过输出电感器L1的电感来限制电感电流增加的速率。一个具有低电感的电感器L1为在该变换器中电感器电流快的变化速率创造了条件。但是，该变换器将遭受一个高脉动的电感器电流。一个具有高电感的电感器将使该变换器中的脉动电流减小，但是该电感器电流将更慢地瞬态变化。本发明提供一种新的方法，该方法提供一种快的电感器电流变化速率，同时提供一种减少脉动电流的方法。

第一实施例

图3示出了一种结合到一个电力变换器中的本发明的第一实施例的电路图。该实施例包括一个电源电路110和一个控制电路120。电源电路110包括一对输入端101和102，用于与一个直流电压源连接以便接收输入电源，和一个输出电容器C101，用于给与输出电容器C101连接的一个负载107提供稳压的直流输出电源。该电源电路110还包括一对开关M101和M102，其中在该实施例中开关M101和M102由MOSFETs来表示，但是能够从像BJTs、机电开关、IGBTs、和半导体开关这样的许多适当的装置中任意选择一种作为开关。通过控制电路120来控制开关M101和M102以便产生一系列交流电压脉冲。

在开关M101和M102与输出电容器C101之间连接一个磁路130。该磁路130包括一个电感相对较低的固定电感器L101和一个电感相对更高的可变电感装置140。在电源电路110的正常操作期间，可变电感装置140以一个稳定的电感值来操作，以便提供足够的电感由此允许电源电路110利用低脉动电压来操作。当在电源电路110中具有一个快的瞬态电流时，可变电感装置140是可操作的以便在一个减小的电感值上起作用，最好接近于零电感，从而改进电源电路110的瞬态响应。

在本发明的第一实施例中示出的可变电感装置140由一个具有三个线圈W101，W102和W103的变压器组成。线圈W101与固定电感器L101串联连接并且被连接在输入端101和102与输出电容器C101之间。线圈W102和W103与线圈W101磁耦合并且每个线圈W102和W103与一个电压源Vi101连接。在本实施例中示出：线圈W102和W103与相同的电压源连接，但是做为选择，线圈W102和W103可以与不同的电压连接。线圈W102和W103也与双向开关S103和S104连接。双向开关S103和S104能够



操作来控制电压源Vi101分别地与线圈W103和W102连接。双向开关S103和S104可以是像MOSFETs, BJTs, IGBTs, 和半导体开关这样的许多适合的装置中任意一种开关。

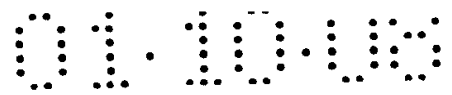
5 控制电路120包括两个回路、一个脉冲宽度调制(PWM)回路105和一个可变电感控制回路115。PWM回路105包括一个反馈单元104, 该反馈单元104与一个PWM单元106连接。反馈单元104能够监视变换器负载电压, 并且PWM单元106能够给在电源电路110中的开关M101和M102提供驱动脉冲。

10 可变电感控制回路115包括监视变换器负载电压和为电源电路110中的开关S103和S104产生驱动信号的电路。在第一实施例中, 可变电感控制回路包括一个高通滤波器B101和两个磁滞比较器B102和B103, 该高通滤波器能够监视变换器负载电压, 两个磁滞比较器分别与开关S104和S103连接。

15 在稳定状态操作期间, 反馈单元104产生控制PWM控制器106的信号, 该PWM控制器也产生栅极脉冲以便驱动MOSFETsM101和M102, 由此维持负载107上的稳定电压。除了输出电感器由两个串联电感器L101和W101组成而不是一个电感器之外, 该稳定状态操作与常规变换器的稳定状态操作是相同的。在第一实施例中, 电感器L101是一个与线圈W101物理上分离的电感器, 然而做为选择, 电感器L101可以是漏电感
20 并且与变压器T101是一个整体, 因此将不需要一个物理上分离的电感器。同样在稳定状态操作期间, 开关S103和S104被打开。因此, 线圈W101的电感是高的以便保持低的脉动电流。

当在负载电流中具有一个快的瞬态增加时, 图3的变换器响应该瞬态状态, 如由在图4中所示波形所举例说明的。在t10和t11之间的
25 周期中, 变换器以稳定状态操作。在时间t11时, 在负载电流中具有一个阶跃增加, 如在图4C中所示的。这导致一个输出电压下降, 如在图4E中所示的。

当该输出电压降低于一个阈值电平V1时, 通过滤波器B101和比较器B102的操作使开关S104被导通, 从而使电压源Vi101与线圈W102
30 短路。其结果是, 线圈W101的电感减小并且电感器L101和线圈W101的等效电感减小到电感器L101的电感。因此, 由于电感减小, 使流过电感器L101的电流能够迅速地上升, 如在图4D中所示的。在t12和t13

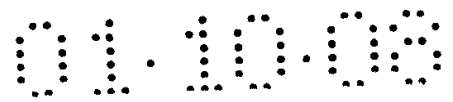


之间的时间周期中，电流也同样流过线圈W102。该电流由从线圈W101感应的电流和由电压源Vi101提供给线圈W102的磁化电流所组成。流过线圈W102的电流大小取决于线圈W101和W102的匝数比。由于流过电感器L101中的电流增加和流过变压器T101中的磁化电流的增加，其结果是输出电压增加。当在时间t13上输出电压达到第二电压电平V2时，开关S104被关断。

在时间t13上，开关S104被关断并且在t13到t14的时间周期期间流过线圈W102的电流下降到零。当开关S104被关断时，变压器T101的磁化电流将被耦合到线圈W101上。在时间t13上，流过电感器L101的电流和流过线圈W101的磁化电流可不必是相同的。该电流差将给开关S104的杂散电容充电，并且在t13和t14之间的时间周期期间在线圈W101中产生电压峰值，如在图4H中所示的。一个像缓冲器电路这样的能量吸收电路能够用于防止在线圈W101中的过电压。这样一个能量吸收电路能够选择地与电感器L101，变压器T101，开关S103或开关S104连接。

在时间t14之后，电源电路的串联输出电感变得高于它在瞬态周期期间输出电感，这是因为在时间t14上，等效串联输出电感包括电感器L101和线圈W101的电感。该输出电感器电流不能像当电感器W101实际上是处于零电感时一样的迅速地变化。如果该电感器电流足以满足负载需求，那么输出电压将上升并且PWM回路105将恢复它的正常脉冲宽度调制。然而在时间t14上的电感器电流可能不足以满足负载电流的需求也是可能的，其结果是：在时间t14上开关S104已经转换到关断状态之后输出电压可能下降。在这种情况下，输出电压可能减小到低于阈值电平V1并且开关S104可能再一次被转换一个导通状态。如果这种情况发生，那么该周期在重复直到流过电感器L101的电感器电流足以满足负载电流需要为止。最后，输出电压将上升到一个水平，以致于正常脉冲宽度调制可以恢复。

当在负载电流中具有一个快的瞬态减小时，该变换器响应该瞬态状态，如在图5中所示波形。在t20和t21之间的时间周期期间，变换器以一个稳定的负载电流来操作。在时间t21时，在负载电流中具有一个阶跃减小，如在图5C中所示的。其结果是输出电压上升，如在图5E中所示的。即使PWM回路105足够快地关断MOSFET M101和导通



MOSFET M102, 但是由于电感器L101和绕组W101组合的高电感, 使得在电感器L101中的电流减少将仍然是太慢. 当在时间t22上输出电压达到一个阈值电平V3时, 滤波器B101和比较器B103触发开关S103以便切换到导通状态. 其结果是, 线圈W103与电压源V1101连接, 线圈W101的电感实际上减小到零, 并且线圈W103为在流过W101的输出电感器电流中迅速地减小创造条件. 在线圈W103中也产生一个磁化电流.

在时间t23上, 在输出电感器电流中的减少使输出电压减小直到它达到一个阈值电压电平V4为止. 在这时, 开关S103被转换到一个关断状态并且磁化电流被转换到线圈W101中. 在t23到t24的时间周期中, 该磁化电流可能与在电感器L101中流动的电流不匹配, 从而在线圈W101上产生一个电压峰值. 能够使用一个像缓冲器电路这样的能量吸收电路可以避免在线圈W101中的过电压. 一个合适的能量吸收电路可以选择地与电感器L101, 变压器T101, 开关S103或开关S104连接.

在时间t24之后的时间周期中, 输出电压逐渐地降低到一个适当的电平以致于PWM回路105重新开始正常操作. 然而, 在时间t24之后, 流过电感器L101的电流可能没有下降到足够防止输出电压达到电压阈值电平V3是可能的. 在这种情况下, 该过程将重复直到电感器电流充分地减小为止.

在稳定状态操作, 串联电感器的等效串联电感是该电感的总和. 电感器W1被设计具有足够高的电感以便使脉动电流减到最少, 从而使流过开关元件和其他部件的RMS电流减到最小. 电感器L101被设计具有足够低的电感, 以便当在瞬态状态期间电感器W101被短路时提供快的电流充电速率. 瞬态状态仅仅短时间地存在并且变换器在稳定状态中渡过大部分的操作时间. 因此, 该变换器将仅仅对于一个短路持续时间具有一种高脉动电流, 并且效率将不被严重地损害. 本发明是通用性的并且能够被应用到利用一个输出电感器的大多数的开关变换器中.

如在第一实施例中所描述的, 本发明提供一种把一个变换器的输出电压保持在一定范围之内的装置, 并且当面对突然的负载电流变化时能够提供一个快速瞬态响应.

第二实施例

图6示出了一种结合到一个电力变换器中的本发明的第二实施例



的电路图。该实施例与第一实施例的不同在于利用输入电压源作为附加的电压源来取消了第一实施例的附加的电压源。该第二实施例包括一个电源电路210和一个控制电路220。

5 电源电路210包括一对输入端201和202，用于与一个直流电压源连接以便接收输入电源，和一个输出电容器C201，用于给与输出电容器C201连接的一个负载207提供稳压的直流输出电源。该电源电路210还包括一对开关M201和M202，其中在该实施例中由MOSFETs来表示，但是能够从像BJTs、机电开关、IGBTs、和半导体开关这样的许多适合的装置中任意选择一种作为开关。通过控制电路220来控制开关
10 M201和M202以便产生一系列交流电压脉冲。

在开关M201和M202与输出电容器C201之间连接一个磁路230。该磁路230包括一个电感相对较低的固定电感器L201和一个电感相对更高的可变电感装置240。在电源电路210的正常操作期间，可变电感装置240以一个稳定的电感值来操作，以便提供足够的电感由此允许电
15 源电路210利用低脉动电压来操作。当在电源电路210中具有一个快的瞬态电流时，可变电感装置240是可操作的以便在一个减小的电感值上起作用，最好接近于零电感，从而改进电源电路210的瞬态响应。

在本发明的第二实施例中示出的可变电感装置240由一个具有三个线圈W201，W202和W203的变压器组成。线圈W201与固定电感器L201
20 串联连接并且被连接在输入端201和202与输出电容器C201之间。线圈W202和W203与线圈W201磁耦合并且每个线圈W202和W203与输入电压端201连接。线圈W202和W203也与双向开关S203和S204连接。双向开关S203和S204能够控制输入电压源分别地与W203和W202的连接。

控制电路220包括两个回路、一个脉冲宽度调制(PWM)回路205和一个可变电感控制回路215。PWM回路215包括一个反馈单元204，该反
25 馈单元204与一个PWM单元206连接。反馈单元204能够监视变换器负载电压，并且PWM单元206能够给在电源电路210中的开关M201和M202提供驱动脉冲。

可变电感控制回路215包括用于监视变换器负载电压和为电源电
30 路110中的开关S203和S204产生驱动信号的电路。在第二实施例中，可变电感控制回路包括一个高通滤波器B201和两个磁滞比较器B202和B203，该高通滤波器能够监视变换器的负载电压，两个磁滞比较器

分别地与开关S204和S203连接。

第二实施例中的电源电路210和控制电路220的操作与第一实施例的电源电路110和控制电路120的操作是相同的。在变压器T201中适当的线圈匝数比被使用。

5 第三实施例

图7示出了一种结合到一个电力变换器中的本发明的第三实施例的电路图。该实施例与第一实施例的主要不同在于利用输出电压源作为附加的电压源来取消第一实施例的附加的电压源。此外，使用两个箝位二极管来防止开关过电压。该第三实施例包括一个电源电路310
10 和一个控制电路320。

电源电路310包括一对输入端301和302，用于与一个直流电压源连接以便接收输入电源，和一个输出电容器C301，用于给与输出电容器C301连接的一个负载307提供稳压的直流输出电源。电源电路310还包括一对开关M301和M302，其中在该实施例中利用MOSFETs来表示开关。
15 通过控制电路320来控制开关M301和M302以便产生一系列交流电压脉冲。

在开关M301和M302与输出电容器C301之间连接一个磁路330。该磁路330包括一个电感相对较低的固定电感器L301和一个电感相对更高的可变电感装置340。在电源电路310的正常操作期间，可变电感装置340以一个稳定的电感值来操作，以便提供足够的电感由此允许电源电路310利用低脉动电压来操作。当在电源电路310中具有一个快速的瞬态电流时，可变电感装置340是可操作的以便在一个减小的电感值上起作用，最好接近于零电感，从而改进了电源电路310的瞬态响应。
20

在本发明的第三实施例中示出的可变电感装置340由一个具有三个线圈W301，W302和W303的变压器T301组成。线圈W301与固定电感器L301串联连接并且被连接在输入端301和302与输出电容器C301之间。线圈W302和W303与线圈W301磁耦合并且每个线圈W302和W303与输出电压端303连接。线圈W302和W303也与双向开关S303和S304连接。
25 双向开关S303和S304能够控制输出电压源分别地与W303和W302的连接。两个二极管D303和D304分别地与开关S303和S304连接，二极管D303和D304把开关电压箝位到输入电压电平。
30

控制电路320包括两个回路、一个脉冲宽度调制 (PWM) 回路305和一个可变电感控制回路315。PWM回路305包括一个反馈单元304，该反馈单元304与一个PWM单元306连接。反馈单元304能够监视变换器的负载电压，并且PWM单元306能够给在电源电路310中的开关M301和M302提供驱动脉冲。

可变电感控制回路315包括用于监视变换器的负载电压和为电源电路中的开关S303和S304产生驱动信号的电路。在第三实施例中，可变电感控制回路包括一个高通滤波器B301和两个磁滞比较器B302和B303，该高通滤波器能够监视变换器的负载电压，两个磁滞比较器分别地与开关S304和S303连接。

第三实施例中的电源电路310和控制电路320的操作与第一实施例的电源电路110和控制电路120的操作是相同的。在变压器T301中适当的线圈匝数比被使用。

第四实施例

图8示出了一种结合到一个电力变换器中的本发明的第四实施例的电路图。该实施例与第二实施例的主要不同在于加入了AND门电路IC403和IC404，以便保证开关S403和S404的开关转换与开关M401和M402的开关转换一致。同样地加入了箝位二极管D403和D404，以便把由于一个快速瞬态在线圈W401中可能产生的电压峰值箝位。该第四实施例同样地包括一个电源电路410和一个控制电路420。

电源电路410包括一对输入端401和402，用于与一个直流电压源连接以便接收输入电源，和一个输出电容器C401，用于给与输出电容器C401连接的一个负载407提供稳压的直流输出电源。电源电路410还包括一对开关M401和M402，其中在该实施例中利用MOSFETsM401和M402来表示开关。通过控制电路420来控制开关M401和M402以便产生一系列交流电压脉冲。

在开关M401和M402与输出电容器C401之间连接一个磁路430。该磁路430包括一个电感相对较低的固定电感器L401和一个电感相对更高的可变电感装置440。在电源电路410的正常操作期间，可变电感装置440以一个稳定的电感值来操作，以便提供足够的电感由此允许电源电路410利用低脉动电压来操作。当在电源电路410中具有一个快速的瞬态电流时，可变电感装置440是可操作的以便在一个减小的电感

值上起作用，最好接近于零电感，从而改进了电源电路410的瞬态响应。

在本发明的第四实施例中示出的可变电感装置440由一个具有三个线圈W401，W402和W403的变压器T401组成。线圈W401与固定电感器L401串联连接并且被连接在输入端401和402与输出电容器C401之间。两个箝位二极管D403和D404与连接电感器L401和绕组W401的结点连接。线圈W402和W403与线圈W401磁耦合并且每个线圈W402和W403与输入电压端401连接。线圈W402和W403也与双向开关S403和S404连接。双向开关S403和S404能够控制输出电压源分别地与线圈W403和W402的连接。

控制电路420包括两个回路、一个脉冲宽度调制(PWM)回路405和一个可变电感控制回路415。PWM回路405包括一个反馈单元404，该反馈单元404与一个PWM单元406连接。反馈单元404能够监视变换器的负载电压，并且PWM单元406能够给在电源电路410中的开关M401和M402提供驱动脉冲。

可变电感控制回路415包括用于监视变换器的负载电压和为电源电路中的开关S403和S404产生驱动信号的电路。在第四实施例中的可变电感控制回路包括一个高通滤波器B401和两个磁滞比较器B402和B403，其中高通滤波器B401能够监视变换器的负载电压，两个磁滞比较器B402和B403与AND门电路IC403和IC404连接，AND门电路IC403和IC404也分别地使开关S403和S404的开关转换与主开关M402和M401的开关转换同步。

除了由于附加了箝位二极管和附加了AND门电路使功能改变之外，第四实施例的电源电路410和控制电路420的操作与第二实施例的电源电路210和控制电路220的操作是相同的。

在当开关S403或S404瞬态关断时的瞬态期间，二极管D403和D404把在连接电感器L401和线圈W401的结点上的电压箝位。当这些开关瞬态关断时，通常在关断瞬态之前和之后流过线圈W401的电流是不匹配的。该瞬态可能产生电压峰值，该电压峰值将由二极管D403和D404来箝位以便补偿有关的能量。

即使在有一个瞬态负载电流变化的情况下，附加的AND门IC403能够保证只有当主开关M402被转换到导通状态时使开关S403被转换到

导通状态。当在负载电流中有一个瞬态减小时，只有当开关M402被转换到导通状态以便感应在流过电感器L401中的电流减小时，线圈W403就减小线圈W401的有效电感。这就保证电感器电流能够迅速地减小以便满足负载需求。

5 即使在有一个瞬态负载电流变化的情况下，附加的AND门IC404能够保证只有当主开关M401被转换到导通状态时使开关S404被转换到导通状态。当在负载电流中有一个瞬态增加时，只有当开关M401被转换到导通状态以便感应在流过电感器L401中的电流的增加时，线圈W402就减小线圈W401的有效电感。这就保证电感器电流能够迅速地增加以便满足负载需求。

10

第五实施例

图9示出了结合到一个电力变换器中本发明的第五实施例。在该实施例中使用了一种不同类型的可变电感装置。在该实施例中，可变电感装置包括一个与开关S503串联连接的相对较小的电感器L501，该串联结构与一个相对更大的电感器L502并联连接。在变换器的正常操作期间，开关S503被打开以便使小的电感器L501与变换器隔离。在负载电压中具有一个瞬态改变时，开关S503被闭合从而使小的电感器L501与大的电感器L502并联连接，并且启动快的电流变化。该第五实施例同样地包括一个电源电路510和一个控制电路520。

15

20 电源电路510包括一对输入端501和502，用于与一个直流电压源连接以便接收输入电源，和一个输出电容器C501，用于给与输出电容器C501连接的一个负载507提供稳压的直流输出电源。电源电路510还包括一对开关M501和M502，其中在该实施例中利用MOSFETs M501和M502来表示开关。通过控制电路520来控制开关M501和M502以便产生

25 一系列交流电压脉冲。

该实施例的可变电感装置540被连接在开关M501和M502与输出电容器C501之间。在电源电路510的正常操作期间，可变电感装置540以一个高稳定的电感值来操作，以便提供足够的电感由此允许电源电路510利用低脉动电压来操作。当在电源电路510中具有一个快的瞬态电

30 流时，可变电感装置540是可操作的以便在一个减小的电感值上起作用，最好接近于零电感，从而改进了电源电路510的瞬态响应。

在本发明的第五实施例中所示的可变电感装置540由一个电感器

L501与开关S503串联连接然后与电感器L502并联连接所组成。两个电压箝位二极管D503和D504与开关S503和电感器L501之间的结点连接以便保护开关S503。

5 控制电路520包括两个回路、一个脉冲宽度调制(PWM)回路505和一个可变电感控制回路515。PWM回路505包括一个反馈单元504，该反馈单元504与一个PWM单元506连接。反馈单元504能够监视变换器的负载电压，并且PWM单元506能够给在电源电路510中的开关M501和M502提供驱动脉冲。

10 可变电感控制回路515包括用于监视变换器的负载电压和为开关S503产生驱动信号的电路。在第五实施例中的可变电感控制电路包括一个能够监视变换器的负载电压的高通滤波器B501和两个磁滞比较器B502和B503。两个磁滞比较器B502和B503的输出被输入给一个逻辑电路525，该逻辑电路525包括AND门电路IC503和IC504和OR门电路IC505。逻辑电路525能够使开关S503的开关转换与主开关M502和M501
15 的开关转换同步。

在稳定状态操作期间，反馈单元504产生控制PWM控制器506的信号，该PWM控制器也产生栅极脉冲以便驱动MOSFETs M501和M502，由此维持负载507上的稳定电压。该稳定状态操作与具有一个输出电感器L502和一个输出电容器C501的传统变换器的稳定状态操作是相同的。
20 同样地在稳定状态操作期间，开关S503处在打开状态以致于电感器L501不影响该变换器的电力变换操作。电感器L502具有一个足够高的电感以便抑制过大的脉动电流。这就在稳定的负载操作期间提供了高效率。电感器L501具有比电感器L502的电感明显更低的电感。

25 当在负载流中具有一个快的瞬态增加时，本实施例的变换器响应该瞬态状态，如由在图10中所示波形所举例说明的。在 t_{30} 和 t_{31} 之间的周期中，变换器以稳定状态操作。在时间 t_{31} 时，在负载电流中具有一个阶跃增加，如在图10C中所示的。这导致一个输出电压下降，如在图10E中所示的。当输出电压下降到低于一个阈值电平 V_{11} 时，通过滤波器B501，比较器B502，AND门电路IC504，和OR门电路IC505的
30 操作使开关S503被导通。其结果是，具有一个较低电感的电感器L501与电感器L502并联连接。这使整个变换器的电感减小，因此电感器电流能够迅速地上升，如在图表10D中所示的。

在 t_{32} 和 t_{33} 之间的时间周期中，电流也同样流过电感器L501。该电流使输出电压增加。当在时间 t_{33} 上输出电压达到一个第二电压电平V12时，如在图10中所示，通过滤波器B501，比较器B502，AND门电路IC504和OR门电路IC505的操作使开关S503被转换到一个关断状态。流过电感器L501的电流被转向流过二极管D504和电流减小直到时间 t_{34} 为止。在时间 t_{34} 上，二极管D504关断并且流过电感器L501的电流减小到零。

在 t_{32} 到 t_{34} 的时间周期期间，电感器L502中的电流上升。如果从时间 t_{34} 开始并且超出时间 t_{34} 时电流上升到足够满足负载的需求，那么该变换器利用开关M501和M502将恢复正常的脉冲宽度调制。如果电流没有上升到足够满足负载需求，那么输出电压将下降到电压电平V11和这操作顺序将被重新启动以便提高输出电压。最后，输出电压将上升到一个水平，以致于正常脉冲宽度调制可以恢复。

当在负载电流中具有一个快的瞬态减小时，图9的变换器响应如在图11中所示的瞬态状态。在 t_{40} 和 t_{41} 之间的时间周期期间，变换器以一个稳定的负载电流来操作，在时间 t_{41} 上，在负载电流中具有一个如在图11C中所示的阶跃减小。其结果是，如在图11E中所示的，输出电压上升。即使PWM回路520足够快地关断MOSFET M501和导通MOSFET M502，但是由于电感器L502的高电感，使得在电感器L502中的电流减小仍然太慢。当在时间 t_{42} 上输出电压达到一个阈值电平V13时，通过滤波器B501，比较器B503，AND门电路IC503，和OR门电路IC505的操作使开关S503被转换到导通状态。其结果是，具有非常小电感的电感器L501与电感器L502并联连接。这减小了整个变换器的电感并且电流能够如在图11D中所示的迅速地变化。

在 t_{42} 和 t_{43} 之间的时间期间，在反方向上流过电感器L501中的电流增加。该电流使输出电压减小直到输出电压达到电压电平V14为止，如在图11E中所示的。当电压电平V14被达到时，通过滤波器S501，比较器B503，AND门电路IC503，和OR门电路IC505的操作使开关S503被转换到一个关断状态。流过电感器L501的电流被转向流过二极管D503和电流减小直到时间 t_{44} 为止。在时间 t_{44} 上，二极管D503被关断并且流过电感器L501的电流减小到零。

在 t_{42} 到 t_{44} 的时间周期期间，流过电感器的电流同样地减小。如

果在时间 t_{34} 上和超出时间 t_{34} 时电感器电流已经充足减小以便使输出电压充分地减小，那么变换器将恢复正常脉冲宽度调制。如果电感器电流没有充分地减小，那么输出电压将再一次增加到电压电平 V_{13} 并且该全部过程将被重新启动以便使输出电压下降。

- 5 参照一个补偿变换器电路结构已经描述了本发明。然而，本发明还可以被应用到其它电力变换器电路结构，例如一个升压变换器、一个回扫变换器、一个正向变换器、一个推挽式变换器、一个谐振变换器，一个全桥式变换器、一个Cuk变换器、一个Sepic变换器、一个半桥式变换器和其它变换器电路结构，这对于本领域里普通技术人员来说
- 10 说是显而易见的。它们都属于本发明的精神。应用在开关电力变换器中具有用于快速瞬态的特殊用途的多个实施例已经被描述。在此描述的实施例仅仅是由本领域里普通技术人员利用在此描述的本发明可能实现的实施例中的几个实施例。已经详细描述的本发明的优选实施例和替换实施例，包括优选的操作方式，利用不同的元件和步骤实现
- 15 本发明是能够理解的。优选的和替换的实施例仅借助于例子来描述并且这些实施例不意味着限制本发明的保护范围，本发明的保护范围由下面的权利要求来限定。

说明书附图

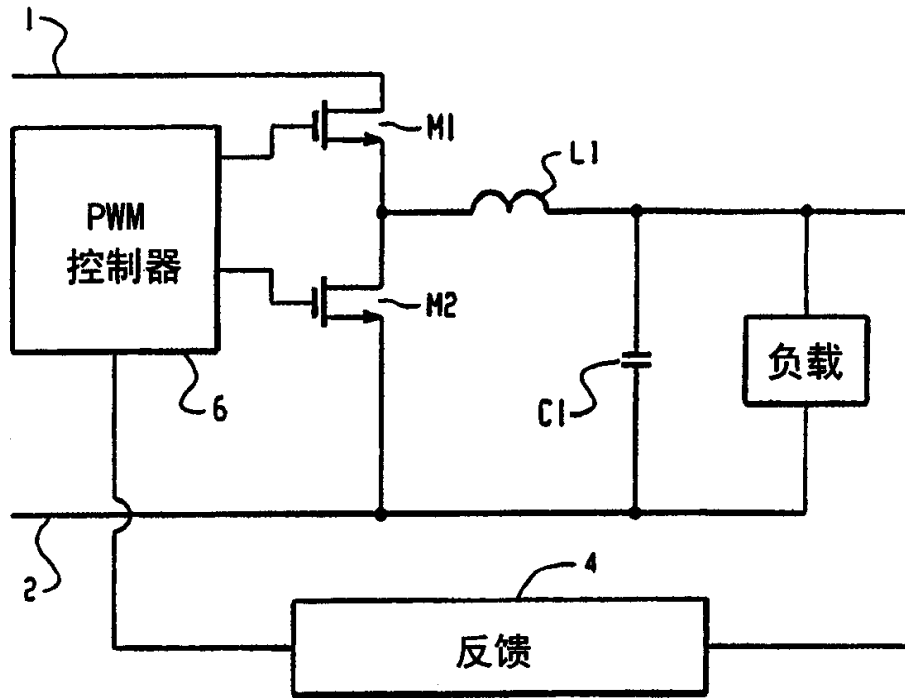
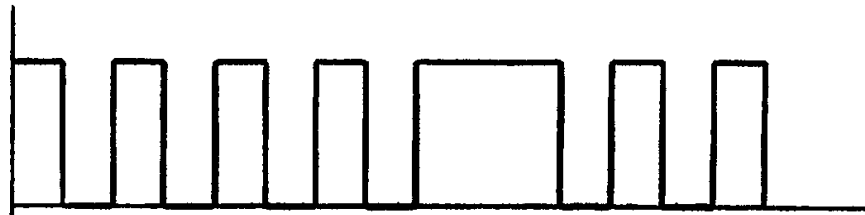
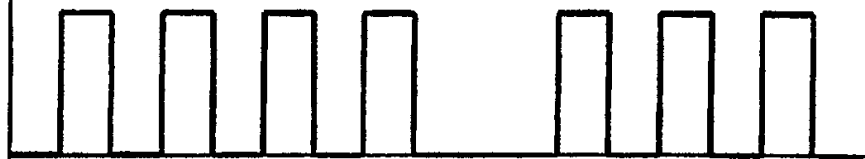


图 1 (现有技术)



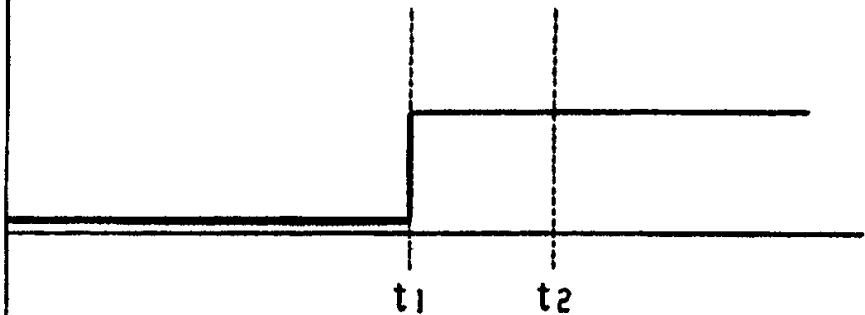
M1的栅极驱动信号

图 2A



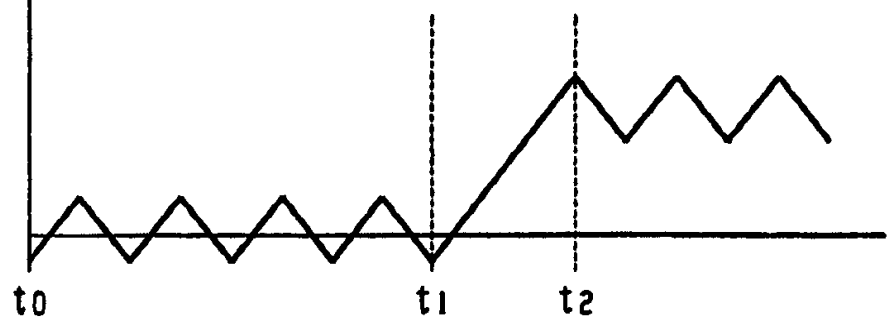
M2的栅极驱动信号

图 2B



负载电流

图 2C



电感器电流

图 2D

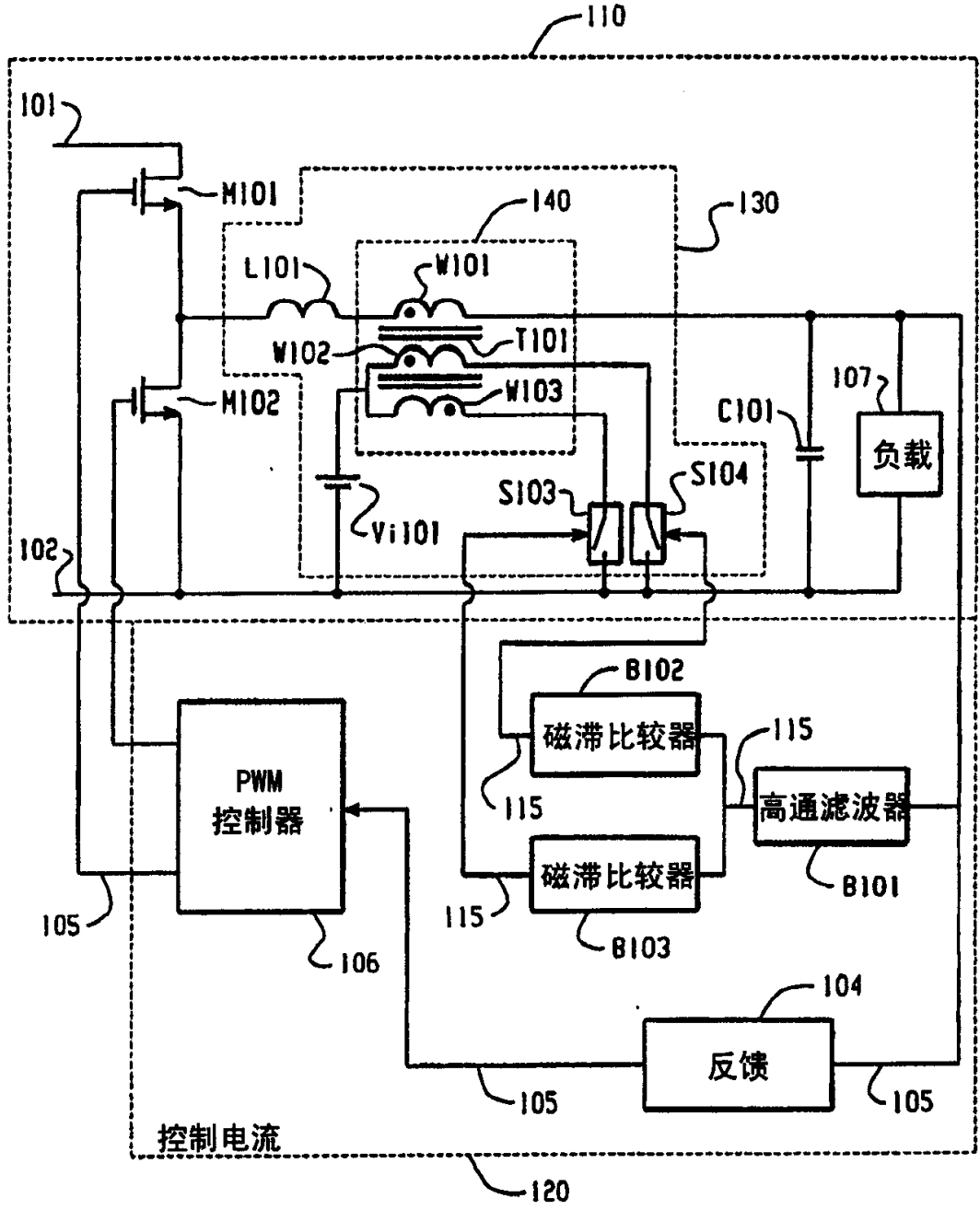
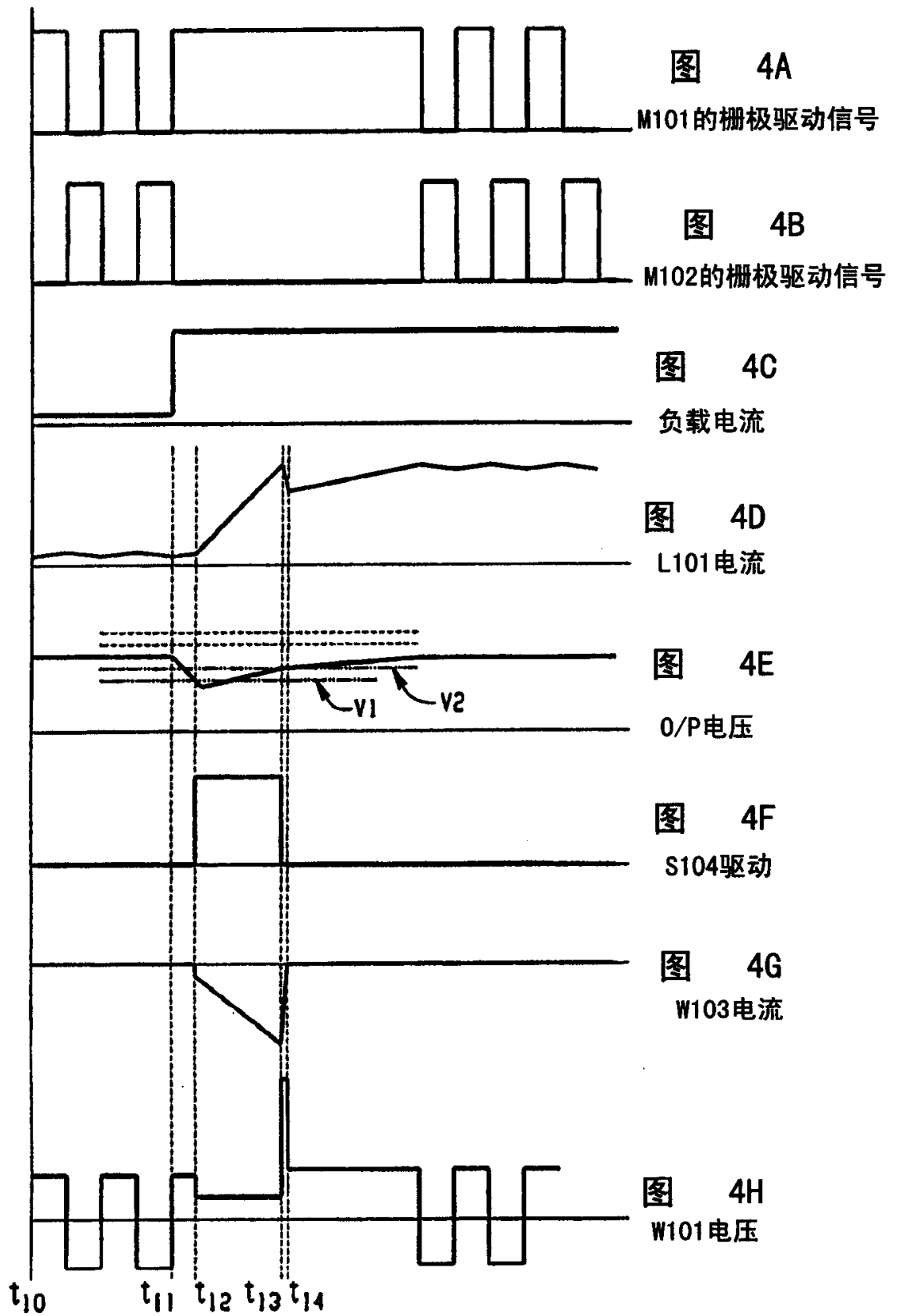
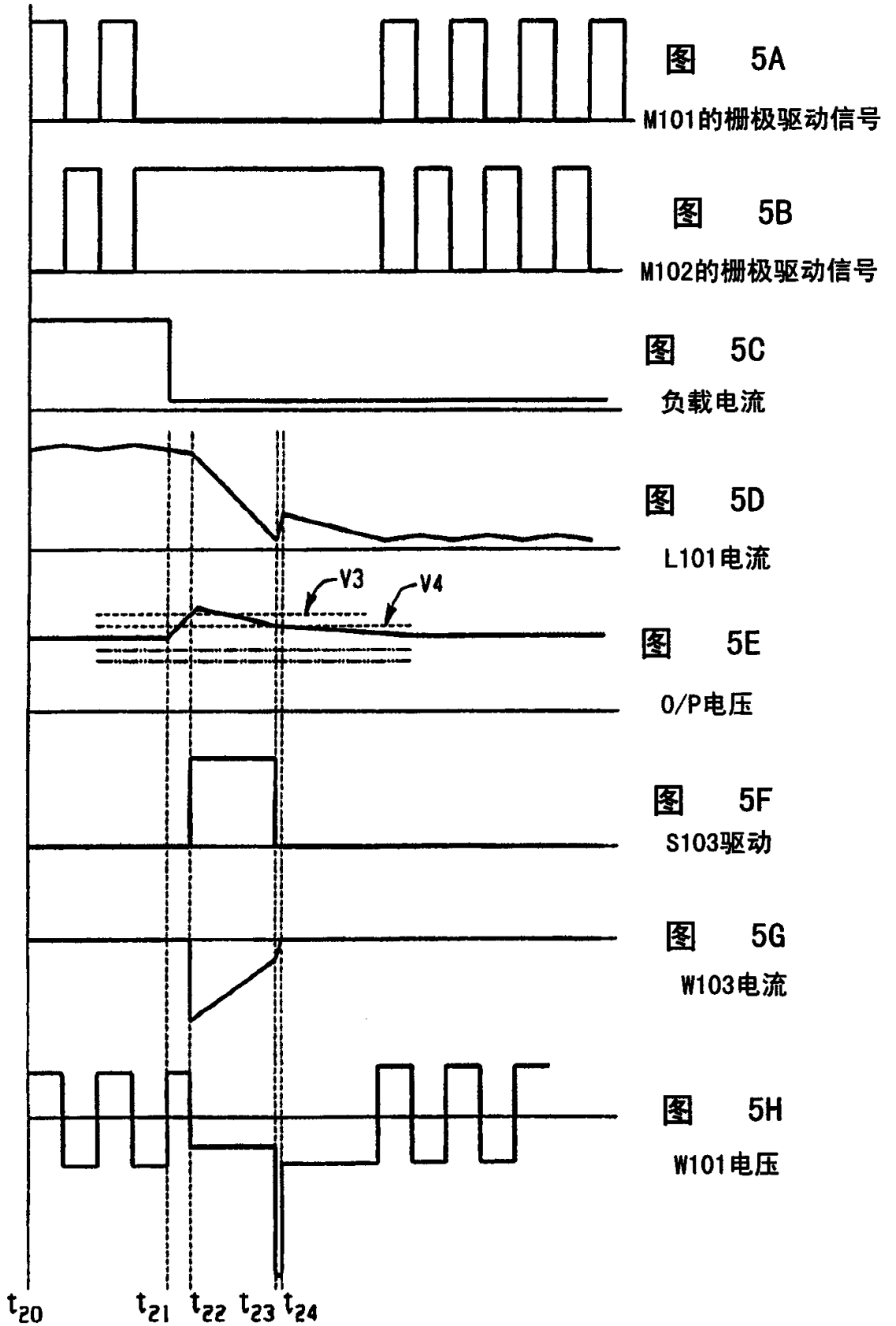


图 3





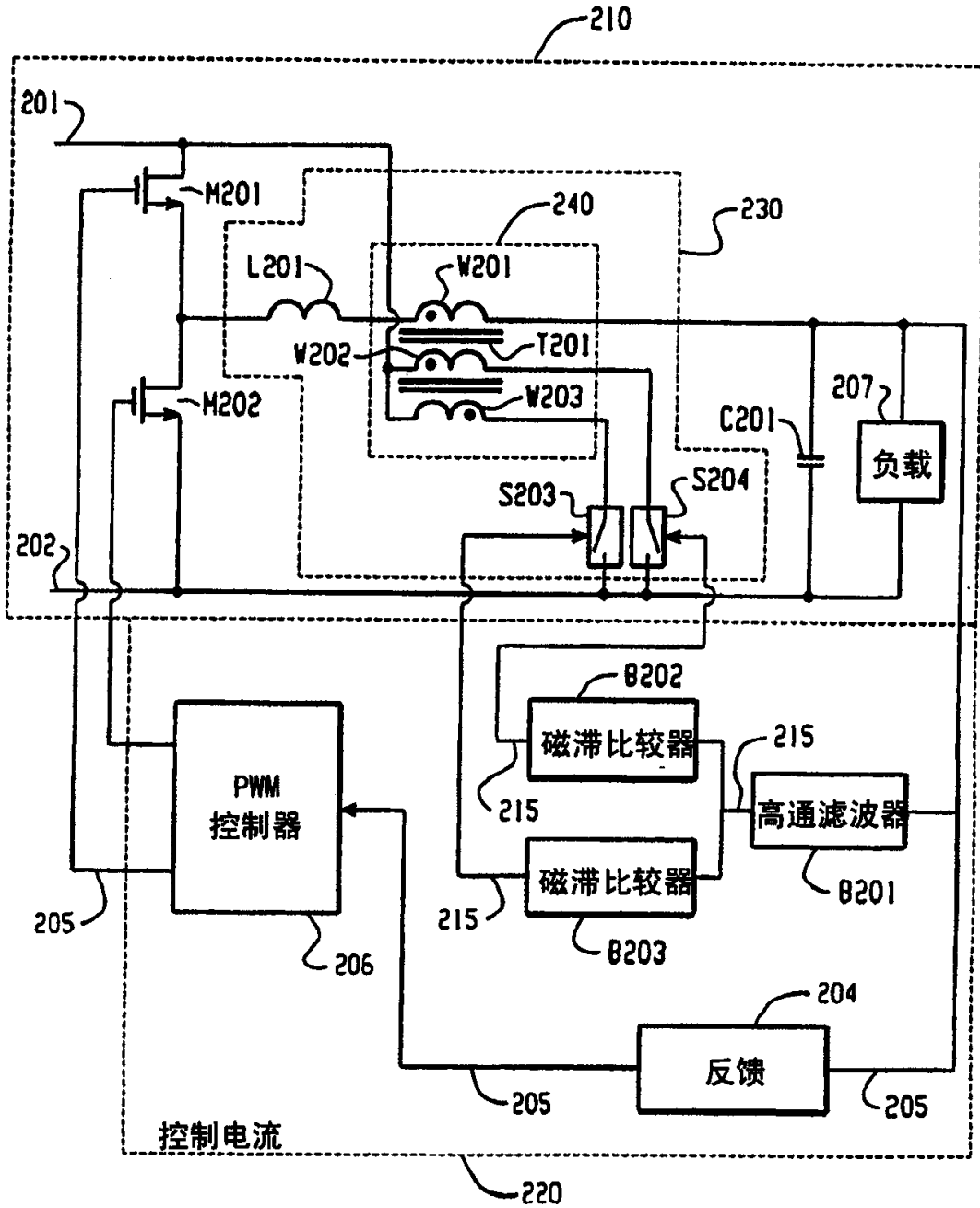


图 6

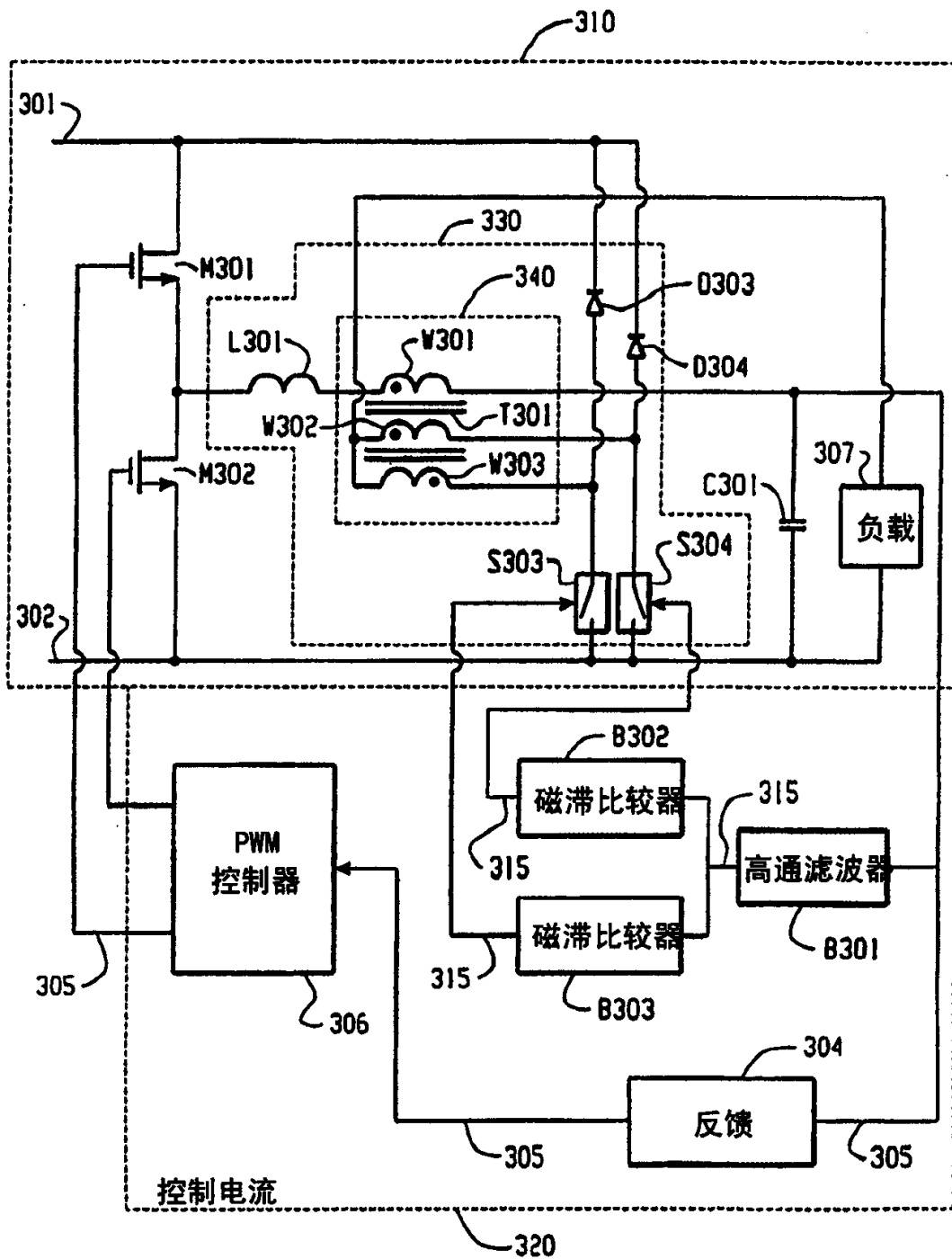


图 7

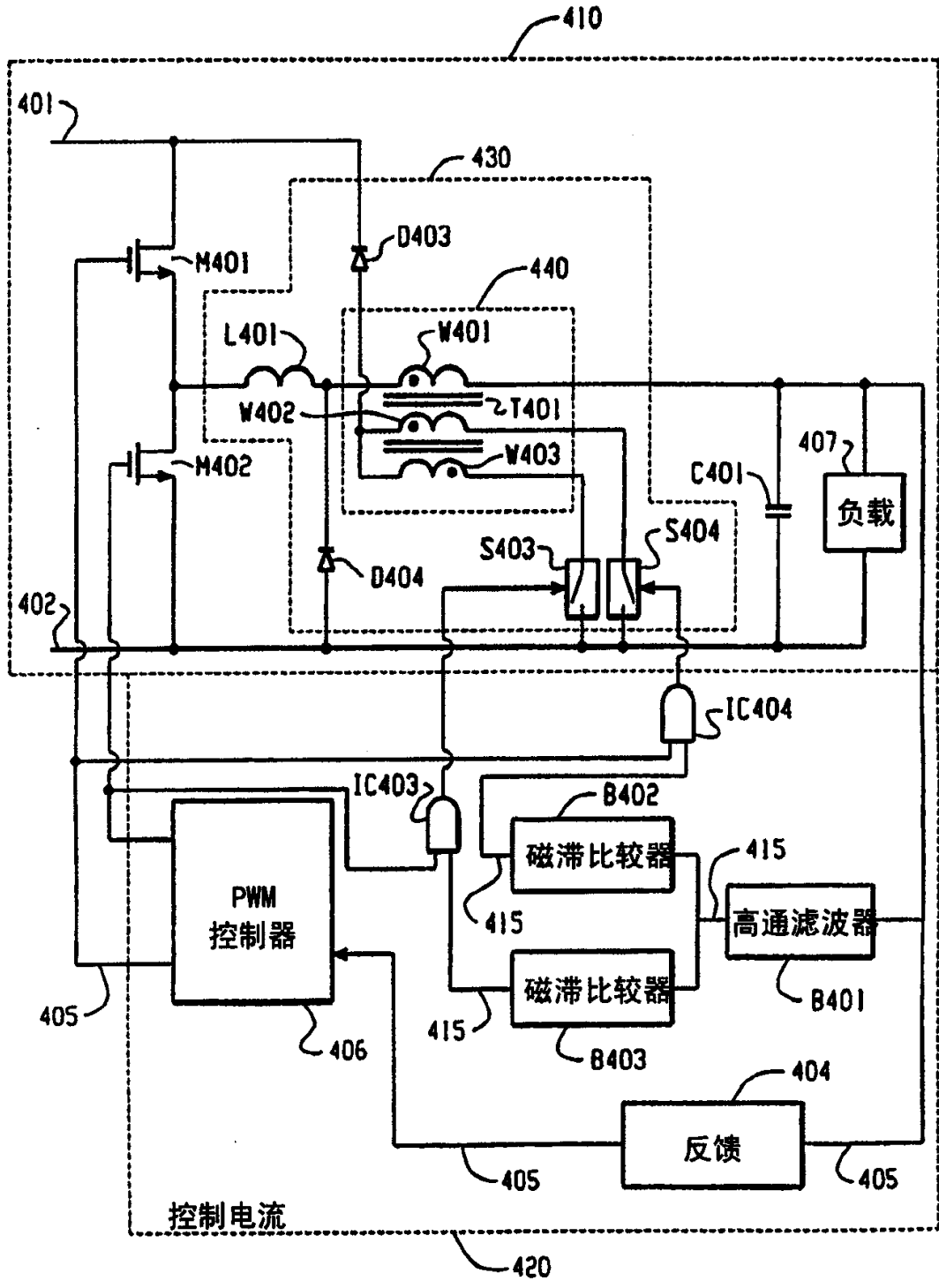


图 8

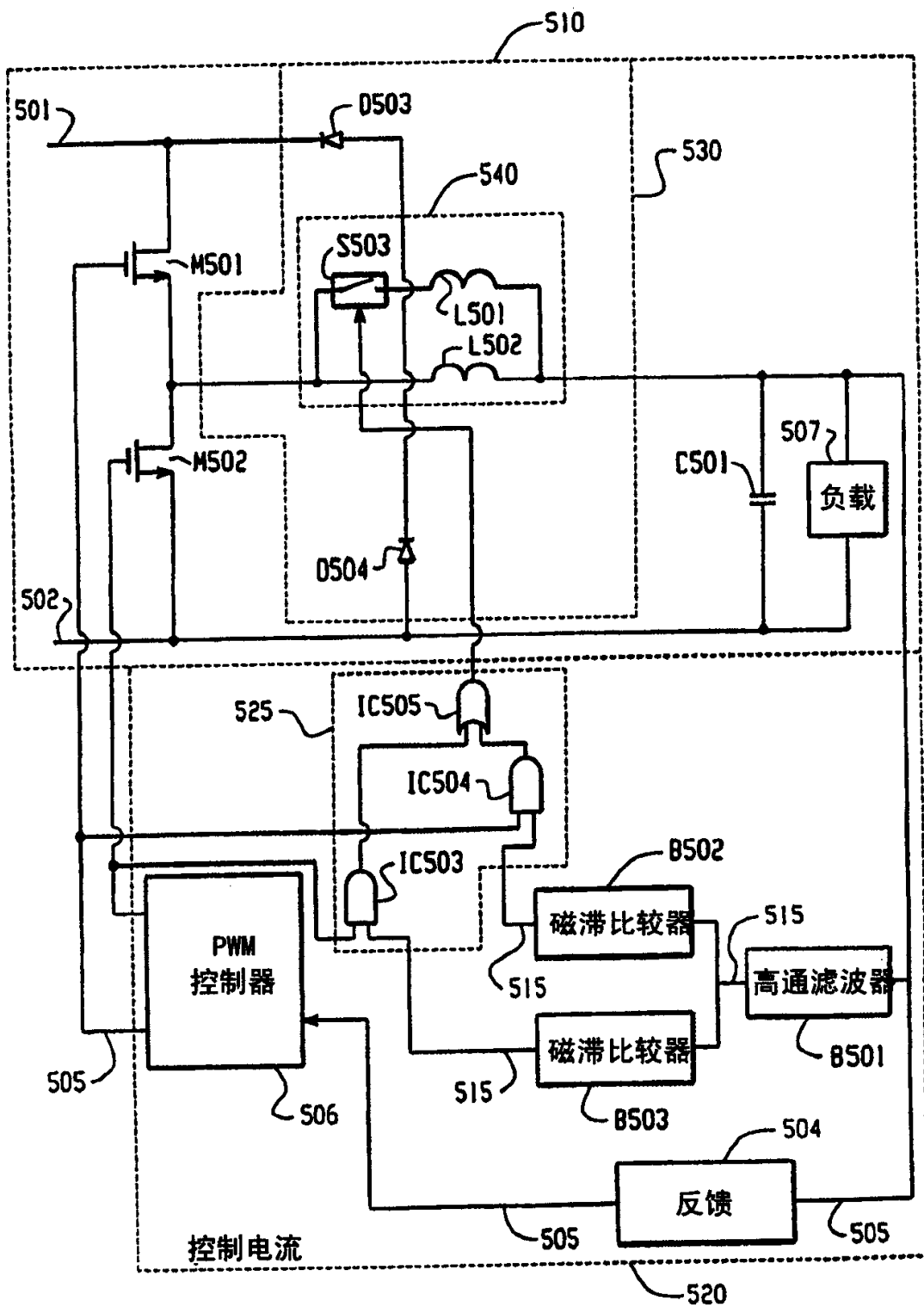


图 9

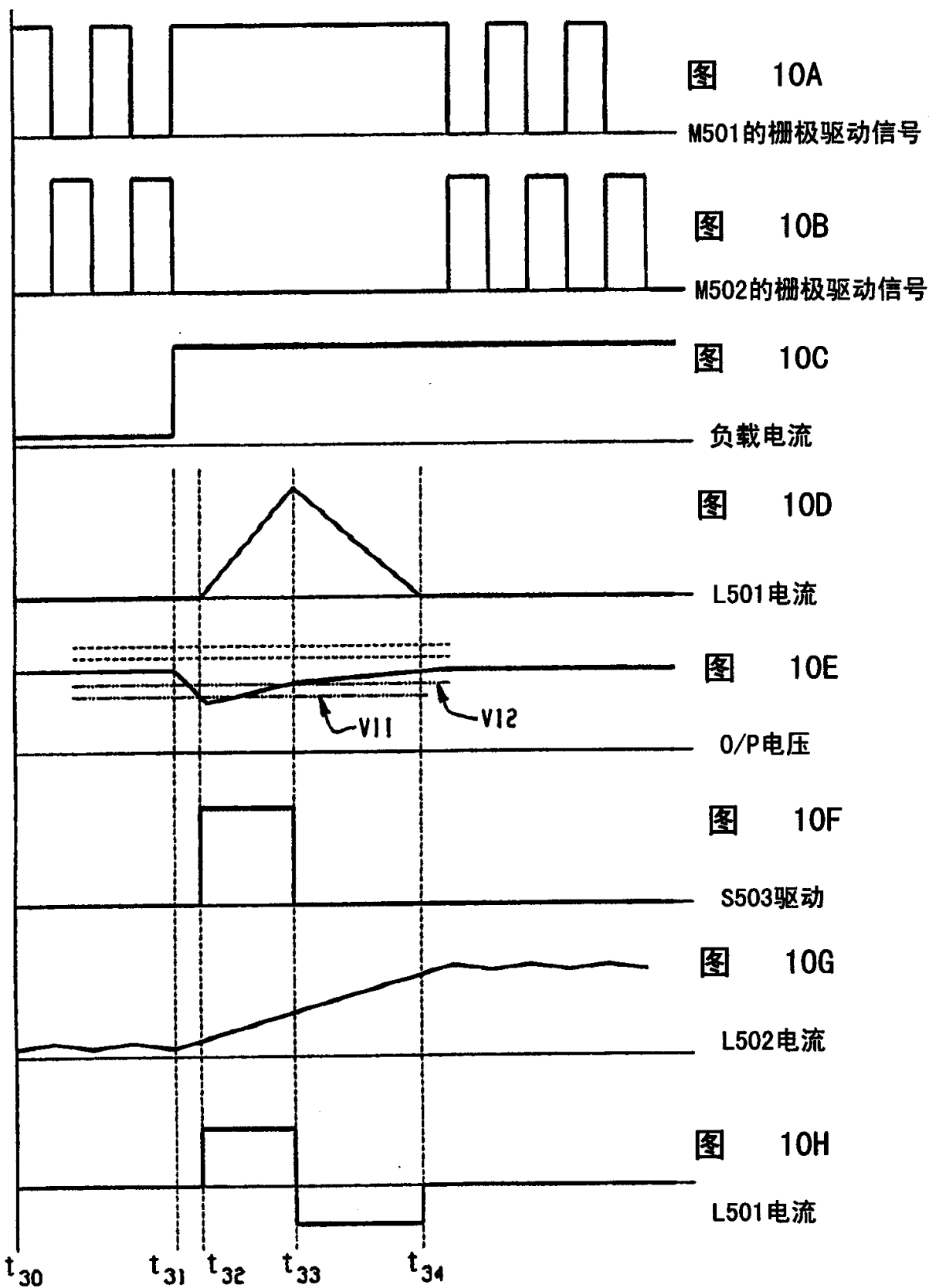


图 10

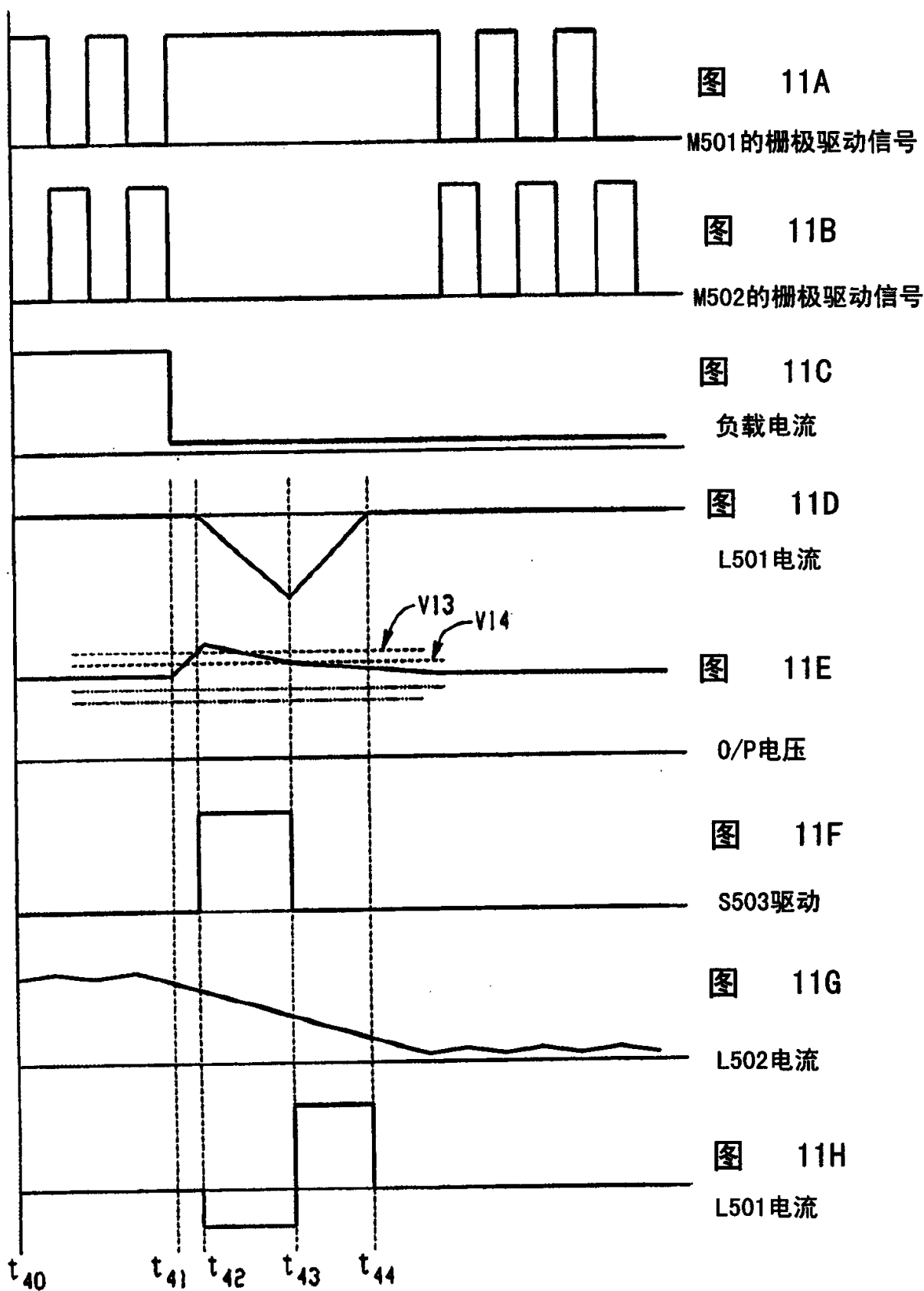


图 11