



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111416552 B

(45) 授权公告日 2021.12.21

(21) 申请号 202010313747.8

H02P 6/30 (2016.01)

(22) 申请日 2020.04.20

H02K 3/28 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

审查员 朱恒伟

申请公布号 CN 111416552 A

(43) 申请公布日 2020.07.14

(73) 专利权人 天津工业大学

地址 300387 天津市西青区宾水西道399号

(72) 发明人 陈炜 祝理想 史婷娜 夏长亮

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代理事务所 12201

代理人 张建中

(51) Int.Cl.

H02P 6/00 (2016.01)

H02P 6/08 (2016.01)

H02P 6/10 (2006.01)

权利要求书2页 说明书12页 附图3页

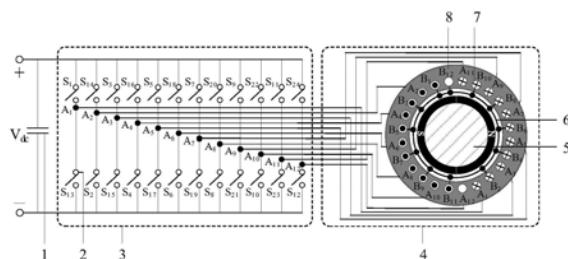
(54) 发明名称

一种柔性永磁无刷直流电机控制系统及其控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种柔性永磁无刷直流电机控制系统,包括直流电源、滤波电容、电压源逆变器、永磁无刷直流电机以及控制器;直流电源的输出端并接滤波电容;电压源逆变器设有m个并接在滤波电容两端的桥臂;每个桥臂上设有上下两个可控开关器件;永磁无刷直流电机的电枢绕组相数与桥臂数量相等;各相电枢绕组的首端对应与一个桥臂的上下两个可控开关器件的中间接点连接;各相电枢绕组的尾端连接在一起;将永磁无刷直流电机的电周期均分为若干个扇区;控制器根据转子位置,确定N、S极所对应的扇区,输出控制信号驱动相应的可控开关器件开闭。本发明还公开了一种柔性永磁无刷直流电机调速方法,根据不同导通方式和脉宽调制来实现分级调速。

B  
CN 111416552 B



CN

1. 一种柔性永磁无刷直流电机控制方法,其特征在于,设置直流电源、滤波电容、电压源逆变器、永磁无刷直流电机以及控制器;直流电源的输出端并接滤波电容;电压源逆变器设有m个并接在滤波电容两端的桥臂;每个桥臂上设有上下两个可控开关;永磁无刷直流电机的电枢绕组相数与桥臂数量相等;各相电枢绕组的首端对应与一个桥臂的上下两个可控开关的中间接点连接;各相电枢绕组的尾端连接在一起;将永磁无刷直流电机的360°电角度均分为2m个扇区;控制器根据转子位置,确定转子N极所对应的扇区,结合电机所需电磁转矩的方向输出控制信号,驱动相应的可控开关开闭;当需要永磁无刷直流电机产生逆时针旋转转矩时,使位于转子N极下的n相电枢绕组的首端同时与直流电源正极导通,使位于转子S极下的n'相电枢绕组的首端同时与直流电源负极导通;当需要永磁无刷直流电机产生顺时针旋转转矩时,使位于转子N极下的n相电枢绕组的首端同时与直流电源负极导通,使位于转子S极下的n'相电枢绕组的首端同时与直流电源正极导通;永磁无刷直流电机每180°/m换相一次,每次换相时保持n相电枢绕组流入电流同时n'相电枢绕组流出电流,n+n'≤m;其余电枢绕组悬空;在恒功率运行状态下,将给定的参考转速范围分为若干个参考转速区间,设置参考转速区间与同时导通的电枢绕组相数对照表以及滞环比较器;对照表中同时导通的电枢绕组相数,随参考转速的降低依次减一;设定滞环比较器的阈值;针对每一次给定的参考转速,由对照表确定初始同时导通的电枢绕组相数,当参考转速值减去表中当前转速区间最大转速值的差值大于阈值时,同时导通的电枢绕组相数加一,当参考转速值减去表中当前转速区间最小转速值的差值小于负的阈值时,同时导通的电枢绕组相数减一。

2. 根据权利要求1所述的柔性永磁无刷直流电机控制方法,其特征在于,以永磁无刷直流电机的N极与S极之间径向磁场为零处的分界线为物理中心线,设位于物理中心线上的电枢绕组编号为k,当悬空一相电枢绕组时,悬空第k相电枢绕组,当悬空两相以上电枢绕组时,悬空第k相电枢绕组及其左右顺序排列的电枢绕组。

3. 根据权利要求1所述的柔性永磁无刷直流电机控制方法,其特征在于,对应每一个参考转速区间,把直流电源电压调制成频率一定、宽度可变的脉冲电压序列。

4. 一种实现权利要求1至3任一所述的柔性永磁无刷直流电机控制方法的柔性永磁无刷直流电机控制系统,其特征在于,该系统包括直流电源、滤波电容、电压源逆变器、永磁无刷直流电机以及控制器;直流电源的输出端并接滤波电容;电压源逆变器设有m个并接在滤波电容两端的桥臂;每个桥臂上设有上下两个可控开关;永磁无刷直流电机的电枢绕组相数与桥臂数量相等;各相电枢绕组的首端对应与一个桥臂的上下两个可控开关的中间接点连接;各相电枢绕组的尾端连接在一起;永磁无刷直流电机的360°电角度均分为2m个扇区;控制器根据转子位置,确定转子N极所对应的扇区,结合电机所需电磁转矩的方向输出控制信号,驱动相应的可控开关开闭;当需要永磁无刷直流电机产生逆时针旋转转矩时,使位于转子N极下的n相电枢绕组的首端同时与直流电源正极导通,使位于转子S极下的n'相电枢绕组的首端同时与直流电源负极导通;当需要永磁无刷直流电机产生顺时针旋转转矩时,使位于转子N极下的n相电枢绕组的首端同时与直流电源负极导通,使位于转子S极下的n'相电枢绕组的首端同时与直流电源正极导通;n+n'≤m;该系统还设有参考转速区间与同时导通的电枢绕组相数对照表以及滞环比较器;对照表中同时导通的电枢绕组相数,随参考转速的降低依次减一;设定滞环比较器的阈值;针对每一次给定的参考转速,由对照表确

定初始同时导通的电枢绕组相数,当参考转速值减去表中当前转速区间最大转速值的差值大于阈值时,同时导通的电枢绕组相数加一,当参考转速值减去表中当前转速区间最小转速值的差值小于负的阈值时,同时导通的电枢绕组相数减一。

5.根据权利要求4所述的柔性永磁无刷直流电机控制系统,其特征在于,还包括转子位置检测模块或转子位置估算模块;转子位置检测模块包括转子位置传感器,转子位置传感器采集转子的旋转角度数据,并将采集的数据发送至控制器;转子位置估算模块采集各相端电压或相电流数据并进行运算,得到转子的旋转角度数据,其将计算得到的转子位置数据发送至控制器。

6.根据权利要求4所述的柔性永磁无刷直流电机控制系统,其特征在于,永磁无刷直流电机的电枢绕组为单层电枢绕组,设其中一个电枢绕组的编号为i,i=1、2、…m;当i<m时,第i相电枢绕组的首端与第i+1相电枢绕组的尾端沿周向依次交替排列;当m为偶数时,第m相电枢绕组的首端与第1相电枢绕组的首端相邻;第m相电枢绕组的尾端与第1相电枢绕组的尾端相邻;当m为奇数时,第m相电枢绕组的首端与第1相电枢绕组的尾端相邻;第m相电枢绕组的尾端与第1相电枢绕组的首端相邻。

7.根据权利要求4所述的柔性永磁无刷直流电机控制系统,其特征在于,m=12。

8.根据权利要求4所述的柔性永磁无刷直流电机控制系统,其特征在于,永磁无刷直流电机的电枢绕组为发卡电枢绕组,电枢绕组插入半开口或闭口槽中,中性点由铜制端环组成,电枢绕组尾端通过楔子、榫卯或焊接方式连接到端环上。

9.根据权利要求4所述的柔性永磁无刷直流电机控制系统,其特征在于,永磁无刷直流电机的气隙磁密分布波形为平顶波。

## 一种柔性永磁无刷直流电机控制系统及其控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种无刷直流电机控制系统及控制方法,特别涉及一种柔性永磁无刷直流电机控制系统及其控制方法。

### 背景技术

[0002] 目前,永磁无刷直流电机使用电子换相技术代替传统直流电机的电刷换相,保留了直流电机优越的性能,如起动转矩大、调速响应快等特点,同时也具有交流电机构造简便、方便维护和运行可靠等优点,并且转子使用永磁材料励磁没有励磁损耗。随着对新型永磁材料与电力电子技术的深入研究,使得无刷直流电机在国民经济中的生产应用得到了极大的提升。目前已普遍用于医疗器械、家用电器、电动车辆等领域。

[0003] 传统永磁无刷直流电机主要采用三相Y形接法,在理想工作状态下,相反电势在空间上表现为120°平顶宽度的梯形波,相电流是一个与反电势平顶部分同相位的矩形波,转子每转过120°电角度,电枢绕组有6个不同的导通状态,在这种工作状态下电机的电磁转矩是恒定的;且功率密度较高。但三相永磁无刷直流电机的一个普遍问题在于换相转矩波动较大。以三相六状态永磁无刷直流电机驱动为例,电机每经过一个导通状态,电枢绕组中的电流就从某一相切换到另一相,由于电枢绕组电感的作用,使得在换相时电流上升相和电流衰减相的电流变化率不同,由此造成三相电流合成的电磁转矩发生变化,从而引起转矩波动。

[0004] 三相永磁无刷直流电机驱动电路主要采用三相全桥逆变电路,该拓扑结构具有结构简单、控制方便和可控开关少等优点,但在低压大功率场合,逆变器的各个桥臂上需要多个可控开关并联,易出现电流分配不均而导致失效现象,影响系统的可靠性。

### 发明内容

[0005] 本发明为解决公知技术中存在的技术问题而提供一种减少转矩波动且可靠性高的柔性永磁无刷直流电机控制系统及其控制方法。

[0006] 本发明为解决公知技术中存在的技术问题所采取的技术方案是:一种柔性永磁无刷直流电机控制系统,包括直流电源、滤波电容、电压源逆变器、永磁无刷直流电机以及控制器;直流电源的输出端并接滤波电容;电压源逆变器设有m个并接在滤波电容两端的桥臂;每个桥臂上设有上下两个可控开关;永磁无刷直流电机的电枢绕组相数与桥臂数量相等;各相电枢绕组的首端对应与一个桥臂的上下两个可控开关的中间接点连接;各相电枢绕组的尾端连接在一起;将永磁无刷直流电机的360°电角度均分为若干个扇区;控制器根据转子位置,确定转子N极所对应的扇区,结合电机所需电磁转矩的方向输出控制信号,驱动相应的可控开关开闭;当需要永磁无刷直流电机产生逆时针旋转转矩时,使位于转子N极下的n相电枢绕组的首端同时与直流电源正极导通,使位于转子S极下的n'相电枢绕组的首端同时与直流电源负极导通;当需要永磁无刷直流电机产生顺时针旋转转矩时,使位于转子N极下的n相电枢绕组的首端同时与直流电源负极导通,使位于转子S极下的n'相电枢绕

组的首端同时与直流电源正极导通;  $n+n' \leq m$ 。

[0007] 进一步地,还包括转子位置检测模块或转子位置估算模块;转子位置检测模块包括转子位置传感器,转子位置传感器采集转子的旋转角度数据,并将采集的数据发送至控制器;转子位置估算模块采集各相端电压或相电流数据并进行运算,得到转子的旋转角度数据,其将计算得到的转子位置数据发送至控制器。

[0008] 进一步地,永磁无刷直流电机的电枢绕组为单层电枢绕组,设其中一个电枢绕组的编号为  $i$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ ;当  $i < m$  时,第  $i$  相电枢绕组的首端与第  $i+1$  相电枢绕组的尾端沿周向依次交替排列;当  $m$  为偶数时,第  $m$  相电枢绕组的首端与第 1 相电枢绕组的首端相邻;第  $m$  相电枢绕组的尾端与第 1 相电枢绕组的尾端相邻;当  $m$  为奇数时,第  $m$  相电枢绕组的首端与第 1 相电枢绕组的尾端相邻;第  $m$  相电枢绕组的尾端与第 1 相电枢绕组的首端相邻。

[0009] 进一步地,  $m=12$ 。

[0010] 进一步地,永磁无刷直流电机的电枢绕组为发卡电枢绕组,电枢绕组插入半开口或闭口槽中,中性点由铜制端环组成,电枢绕组尾端通过楔子、榫卯或焊接方式连接到端环上。

[0011] 进一步地,永磁无刷直流电机的气隙磁密分布波形为平顶波。

[0012] 本发明还提供了一种利用上述的柔性永磁无刷直流电机控制系统的柔性永磁无刷直流电机控制方法,永磁无刷直流电机每  $180^\circ/m$  换相一次,将  $360^\circ$  电角度均匀划分为  $2m$  个扇区;每次换相时保持  $n$  相电枢绕组流入电流同时  $n'$  相电枢绕组流出电流,  $n+n' \leq m$ ;其余电枢绕组悬空。

[0013] 进一步地,以永磁无刷直流电机的 N 极与 S 极之间径向磁场为零处的分界线为物理中心线,设位于物理中心线上的电枢绕组编号为  $k$ ,当悬空一相电枢绕组时,悬空第  $k$  相电枢绕组,当悬空两相以上电枢绕组时,悬空第  $k$  相电枢绕组及其左右顺序排列的电枢绕组。

[0014] 进一步地,在恒功率运行状态下,将给定的参考转速范围分为若干个参考转速区间,设置参考转速区间与同时导通的电枢绕组相数对照表以及滞环比较器;对照表中同时导通的电枢绕组相数,随参考转速的降低依次减一;设定滞环比较器的阈值;针对每一次给定的参考转速,由对照表确定初始同时导通的电枢绕组相数,当参考转速值减去表中当前转速区间最大转速值的差值大于阈值时,同时导通的电枢绕组相数加一,当参考转速值减去表中当前转速区间最小转速值的差值小于负的阈值时,同时导通的电枢绕组相数减一。

[0015] 进一步地,对应每一个参考转速区间,把直流电源电压调制成频率一定、宽度可变的脉冲电压序列。

[0016] 本发明具有的优点和积极效果是:

[0017] 本发明所提出的柔性永磁无刷直流电机控制系统充分利用了可控开关,既发挥了无刷直流电机的优势,又削弱了转矩波动。本发明提高了电机系统功率密度和带载能力,拓宽了调速范围,并减小了转矩波动,具体有以下四方面优点:

[0018] 1、体积重量方面:转矩密度和功率密度高。 $m$  相柔性永磁无刷直流电机可以实现  $n+n'$  相同时导通(任意时刻有  $n+n'/m$  的电枢绕组导通),  $n+n' \leq m$ ;相比普通三相两两导通无刷直流电机(任意时刻有  $2/3$  的电枢绕组导通),转矩密度和功率密度都会提高,例如十二相永磁无刷直流电机的转矩密度和功率密度有望提高  $37\%$  左右。

[0019] 2、转矩方面:①平均电磁转矩大。由于柔性永磁无刷直流电机系统电枢绕组利用

率高,电磁转矩大、过载能力强;②转矩波动小。由于 $m-1$ 导通方式下每次换相时仅切换 $1/(m-1)$ 的电磁转矩,与普通三相两两导通无刷直流电机相比转矩波动大幅减少,以十二相为例,每次换相切换的转矩为 $1/11$ ,比传统三相电机减少80%,转矩波动也会大幅减小。

[0020] 3、转速方面:①控制简单、调速灵活。由于柔性永磁无刷直流电机系统可以通过导通方式和脉宽调制来分级调速,根据不同导通方式的驱动能力进行分区,在各分区内通过脉宽调制来调速;②调速范围宽。由于驱动电压为方波,且电枢绕组利用率高,所以调速范围宽。

[0021] 4、可靠性方面:①可靠性高。由于所有可控开关不需要并联避免了电流不均导致的失效风险;且任一桥臂上下两个开关的导通信号通常被悬空状态隔开,无需设置死区;②容错带载能力强。由于每一相都可以分别控制,与成组切除的多相电机控制系统相比容错控制下的带载能力大幅提高。

[0022] 5、本发明可以应用在医疗器械、家用电器、电动车辆、多电飞机、船舶推进等许多领域,尤其对于提高电动汽车运行性能和安全可靠性具有重要实用价值和广泛应用前景。

## 附图说明

[0023] 图1是本发明的一种十二相柔性永磁无刷直流电机系统原理框图;

[0024] 图2是本发明的一种十一相柔性永磁无刷直流电机系统原理框图;

[0025] 图3是本发明中的一相电枢绕组与一个桥臂的连接图;

[0026] 图4是本发明中的一种十二相永磁无刷直流电机电枢绕组展开图;

[0027] 图5是本发明中的一种柔性永磁无刷直流电机系统控制框图;

[0028] 图6是本发明中的一种十二相永磁无刷直流电机转速分区滞环切换方式示意图;

[0029] 图中:1、滤波电容;2、可控开关;3、电压源逆变器;4、永磁无刷直流电机;5、转子;6、端环;7、电枢绕组;8、定子;9、功率开关器件;10、续流二极管。

## 具体实施方式

[0030] 为能进一步了解本发明的发明内容、特点及功效,兹列举以下实施例,并配合附图详细说明如下:

[0031] 请参见图1至图6,一种柔性永磁无刷直流电机控制系统,包括直流电源、滤波电容1、电压源逆变器3、永磁无刷直流电机4以及控制器;直流电源的输出端并接滤波电容1;电压源逆变器3设有 $m$ 个并接在滤波电容1两端的桥臂;每个桥臂上设有上下两个可控开关2;永磁无刷直流电机4的电枢绕组相数与桥臂数量相等;各相电枢绕组7的首端对应与一个桥臂的上下两个可控开关2的中间接点连接;各相电枢绕组7的尾端连接在一起;将永磁无刷直流电机4的 $360^\circ$ 电角度均分为若干个扇区;控制器根据转子5的旋转位置,确定转子5的N极所对应的扇区,结合永磁无刷直流电机4所需的电磁转矩的方向输出控制信号,驱动相应的可控开关2开闭;当需要永磁无刷直流电机4产生逆时针旋转转矩时,使位于转子5的N极下的 $n$ 相电枢绕组7的首端同时与直流电源正极导通,使位于转子5的S极下的 $n'$ 相电枢绕组7的首端同时与直流电源负极导通;当需要永磁无刷直流电机4产生顺时针旋转转矩时,使位于转子5的N极下的 $n$ 相电枢绕组7的首端同时与直流电源负极导通,使位于转子5的S极下的 $n'$ 相电枢绕组7的首端同时与直流电源正极导通; $n+n' \leq m$ , $n+n'$ 表示电枢绕组7同时导通

的相数。 $n$ 和 $n'$ 均为正整数。

[0032] 一种多相永磁无刷直流电机的各相电枢绕组依次编号为1、2、3…12… $m$ ;其中各相电枢绕组的首端依次编号为 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ … $A_{12}$ … $A_m$ ;各相电枢绕组的尾端依次编号为 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ … $B_{12}$ … $B_m$ ;定子槽编号依次为 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ … $G_{12}$ … $G_{2m}$ ;电流从外部流向某相电枢绕组7的首端,即该相电枢绕组7的首端与直流电源的正极导通;电流从某相电枢绕组7的首端流出,即该相电枢绕组7的首端与直流电源的负极导通。

[0033] 一种多桥臂逆变器的每个桥臂设有上下两个可控开关2,每个可控开关2在实施时可由功率开关器件9及与功率开关器件9并联的续流二极管10组成,如图3所示;此逆变器为两电平电压源逆变器,可根据需要替换为三电平或多电平电压源逆变器。

[0034] 本发明的一种柔性永磁无刷直流电机控制系统还包括转子位置检测模块或转子位置估算模块,所述的永磁无刷直流电机4通过可控开关2实现换相,可控开关2的开关状态由转子5的位置来确定,所以需要对转子5的旋转位置进行实时检测。其中,转子位置信息可以是由转子位置检测模块或转子位置估算模块来获得;转子位置检测模块包括转子位置传感器,转子位置传感器采集转子5的旋转角度数据,并将采集的数据发送至控制器;转子位置估算模块采集各相端电压或相电流数据并进行运算,得到转子5的旋转角度数据,其将计算得到的转子位置数据发送至控制器。

[0035] 优选地,永磁无刷直流电机4的电枢绕组7可为单层电枢绕组7,可设其中一个电枢绕组7的编号为 $i$ , $i=1,2,\dots,m$ ;当 $i < m$ 时,第 $i$ 相电枢绕组7的首端与第 $i+1$ 相电枢绕组7的尾端可沿周向交替排列;当 $m$ 为偶数时,第 $m$ 相电枢绕组7的首端与第1相电枢绕组7的首端相邻;第 $m$ 相电枢绕组7的尾端与第1相电枢绕组7的尾端相邻;当 $m$ 为奇数时,第 $m$ 相电枢绕组7的首端与第1相电枢绕组7的尾端相邻;第 $m$ 相电枢绕组7的尾端与第1相电枢绕组7的首端相邻。永磁无刷直流电机的电枢绕组既可采用上述方法中单层电枢绕组方式布设,也可以采用其他电枢绕组布设方式,比如采用双层或多层电枢绕组布设方式。

[0036] 优选地,永磁无刷直流电机4可为十二相永磁无刷直流电机4,即 $m=12$ 。

[0037] 优选地,永磁无刷直流电机4的电枢绕组7可为发卡电枢绕组,电枢绕组7可插入半开口或闭口槽中,中性点可由铜制端环6组成,电枢绕组7尾端可通过楔子、榫卯或焊接方式连接到端环6上。

[0038] 优选地,永磁无刷直流电机4的气隙磁密分布波形为平顶波。

[0039] 本发明还提供了一种利用上述的柔性永磁无刷直流电机控制系统的柔性永磁无刷直流电机控制方法,可使永磁无刷直流电机4每 $180^\circ/m$ 换相一次,将 $360^\circ$ 电角度均匀划分为 $2m$ 个扇区;每次换相时可保持 $n$ 相电枢绕组7流入电流同时 $n'$ 相电枢绕组7流出电流, $n+n' \leq m$ ;其余电枢绕组7悬空。

[0040] 优选地, $m$ 相永磁无刷直流电机4均可采用 $n+n'$ 相同时导通, $n+n' \leq m$ ;当导通相较少时,在一个电周期内轮替导通各相。

[0041] 优选地,永磁无刷直流电机4的N极与S极之间径向磁场为零处的分界线为物理中心线,可设位于物理中心线上的电枢绕组7编号为 $k$ ,当悬空一相电枢绕组7时,悬空第 $k$ 相电枢绕组7,当悬空两相以上电枢绕组7时,悬空第 $k$ 相电枢绕组7及其左右顺序排列的电枢绕组。

[0042] 优选地,在恒功率运行状态下,可将给定的参考转速范围分为若干个参考转速区

间,以同样的形式对不同导通方式的驱动能力进行转速分区,在各转速分区内通过脉宽调制来调速,并在分区边缘用滞环方式切换导通方式;设置参考转速区间与同时导通的电枢绕组相数对照表以及滞环比较器;对照表中同时导通的电枢绕组相数,随参考转速的降低依次减一;设定滞环比较器的阈值;针对每一次给定的参考转速,由对照表确定初始同时导通的电枢绕组7相数,当参考转速值减去表中当前转速区间最大转速值的差值大于阈值时,同时导通的电枢绕组7相数加一,当参考转速值减去表中当前转速区间最小转速值的差值小于负的阈值时,同时导通的电枢绕组7相数减一。

[0043] 优选地,对应每一个参考转速区间,可把直流电源电压调制成频率一定、宽度可变的脉冲电压序列,实现调压调速。

[0044] 上述的直流电源、滤波电容1、可控开关2、控制器、转子位置传感器、功率开关器件9、续流二极管10等元器件均可采用现有技术中的适用产品,比如直流电源可为车用直流电源、超级电容、大容量电池等,功率开关器件9可选用IGBT、MOSFET等类型的功率开关器件;控制器可选现有技术中工控机、可编程控制器、数字信号处理器(DSP)、现场可编程门阵列(FPGA)、精简指令集处理器(ARM)等产品;转子位置传感器可采用霍尔传感器、增量式转子位置传感器、旋转编码器等。

[0045] 下面以本发明的一个优选实施例来进一步说明本发明的工作原理:

[0046] 本发明所述的柔性永磁无刷直流电机4控制系统由多相永磁无刷直流电机4及多桥臂逆变器3构成,以 $m=12$ ,即十二相永磁无刷直流电机4为例进行了说明。

[0047] 如图1所示,本发明的柔性永磁无刷直流电机4控制系统由直流电源、滤波电容1、两电平电压源逆变器3和十二相永磁无刷直流电机4构成。其中,两电平电压源逆变器3由12个桥臂构成,每个桥臂上下两个可控开关2,由一个直流电源单独供电。各相电枢绕组依次编号为1、2、3…12;其中各相电枢绕组的首端依次编号为 $A_1, A_2, A_3 \dots A_{12}$ ;各相电枢绕组的尾端依次编号为 $B_1, B_2, B_3 \dots B_{12}$ 。永磁无刷直流电机4的 $A_1$ 相电枢绕组连接到第一桥臂, $A_2$ 相电枢绕组连接到第二桥臂, $A_3$ 相电枢绕组连接到第三桥臂, $A_4$ 相电枢绕组连接到第四桥臂, $A_5$ 相电枢绕组连接到第五桥臂, $A_6$ 相电枢绕组连接到第六桥臂, $A_7$ 相电枢绕组连接到第七桥臂, $A_8$ 相电枢绕组连接到第八桥臂, $A_9$ 相电枢绕组连接到第九桥臂, $A_{10}$ 相电枢绕组连接到第十桥臂, $A_{11}$ 相电枢绕组连接到第十一桥臂, $A_{12}$ 相电枢绕组连接到第十二桥臂;各项电枢绕组的尾端,如 $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9, B_{10}, B_{11}, B_{12}$ ,连接在一起组成永磁无刷直流电机4的中性点。十二相永磁无刷直流电机4的转子励磁磁场的N、S极如图1所示。定子8上设有电枢绕组7,同时每相电枢绕组7上可设有一个霍尔传感器,当转子5旋转到相应位置时,霍尔传感器会发出信号至控制器。

[0048] 十二相永磁无刷直流电机4的电枢绕组7首端和尾端交替排列,电枢绕组展开图如图4所示,每槽放置单层电枢绕组,一对极下共24槽;且永磁无刷直流电机4的气隙磁场设计为极弧系数尽量大的平顶波。

[0049] 柔性永磁无刷直流电机4控制系统可根据需要选择逆变器3的导通桥臂数。以十一相导通方式产生逆时针电磁转矩为例,任意时刻可根据转子5所在扇区确定导通的十一相电枢绕组和各电枢绕组导通方向,满足所有转子5的N极对应的导体中电流往里流,S极对应的导体中电流往外流。这样,所有的导通电枢绕组都会在转子5上产生逆时针旋转的电磁转矩。把N极与S极磁场为零处的分界线称为物理中心线,物理中心线对应的电枢绕组7悬空

(如图1中的A<sub>12</sub>电枢绕组)。在图1所示转子5的位置处控制A<sub>1</sub>~A<sub>11</sub>相电枢绕组导通,当转子5转到使物理中心线位于A<sub>12</sub>和A<sub>1</sub>相电枢绕组中间的位置时,进入下一扇区,S<sub>1</sub>关断、S<sub>12</sub>导通,换相到A<sub>2</sub>~A<sub>12</sub>相电枢绕组导通;当转子5转到使物理中心线位于A<sub>1</sub>和B<sub>2</sub>相电枢绕组中间的位置时,再次进入下一扇区,S<sub>2</sub>关断、S<sub>13</sub>导通,换相到A<sub>3</sub>~A<sub>1</sub>相电枢绕组导通。对于十二相永磁无刷直流电机(m=12),每180°/m=15°换相一次,将360°电角度划分为24个扇区;十二个逆变器桥臂,共24个开关管,对应2\*m=24种十一相导通的状态;各扇区对应的导通状态如表1中内容所示。

[0050] 表1、逆时针电磁转矩对应的十一相导通关系表

扇区	导通可控开关 2 (其他可控开关 2 关闭)	导通相 (+表示该相连接到电源正极, -表示该相连接到电源负极)
0°~15°	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub>	A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +
15°~30°	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub>	A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -
30°~45°	S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub>	A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -
45°~60°	S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub>	A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +
60°~75°	S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub>	A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -
75°~90°	S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub>	A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +
90°~105°	S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub>	A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +
105°~120°	S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub>	A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -
120°~135°	S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub>	A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +
135°~150°	S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub>	A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +
150°~165°	S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub>	A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -
165°~180°	S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub>	A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +
180°~195°	S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub>	A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -

[0051]

[0052]	195°~210°	S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub>	A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +
	210°~225°	S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +
	225°~240°	S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub>	A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +, A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -
	240°~255°	S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>	A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +, A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +
	255°~270°	S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>	A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +, A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -
	270°~285°	S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub>	A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +, A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +
	285°~300°	S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub>	A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +, A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -
	300°~315°	S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>	A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +, A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +
	315°~330°	S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub>	A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +, A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -
	330°~345°	S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub>	A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +, A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +
	345°~360°	S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub>	A <sub>12</sub> +, A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -

[0053] 由表1可知,一个电周期内,每相电枢绕组正向导通165°、负向导通165°;每次换相在两相之间进行,其余十相电枢绕组状态不变。

[0054] 需要产生顺时针旋转的电磁转矩时,可以控制所有转子5的N极对应的导体中电流往外流,S极对应的导体中电流往里流,物理中心线对应的电枢绕组7悬空。这样,所有导通的电枢绕组都会在转子5上产生顺时针旋转的电磁转矩。需要控制十二相永磁无刷直流电机4产生顺时针电磁转矩时,24个扇区与24种十一相导通状态对应情况如表2所示。

[0055] 表2、顺时针电磁转矩对应的十一相导通关系表

[0056]

扇区	导通可控开关 2 (其他可控开关 2 关闭)	导通相 (+表示该相连接到电源正极, -表示该相连接到电源负极)
0°~15°	S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub>	A <sub>1-</sub> , A <sub>2+</sub> , A <sub>3-</sub> , A <sub>4+</sub> , A <sub>5-</sub> , A <sub>6+</sub> , A <sub>7-</sub> , A <sub>8+</sub> , A <sub>9-</sub> , A <sub>10+</sub> , A <sub>11-</sub> ,
15°~30°	S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub>	A <sub>2+</sub> , A <sub>3-</sub> , A <sub>4+</sub> , A <sub>5-</sub> , A <sub>6+</sub> , A <sub>7-</sub> , A <sub>8+</sub> , A <sub>9-</sub> , A <sub>10+</sub> , A <sub>11-</sub> , A <sub>12+</sub>
30°~45°	S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub>	A <sub>3-</sub> , A <sub>4+</sub> , A <sub>5-</sub> , A <sub>6+</sub> , A <sub>7-</sub> , A <sub>8+</sub> , A <sub>9-</sub> , A <sub>10+</sub> , A <sub>11-</sub> , A <sub>12+</sub> , A <sub>1+</sub>
45°~60°	S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub>	A <sub>4+</sub> , A <sub>5-</sub> , A <sub>6+</sub> , A <sub>7-</sub> , A <sub>8+</sub> , A <sub>9-</sub> , A <sub>10+</sub> , A <sub>11-</sub> , A <sub>12+</sub> , A <sub>1+</sub> , A <sub>2-</sub>
60°~75°	S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>	A <sub>5-</sub> , A <sub>6+</sub> , A <sub>7-</sub> , A <sub>8+</sub> , A <sub>9-</sub> , A <sub>10+</sub> , A <sub>11-</sub> , A <sub>12+</sub> , A <sub>1+</sub> , A <sub>2-</sub> , A <sub>3+</sub>
75°~90°	S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>	A <sub>6+</sub> , A <sub>7-</sub> , A <sub>8+</sub> , A <sub>9-</sub> , A <sub>10+</sub> , A <sub>11-</sub> , A <sub>12+</sub> , A <sub>1+</sub> , A <sub>2-</sub> , A <sub>3+</sub> , A <sub>4-</sub>
90°~105°	S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub>	A <sub>7-</sub> , A <sub>8+</sub> , A <sub>9-</sub> , A <sub>10+</sub> , A <sub>11-</sub> , A <sub>12+</sub> , A <sub>1+</sub> , A <sub>2-</sub> , A <sub>3+</sub> , A <sub>4-</sub> , A <sub>5+</sub>
105°~120°	S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub>	A <sub>8+</sub> , A <sub>9-</sub> , A <sub>10+</sub> , A <sub>11-</sub> , A <sub>12+</sub> , A <sub>1+</sub> , A <sub>2-</sub> , A <sub>3+</sub> , A <sub>4-</sub> , A <sub>5+</sub> , A <sub>6-</sub>
120°~135°	S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>	A <sub>9-</sub> , A <sub>10+</sub> , A <sub>11-</sub> , A <sub>12+</sub> , A <sub>1+</sub> , A <sub>2-</sub> , A <sub>3+</sub> , A <sub>4-</sub> , A <sub>5+</sub> , A <sub>6-</sub> , A <sub>7+</sub>
135°~150°	S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub>	A <sub>10+</sub> , A <sub>11-</sub> , A <sub>12+</sub> , A <sub>1+</sub> , A <sub>2-</sub> , A <sub>3+</sub> , A <sub>4-</sub> , A <sub>5+</sub> , A <sub>6-</sub> , A <sub>7+</sub> , A <sub>8-</sub>
150°~165°	S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub>	A <sub>11-</sub> , A <sub>12+</sub> , A <sub>1+</sub> , A <sub>2-</sub> , A <sub>3+</sub> , A <sub>4-</sub> , A <sub>5+</sub> , A <sub>6-</sub> , A <sub>7+</sub> , A <sub>8-</sub> , A <sub>9+</sub>
165°~180°	S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub>	A <sub>12+</sub> , A <sub>1+</sub> , A <sub>2-</sub> , A <sub>3+</sub> , A <sub>4-</sub> , A <sub>5+</sub> , A <sub>6-</sub> , A <sub>7+</sub> , A <sub>8-</sub> , A <sub>9+</sub> , A <sub>10-</sub>
180°~195°	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub>	A <sub>1+</sub> , A <sub>2-</sub> , A <sub>3+</sub> , A <sub>4-</sub> , A <sub>5+</sub> , A <sub>6-</sub> , A <sub>7+</sub> , A <sub>8-</sub> , A <sub>9+</sub> , A <sub>10-</sub> , A <sub>11+</sub>
195°~210°	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub>	A <sub>2-</sub> , A <sub>3+</sub> , A <sub>4-</sub> , A <sub>5+</sub> , A <sub>6-</sub> , A <sub>7+</sub> , A <sub>8-</sub> , A <sub>9+</sub> , A <sub>10-</sub> , A <sub>11+</sub> , A <sub>12-</sub>
210°~225°	S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub>	A <sub>3+</sub> , A <sub>4-</sub> , A <sub>5+</sub> , A <sub>6-</sub> , A <sub>7+</sub> , A <sub>8-</sub> , A <sub>9+</sub> , A <sub>10-</sub> , A <sub>11+</sub> , A <sub>12-</sub> , A <sub>1-</sub>

[0057]	225°~240°	S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub>	A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +
	240°~255°	S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub>	A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -
	255°~270°	S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub>	A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +
	270°~285°	S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub>	A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -
	285°~300°	S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub>	A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +
	300°~315°	S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub>	A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -
	315°~330°	S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub>	A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +
	330°~345°	S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub>	A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +
	345°~360°	S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub>	A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +

[0058] 当控制电机两相导通,需要产生逆时针旋转的电磁转矩时,24个扇区与24种两相导通状态对应情况如表3所示。

[0059] 表3、逆时针电磁转矩对应的两相导通关系表

扇区	导通可控开关2(其他可控开关2关闭)	导通相 (+表示该相连接到电源正极, -表示该相连接到电源负极)
0°~15°	S <sub>5</sub> , S <sub>6</sub>	A <sub>5</sub> +, A <sub>6</sub> -
15°~30°	S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>	A <sub>6</sub> -, A <sub>7</sub> +
30°~45°	S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub>	A <sub>7</sub> +, A <sub>8</sub> -
45°~60°	S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub>	A <sub>8</sub> -, A <sub>9</sub> +
60°~75°	S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub>	A <sub>9</sub> +, A <sub>10</sub> -
75°~90°	S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub>	A <sub>10</sub> -, A <sub>11</sub> +
90°~105°	S <sub>11</sub> , S <sub>12</sub>	A <sub>11</sub> +, A <sub>12</sub> -
105°~120°	S <sub>12</sub> , S <sub>13</sub>	A <sub>12</sub> -, A <sub>1</sub> -
120°~135°	S <sub>13</sub> , S <sub>14</sub>	A <sub>1</sub> -, A <sub>2</sub> +

[0061]	135°~150°	S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub>	A <sub>2</sub> +, A <sub>3</sub> -
	150°~165°	S <sub>15</sub> , S <sub>16</sub>	A <sub>3</sub> -, A <sub>4</sub> +
	165°~180°	S <sub>16</sub> , S <sub>17</sub>	A <sub>4</sub> +, A <sub>5</sub> -
	180°~195°	S <sub>17</sub> , S <sub>18</sub>	A <sub>5</sub> -, A <sub>6</sub> +
	195°~210°	S <sub>18</sub> , S <sub>19</sub>	A <sub>6</sub> +, A <sub>7</sub> -
	210°~225°	S <sub>19</sub> , S <sub>20</sub>	A <sub>7</sub> -, A <sub>8</sub> +
	225°~240°	S <sub>20</sub> , S <sub>21</sub>	A <sub>8</sub> +, A <sub>9</sub> -
	240°~255°	S <sub>21</sub> , S <sub>22</sub>	A <sub>9</sub> -, A <sub>10</sub> +
	255°~270°	S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub>	A <sub>10</sub> +, A <sub>11</sub> -
	270°~285°	S <sub>23</sub> , S <sub>24</sub>	A <sub>11</sub> -, A <sub>12</sub> +
	285°~300°	S <sub>24</sub> , S <sub>1</sub>	A <sub>12</sub> +, A <sub>1</sub> +
	300°~315°	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> +, A <sub>2</sub> -
	315°~330°	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> -, A <sub>3</sub> +
	330°~345°	S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>	A <sub>3</sub> +, A <sub>4</sub> -
	345°~360°	S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub>	A <sub>4</sub> -, A <sub>5</sub> +

[0062] 永磁无刷直流电机4通过可控开关2实现换相,可控开关2的开关状态由转子5的位置来确定,所以需要对转子5的位置进行实时检测。可用于位置检测的方法包括有位置传感器检测法和无位置传感器检测法两种,前者通过位置传感器来获取转子5的位置信息,而后者是通过永磁无刷直流电机4的各相端电压或相电流与转子5位置角的函数关系来解调出转子5的位置信息。

[0063] 以逆时针电磁转矩旋转方向为例,当检测到转子5的位置在第一扇区(0°~15°)时,此时可控开关S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>4</sub>、S<sub>5</sub>、S<sub>6</sub>、S<sub>7</sub>、S<sub>8</sub>、S<sub>9</sub>、S<sub>10</sub>、S<sub>11</sub>导通。转子5经过旋转进入下一扇区,位置传感器将转子5的位置信号转换成电信号输送到控制器,如图5所示,控制器经过运算得出定子8各相电枢绕组的导通逻辑信号,按照表1所示的导通关系,在永磁无刷直流电机4气隙中将合成持续不断的旋转磁场,使永磁无刷直流电机4转子5不断旋转。

[0064] 本发明的柔性永磁无刷直流电机4控制系统可根据不同应用场合驱动系统需要,选择逆变器3的导通桥臂数,并选择永磁无刷直流电机4导通相数,根据不同导通方式的驱动能力对转速进行分区,并在各分区内配合脉宽调制来实现分级调速。示例的转速分区情况如表4内容所示,当转速达到20000rpm以上时,需利用逆变器3控制永磁无刷直流电机4十一相电枢绕组导通,此时逆变器3有十一个桥臂的可控开关动作;当转速在20000rpm~18000rpm之间时,需利用逆变器3控制永磁无刷直流电机4十相电枢绕组导通,此时逆变器3有十个桥臂的可控开关动作;当转速在18000rpm~16000rpm之间时,需利用逆变器3控制永磁无刷直流电机4九相电枢绕组导通,此时逆变器3有九个桥臂的可控开关动作;当转速在16000rpm~14000rpm之间时,需利用逆变器3控制永磁无刷直流电机4八相电枢绕组导通,此时逆变器3有八个桥臂的可控开关动作;当转速在14000rpm~12000rpm之间时,需利用逆变器3控制永磁无刷直流电机4七相电枢绕组导通,此时逆变器3有七个桥臂的可控开关动作;当转速在12000rpm~10000rpm之间时,需利用逆变器3控制永磁无刷直流电机4六相电枢绕组导通,此时逆变器3有六个桥臂的可控开关动作;当转速在10000rpm~8000rpm之间

时,需利用逆变器3控制永磁无刷直流电机4五相电枢绕组导通,此时逆变器3有五个桥臂的可控开关动作;当转速在8000rpm~6000rpm之间时,需利用逆变器3控制永磁无刷直流电机4四相电枢绕组导通,此时逆变器3有四个桥臂的可控开关动作;当转速在6000rpm~4000rpm之间时,需利用逆变器3控制永磁无刷直流电机4三相电枢绕组导通,此时逆变器3有三个桥臂的可控开关动作;当转速在4000rpm以下时,需利用逆变器3控制永磁无刷直流电机4两相电枢绕组导通,此时逆变器3有两个桥臂的可控开关动作,此导通规律即实现了不同导通方式对永磁无刷直流电机4的调速。

[0065] 表4、参考转速区间与同时导通的电枢绕组相数对照表

导通方式	十一相导通	十相导通	九相导通	八相导通	七相导通
转速范围	20000rpm 以上	18000rpm~ 20000rpm	16000rpm~ 18000rpm	14000rpm~ 16000rpm	12000rpm~ 14000rpm
导通方式	六相导通	五相导通	四相导通	三相导通	两相导通
转速范围	10000rpm~ 12000rpm	8000rpm~ 10000rpm	6000rpm~ 8000rpm	4000rpm~ 6000rpm	4000rpm 以下

[0067] 在不同转速区间内,通过脉冲宽度调制(PWM)来调节永磁无刷直流电机4转速。用PWM调制的方法,可把恒定的直流源电压调制成频率一定、宽度可变的脉冲电压序列。在一个开关周期(T)内,当 $0 \leq t < t_{on}$ 时,输出为高电平,可控开关导通,电源电压加到永磁无刷直流电机4电枢绕组7两端;当 $t_{on} \leq t < T$ 时,输出为低电平,可控开关关断,电枢绕组7两端失去电源,电枢绕组的电流经二极管续流。而永磁无刷直流电机4电枢绕组7两端得到的平均电压为 $V = \frac{t_{on}}{T} V_{dc} = \alpha V_{dc}$ ,其中 $\alpha = t_{on}/T$ 为PWM波形的占空比,改变 $\alpha$ 即可改变输出平均电压的大小,实现在相应的转速分区范围内调节永磁无刷直流电机4转速。

[0068] 初始导通方式由初始参考转速查表4确定。当参考转速变化时,在转速分区边缘用滞环方式来确定采用哪个分区的控制方式。如图6所示:给定参考转速用 $n^*$ 表示,当前转速区间的上限值用 $n_1$ 表示,当前转速区间的下限值用 $n_2$ 表示,参考转速与转速区间上限值的差值用 $\tilde{n}_1$ 表示,参考转速与转速区间下限值的差值用 $\tilde{n}_2$ 表示。

[0069] 当永磁无刷直流电机4运行在16000rpm~18000rpm转速区间内,此时由九相导通控制,参考转速值与转速区间上、下限值由滞环比较器进行比较,当永磁无刷直流电机4的参考转速值超过18300rpm时,即转速差值为 $\tilde{n}_1 = n^* - n_1 > 300$ rpm,转为十相导通控制;当永磁无刷直流电机4的参考转速值低于15700rpm时,即转速差值为 $\tilde{n}_2 = n^* - n_2 < -300$ rpm,转为八相导通控制。只要在不同分区通过调整永磁无刷直流电机4中的定子8电流使定子电枢绕组7仍能形成圆形旋转磁场,就能保证永磁无刷直流电机4平稳运行。

[0070] 本发明所述的十二相永磁无刷直流电机4配合十二桥臂逆变器3可满足高性能的永磁无刷直流电机4驱动系统要求。高功率密度的多相永磁无刷直流电机4在柔性控制下可显著提高电枢绕组利用率、减小转矩波动。对于高性能的电动汽车驱动系统应用,本发明具有重要的理论参考价值。

[0071] 以上所述的实施例仅用于说明本发明的技术思想及特点,其目的在于使本领域内的技术人员能够理解本发明的内容并据以实施,不能仅以本实施例来限定本发明的专利范围,即凡本发明所揭示的精神所作的同等变化或修饰,仍落在本发明的专利范围内。

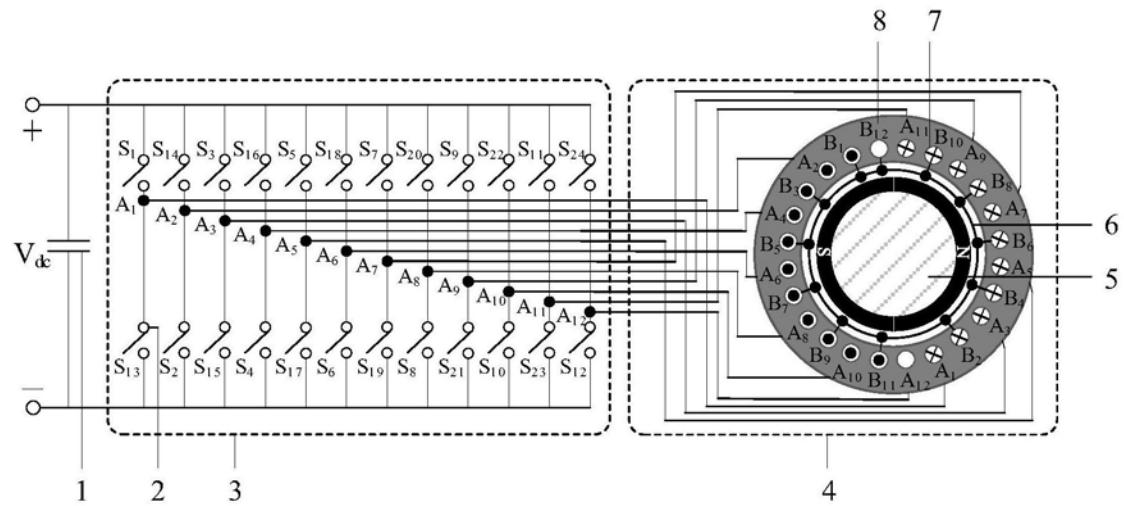


图1

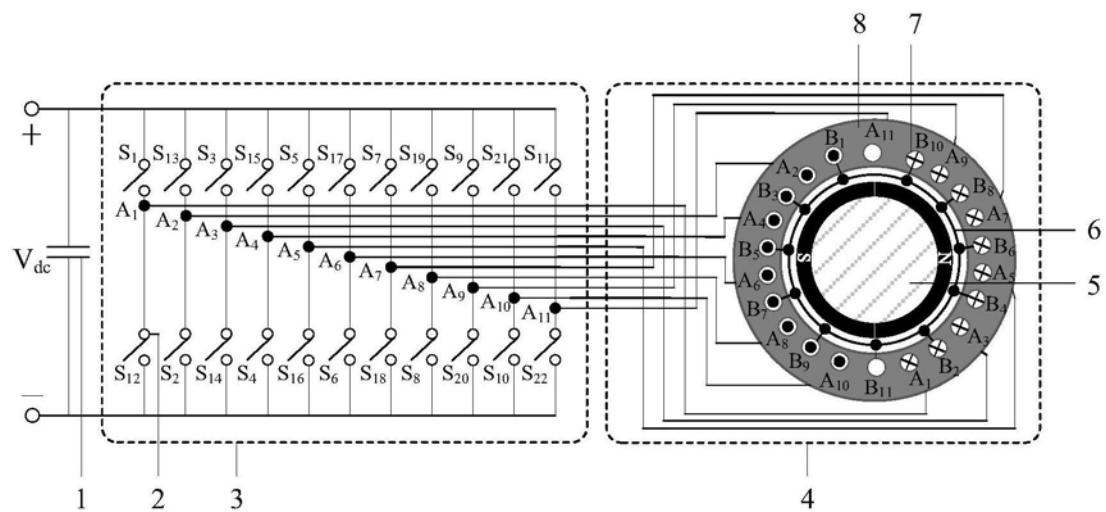


图2

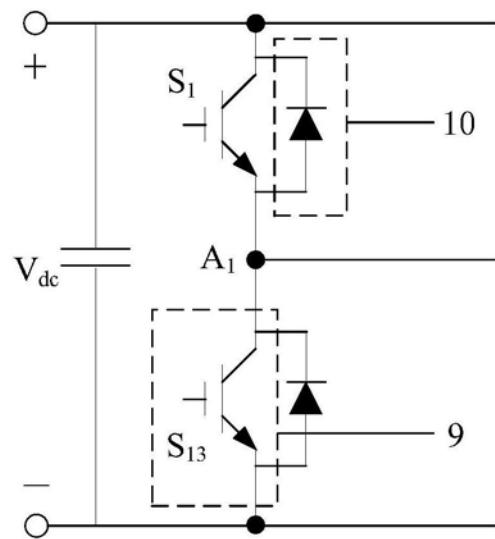


图3

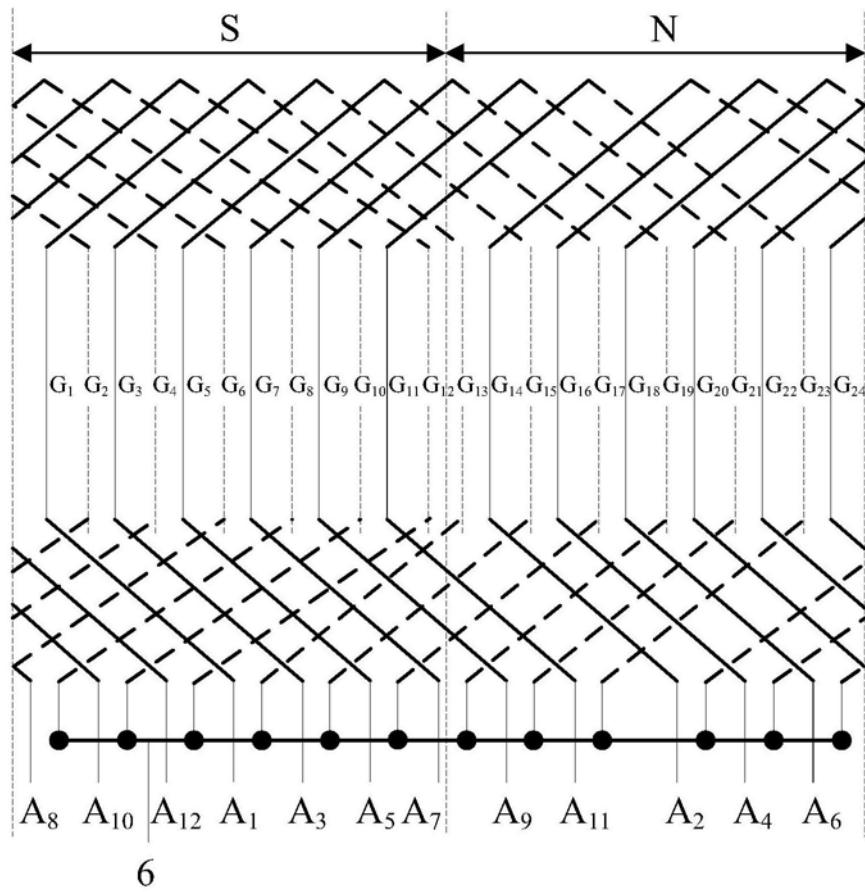


图4

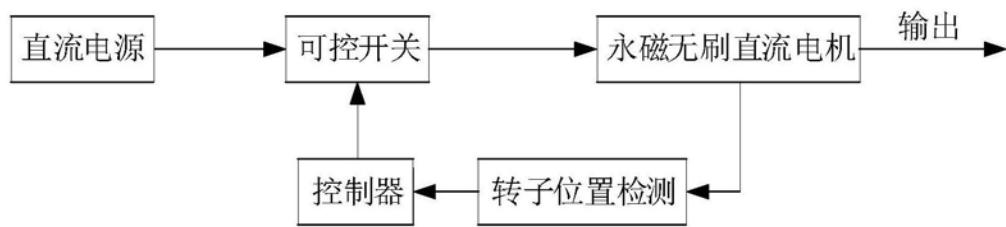


图5

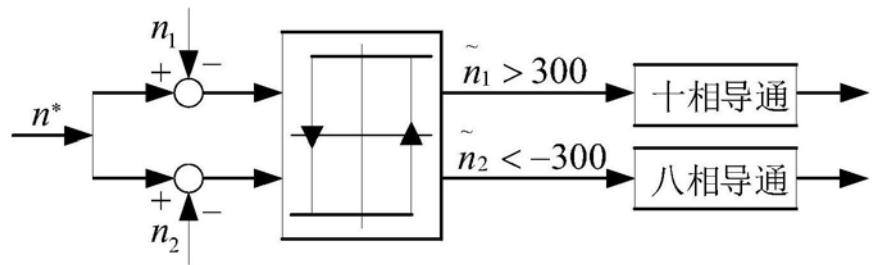


图6