

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101505135 B

(45) 授权公告日 2010. 08. 11

(21) 申请号 200910068077. 1

(22) 申请日 2009. 03. 09

(73) 专利权人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路 92 号

(72) 发明人 陈益广 沈勇环 王晓远

(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 王丽英

(51) Int. Cl.

H02P 27/06 (2006. 01)

H02P 21/06 (2006. 01)

H02P 25/02 (2006. 01)

审查员 张剑云

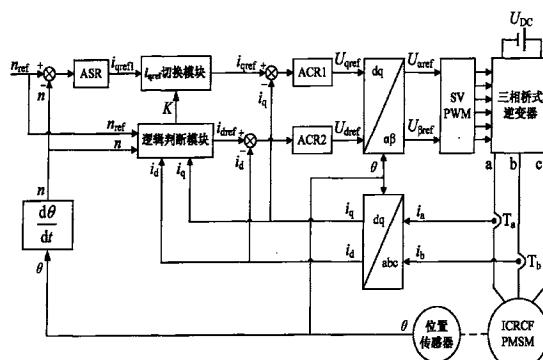
权利要求书 1 页 说明书 8 页 附图 3 页

(54) 发明名称

一种内置混合式转子可控磁通永磁同步电机
驱动装置

(57) 摘要

本发明公开了一种内置混合式转子可控磁通永磁同步电机驱动装置，它包括控制器和内置混合式转子可控磁通永磁同步电机，它还包括与所述的电机输出轴相连的用于输出所述的电机转子永磁磁场空间绝对位置信号的位置传感器，所述的位置传感器通过多芯电缆与所述的控制器连接，本发明驱动装置专门用于控制内置混合式转子结构可控磁通永磁同步电机，实现了内置混合式转子可控磁通永磁同步电机宽范围高性能调速，并且定子铜耗小、使用安全。



1. 一种内置混合式转子可控磁通永磁同步电机驱动装置,它包括控制器和内置混合式转子可控磁通永磁同步电机,其特征在于,它还包括与所述的电机的输出轴相连的用于输出电机转子永磁磁场空间绝对位置的位置传感器,所述的位置传感器通过多芯电缆与所述的控制器连接,所述的控制器包括:

一个三相桥式逆变器,所述的三相桥式逆变器电源输入端与直流电源相连并且其三相输出端用三根绝缘导线与所述的永磁同步电机的三相输入端相连,所述的逆变器的六只功率开关器件分别接收来自一个空间电压矢量脉宽调制模块的经过隔离放大后的空间电压矢量脉宽调制脉冲信号,在所述的逆变器的内部两相输出上分别连接有一个电流传感器,所述的每一电流传感器分别输出对应相线电流的信号;

一个电机转子永磁磁场空间绝对位置求导模块,用于接收所述的位置传感器输出的电机转子永磁磁场空间绝对位置,并对电机转子永磁磁场空间绝对位置求导数后输出电机实际转速信号;

一个转子同步旋转坐标变换模块,用于接收转子空间绝对位置信号、所述的电流传感器输出的两相线电流信号,并将所述的两相线电流信号通过转子同步旋转坐标变换转换为转子同步旋转坐标系的直轴电流和交轴电流信号;

一个具有比例积分调节特性的转速调节器,用于接收外部输入的电机给定转速与电机实际转速比较后的偏差信号并输出对偏差信号进行调节所得到的交轴电流预给定信号;

一个交轴电流给定切换模块,用于接收所述的交轴电流预给定信号并接收来自逻辑判断模块的切换使能信号以使其输出的交轴电流给定信号等于所述的交轴电流预给定信号或为零;

一个逻辑判断模块,所述的逻辑判断模块用于接收所述的直、交轴电流信号、外部输入的电机转速给定信号、电机实际转速信号,并对输入信号进行判断,然后向所述的交轴电流给定切换模块输出切换使能信号并向直轴电流调节器输出直轴电流给定信号;

一个具有比例积分调节特性交轴电流调节器,用于接收所述的交轴电流给定信号与交轴电流信号比较后的偏差信号并输出对偏差信号进行调节所得到的交轴电压给定信号;

一个具有比例积分调节特性直轴电流调节器,用于接收所述的直轴电流给定信号与直轴电流信号比较后的偏差信号并输出对偏差信号进行调节所得到的直轴电压给定信号;

一个转子同步旋转坐标反变换模块,用于接收所述的电机转子永磁磁场空间绝对位置信号和直、交轴电压给定信号,并将所述的直、交轴电压给定信号通过转子同步旋转坐标反变换转换为定子两相静止坐标系的两相交流电压给定信号;

一个空间电压矢量脉宽调制模块,用于接收所述的定子两相静止坐标系的两相交流电压给定信号并通过空间电压矢量脉宽调制脉冲生成方法生成空间电压矢量脉宽调制脉冲信号,并将所述的空间电压矢量脉宽调制脉冲信号经过隔离放大后输出给所述的逆变器的六只功率开关器件。

一种内置混合式转子可控磁通永磁同步电机驱动装置

技术领域

[0001] 本发明涉及电气传动技术领域，尤其涉及一种内置混合式转子可控磁通永磁同步电机驱动装置，实现内置混合式转子可控磁通永磁同步电机低能耗、宽范围、高性能调速。

背景技术

[0002] 传统永磁同步电机在较宽的范围内调速时，大多采用矢量控制策略。在弱磁调速区，通过控制直轴电流电枢反应产生的去磁磁动势来达到削弱气隙合成磁场的目的。但是，由于直轴上存在磁导率接近空气的永磁体，直轴磁路有较大的磁阻，造成直轴电感较小，限制了弱磁升速能力。在定子总电流受限情况下，交轴电流会随着直轴电流的增加而应该减小，使得电磁转矩减小很多。弱磁调速时，由于一直施加直轴电流，定子电流较大，产生的定子铜耗也较大；特别是一旦弱磁失败，高速旋转的永磁磁场将在定子绕组内感应出非常高的电动势，有可能造成逆变器功率开关器件以及为系统各个控制部分提供工作电源的开关电源损坏。

发明内容

[0003] 本发明的目的在于克服已有技术的不足，提供一种能够实现永磁同步电机宽范围高性能调速、定子铜耗小的一种内置混合式转子可控磁通永磁同步电机驱动装置。

[0004] 本发明的一种内置混合式转子可控磁通永磁同步电机驱动装置，它包括控制器和内置混合式转子可控磁通永磁同步电机，它还包括与所述的电机输出轴相连的用于输出所述的电机转子永磁磁场空间绝对位置信号的位置传感器，所述的位置传感器通过多芯电缆与所述的控制器连接，所述的控制器包括：

[0005] 一个三相桥式逆变器，所述的三相桥式逆变器电源输入端与直流电源相连并且其三相输出端用三根绝缘导线与所述的永磁同步电机的三相输入端相连，所述的逆变器的六只功率开关器件分别接收来自一个空间电压矢量脉宽调制模块的经过隔离放大后的空间电压矢量脉宽调制脉冲信号，在所述的逆变器的内部两相输出上分别连接有一个电流传感器，所述的每一电流传感器分别输出对应相线电流的信号；

[0006] 一个电机转子永磁磁场空间绝对位置求导模块，用于接收所述的位置传感器输出的电机转子永磁磁场空间绝对位置，并对电机转子永磁磁场空间绝对位置求导数后输出电机实际转速信号；

[0007] 一个转子同步旋转坐标变换模块，用于接收所述的转子空间绝对位置信号、所述的电流传感器输出的两相线电流信号，并将所述的两相线电流信号通过转子同步旋转坐标变换转换为转子同步旋转坐标系的直轴电流和交轴电流信号；

[0008] 一个具有比例积分调节特性的转速调节器，用于接收外部输入的电机给定转速与电机实际转速比较后的偏差信号并输出对偏差信号进行调节所得到的交轴电流预给定信号；

[0009] 一个交轴电流给定切换模块，用于接收所述的交轴电流预给定信号并接收来自逻

辑判断模块的切换使能信号以使其输出的交轴电流给定信号等于所述的交轴电流预给定信号或为零；

[0010] 一个逻辑判断模块，所述的逻辑判断模块用于接收所述的直、交轴电流信号、外部输入的电机转速给定信号、电机实际转速信号，并对所述的输入信号进行判断，然后向所述的交轴电流给定切换模块输出切换使能信号并向直轴电流调节器输出直轴电流给定信号；

[0011] 一个具有比例积分调节特性交轴电流调节器，用于接收所述的交轴电流给定信号与交轴电流信号比较后的偏差信号并输出对偏差信号进行调节所得到的交轴电压给定信号；

[0012] 一个具有比例积分调节特性直轴电流调节器，用于接收所述的直轴电流给定信号与直轴电流信号比较后的偏差信号并输出对偏差信号进行调节所得到的直轴电压给定信号；

[0013] 一个转子同步旋转坐标反变换模块，用于接收所述的电机转子永磁磁场空间绝对位置信号和直、交轴电压给定信号，并将所述的直、交轴电压给定信号通过转子同步旋转坐标反变换转换为定子两相静止坐标系的两相交流电压给定信号；

[0014] 一个空间电压矢量脉宽调制模块，用于接收所述的定子两相静止坐标系的两相交流电压给定信号并通过空间电压矢量脉宽调制脉冲生成方法生成空间电压矢量脉宽调制脉冲信号，并将所述的空间电压矢量脉宽调制脉冲信号经过隔离放大后输出给所述的逆变器的六只功率开关器件。

[0015] 本发明驱动装置专门用于控制内置混合式转子结构可控磁通永磁同步电机，该电机充分利用钕铁硼永磁体剩磁密度和矫顽力都很高，而铝镍钴永磁体剩磁密度很高而矫顽力很低的特点，在转子内同时放置两种永磁体，科学分配两者的尺寸，使两者在磁性能上合理配合。驱动装置驱动电机正常运行时，由与电机同轴机械连接的位置传感器实时检测出转子永磁磁场空间绝对位置，控制系统采用以转子永磁磁场进行磁场定向的直轴电流 $i_d = 0$ 矢量控制策略，通过闭环工作的控制器控制三相桥式逆变器的三相输出给电机定子三相绕组的交流电的等效合成空间矢量仅为交轴电流矢量，而仅产生交轴电枢反应磁动势，电机输出一定的电磁转矩拖动机械负载工作；需要增磁或弱磁调速时，控制器控制三相桥式逆变器的三相输出通过三相定子绕组在电机转子直轴方向上短时间内施加一幅值和方向都可以控制的直轴电流 i_d 脉冲，在此脉冲所产生的直轴电枢磁动势作用后，铝镍钴的磁化强弱及磁化方向就会改变或调整，同时，铝镍钴在磁滞回线上的工作点以及钕铁硼在退磁曲线上的工作点都会发生变化。当铝镍钴与钕铁硼磁化方向一致时，虽然铝镍钴矫顽力太低而对气隙主磁通贡献不大，但是它会起到将钕铁硼产生的磁通推向定子，而使气隙永磁磁通有所增强的作用；铝镍钴正向强磁化后，电机气隙永磁磁场最强，保障电机低速运行能够输出较大的电磁转矩。当铝镍钴与钕铁硼的磁化方向相反时，施加的反向 i_d 脉冲幅值不同，能够达到的反向最大的磁化强度也不同， i_d 脉冲消失后，铝镍钴被反向磁化的强度随之不同，铝镍钴将钕铁硼产生的磁通在转子内旁路的数量也随之不同，从而起到将气隙永磁磁场小部分或者大部分减弱的独特作用；铝镍钴反向强磁化后，电机气隙永磁磁场最弱，电机能够运行于很高的转速。每次重新磁化后气隙永磁磁场的大小都能得到控制，而且能够保持住，它克服了传统永磁同步电机调速范围窄、定子铜耗大以及一旦弱磁失败高速旋

转的永磁磁场在定子绕组中感应出很高的电动势危及逆变器功率器件安全等缺点。实现了内置混合式转子可控磁通永磁同步电机宽范围高性能调速，并且定子铜耗小、使用安全。

附图说明

- [0016] 图 1 是本发明的一种内置混合式转子可控磁通永磁同步电机驱动装置的系统构成图；
- [0017] 图 2 是图 1 所示的控制器控制原理框图；
- [0018] 图 3 是本发明采用的三相桥式逆变器主电路图；
- [0019] 图 4 是本发明采用的内置混合式转子可控磁通永磁同步电机的典型剖面图；
- [0020] 图 5 是控制器控制电机转子内钕铁硼和铝镍钴永磁体磁化的过程曲线。

具体实施方式

- [0021] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细描述。
- [0022] 如图 1 所示，本发明驱动装置是由控制器 1、内置混合式转子结构可控磁通永磁同步电机 2（可以采用 ZL200410093696.3 和 200510013524.5 发明专利中公开的电机）和位置传感器 3 组成，并由直流电源 4 供电。所述的直流电源可以是电池组，也可以由三相或单相交流电整流滤波后获得，以及通过其它各种方式获得的直流电。所述的位置传感器与电机同轴机械连接，通过多芯电缆与控制器连接，所述的控制器为位置传感器提供电源并接收位置传感器传回来的电机转子永磁磁场空间绝对位置信号。
- [0023] 如图 3 所示的本发明的控制器 1 包括：如图 2 所示的一个三相桥式逆变器，所述的三相桥式逆变器电源输入端与直流电源相连并且其三相输出端用三根绝缘导线与所述的内置混合式转子可控磁通永磁同步电机（在图 3 中用英文简写 ICRCFPMMSM 标明）的三相输入端相连，所述的逆变器的六只功率开关器件分别接收来自一个空间电压矢量脉宽调制模块的经过隔离放大后的空间电压矢量脉宽调制脉冲信号，在所述的逆变器的内部两相输出分别连接有一个电流传感器（如图 3 中的 T_a 和 T_b 所示），所述的每一电流传感器分别输出对应相线电流的信号；一个转子同步旋转坐标变换模块，用于接收所述的转子永磁磁场空间绝对位置信号、所述的电流传感器输出的两相线电流信号，并将所述的两相线电流信号通过转子同步旋转坐标变换转换为直轴电流和交轴电流信号；一个具有比例积分调节特性的转速调节器，用于接收电机额定转速与电机实际转速比较后的偏差信号并输出对偏差信号进行调节所得到的交轴电流预给定信号；一个交轴电流给定切换模块，用于接收所述的交轴电流预给定信号并接收来自逻辑判断模块的切换使能信号以使其输出的交轴电流给定信号等于所述的交轴电流预给定信号或为零；一个逻辑判断模块，所述的逻辑判断模块用于接收所述的直、交轴电流信号、外部输入的电机给定转速信号、所述的电机实际转速信号，然后将所述的转速额定信号与所述的电机转速给定信号相比较以输出切换使能信号给所述的交轴电流给定切换模块，并将所述的直轴电流和交轴电流信号与设定的电流值比较以查表确定并输出直轴电流给定信号，所述的逻辑判断模块执行如下步骤：(a) 将所述的转速额定信号与所述的电机转速给定信号相比较以决策在进行电机转子永磁磁场强弱调整控制的时刻；(b) 当所述的电机转速给定信号大于所述的转速额定信号进行电机永磁磁场强弱的调整控制时，所述的逻辑判断模块输出切换使能信号给所述的交轴电流给定切换

模块，使所述的交轴电流给定切换模块输出的交轴电流给定信号为零，然后所述的逻辑判断模块将交轴电流信号绝对值与设定的最小电流值比较，当交轴电流信号绝对值小于设定的最小电流值时，所述的逻辑判断模块输出经查表获得的决定本次电机转子永磁磁场强弱调整控制所需要的直轴电流给定信号，经过 10ms 后，认为本次电机转子永磁磁场强弱调整已完成；(c) 将直轴电流给定信号切换为零，随后将直轴电流信号绝对值与设定的最小电流值比较，当直轴电流信号绝对值小于设定的最小电流值时，结束本次电机转子永磁磁场强弱调整控制，输出经所述的切换使能信号复位，使所述的交轴电流给定切换模块输出的交轴电流给定信号重新等于所述的交轴电流预给定信号。一个具有比例积分调节特性的交轴电流调节器，用于接收所述的交轴电流信号与交轴电流给定信号比较后的偏差信号并输出对偏差信号进行调节所得到的交轴电压给定信号；一个具有比例积分调节特性的直轴电流调节器，用于接收所述的直轴电流信号与直轴电流给定信号比较后的偏差信号并输出对偏差信号进行调节所得到的直轴电压给定信号；一个转子同步旋转坐标反变换模块，用于接收所述的转子永磁磁场空间绝对位置信号，直、交轴电压给定信号，并将所述的直、交轴电压给定信号通过转子同步旋转坐标反变换转换为定子两相静止坐标系的交流电压给定信号；一个空间电压矢量脉宽调制模块，用于接收所述的两相交流电压给定信号并通过空间电压矢量脉宽调制脉冲生成方法生成空间电压矢量脉宽调制脉冲信号，并将所述的空间电压矢量脉宽调制脉冲信号经过隔离放大后输出给所述的逆变器的六只功率开关器件。

[0024] 同传统永磁同步电机驱动装置一样，该驱动装置也是采用以转子永磁磁场进行磁场定向的矢量控制策略进行工作；同传统永磁同步电机驱动装置不同之处在于本发明的驱动的是内置混合式转子可控磁通永磁同步电机，以及在控制器的控制程序里增设了逻辑判断模块和交轴电流 i_q 切换模块。增设这两个模块的目的是，在电机运行中，逻辑判断模块能够在适当的时刻施加直轴增磁或去磁电流脉冲，为避免在施加直轴增磁或去磁的电流脉冲的过程中产生比较大的电磁转矩冲击，在起到增磁或去磁作用的直轴电流脉冲施加前后将交轴电流给定值进行必要的切换。

[0025] 本发明驱动装置的具体控制原理如下：

[0026] 系统供电开始，与电机同轴机械连接的位置传感器实时检测出内置混合式转子结构可控磁通永磁同步电机转子永磁磁场空间绝对位置 θ 信号，转子永磁磁场空间绝对位置 θ 信号对时间求导数就得到电机转速 n 信号，即 $n = d\theta / dt$ 。由检测电机 a 和 b 两相线电流的电流传感器 T_a 和 T_b 实时得到电机 a 和 b 两相线电流 i_a 和 i_b 信号。由已知的电机转子永磁磁场空间绝对位置信号 θ 信号以及线电流 i_a 和 i_b 信号，经过转子同步旋转坐标变换，将静止定子 abc 三相坐标系的 i_a 和 i_b 交变电流变换为 dq 转子同步旋转坐标系的直轴电流和交轴电流 i_d 和 i_q 信号。这样电机转速、电流双闭环控制以及同步旋转坐标正变换和反变换所必须的转速 n 、直轴电流 i_d 、交轴电流 i_q 和转子永磁磁场空间绝对位置 θ 等信号就全部得到了。

[0027] 外部输入的电机转速给定 n_{ref} 信号与负反馈的电机实际转速 n 信号进行比较，比较后的偏差送入具有比例积分调节特性的转速调节器 ASR，转速调节器 ASR 输出交轴电流预给定 i_{qref1} 信号，实现速度为外环的转速闭环控制。

[0028] 电机转速给定 n_{ref} 、实际转速 n 、直轴电流 i_d 和交轴电流 i_q 四个信号都输入到逻辑判断模块，逻辑判断模块根据这四个输入信号以及电机历史工作情况来决定施加直轴增磁

或去磁的电流脉冲的时刻以及直轴电流给定 i_{dref} 信号的幅值和极性,即决定何时施加幅值和方向可控的起增磁或去磁作用的电流直轴脉冲给定 i_{dref} 信号,同时为交轴电流给定 i_{qref} 切换模块发出切换使能信号 K。交轴电流给定 i_{qref} 切换模块受逻辑判断模块发出的切换使能信号 K 控制。正常工作时切换使能信号 K = 0, 交轴电流给定 i_{qref} 切换为转速调节器 ASR 输出的交轴电流预给定 i_{qref1} 信号,即令 $i_{qref} = i_{qref1}$; 电机进行增磁或去磁控制时,切换使能信号 K = 1, 交轴电流给定 i_{qref} 信号切换为 0, 即令 $i_{qref} = 0$, 电机交轴电流 i_q 迅速减小, 等待到交轴电流 i_q 绝对值小于预置的最小电流 I_{min} 后, 逻辑判断模块输出经查表获得的电机进行增磁或去磁控制所需要直轴电流给定 i_{dref} , 所述表中电机进行增磁或去磁控制所需要直轴电流给定 i_{dref} 对于不同的电机是不同的, 可以根据具体电机实现根据实验数据获得, 并预置到所述的控制器中; 经过 10ms 后, 认为增磁或去磁控制目的已经完成, 逻辑判断模块将直轴电流给定 i_{dref} 切换到 0, 即令 $i_{dref} = 0$, 电机直轴电流 i_d 迅速减小; 等待到直轴电流 i_d 绝对值小于预置的最小电流 I_{min} 后, 逻辑判断模块给交轴电流给定 i_{qref} 切换模块发出切换使能信号 K = 0, 将交轴电流给定 i_{qref} 信号重新切换到转速调节器 ASR 输出的交轴电流预给定 i_{qref1} 信号, 即令 $i_{qref} = i_{qref1}$; 又重新恢复到控制器以转子永磁磁场进行磁场定向的直轴电流 $i_d = 0$ 矢量控制策略运行方式。

[0029] 交、直轴电流给定 i_{qref} 、 i_{dref} 信号分别与负反馈实际的交、直轴电流 i_q 、 i_d 信号比较, 实现电流为内环的电流闭环控制, 达到电机实际电流能够快速跟踪给定电流, 完成调整电机电磁转矩或调整电机转子气隙永磁磁场的目的。电流比较后的偏差分别送入具有比例积分调节特性的交、直轴电流调节器 ACR1、ACR2, 分别得到交、直轴电压给定 U_{qref} 、 U_{dref} 信号。由已知的电机空间绝对位置 θ 信号和交、直轴电压给定 U_{qref} 、 U_{dref} 信号, 经过转子同步旋转坐标反变换, 将 dq 转子同步旋转坐标系的交、直轴电压给定 U_{qref} 、 U_{dref} 信号反旋转变换成定子静止 α β 两相坐标系交变的电压给定 $U_{\alpha ref}$ 、 $U_{\beta ref}$ 信号。

[0030] 由定子静止 α β 两相坐标系交变的电压给定 $U_{\alpha ref}$ 、 $U_{\beta ref}$ 信号经过典型的空间电压矢量脉宽调制 SVPWM 脉冲生成技术, 生成控制三相桥式逆变器六只功率开关器件的空间电压矢量 SVPWM 控制脉冲, 使得电机实际电流能够快速跟踪给定电流, 完成调整电机电磁转矩或调整电机转子气隙永磁磁场的目的。

[0031] 下面针对图 4 所示结构的内置混合式转子结构可控磁通永磁同步电机, 通过控制一个内置混合式可控磁通永磁同步电机永磁气隙磁场由较强 → 较弱 → 更弱 → 较弱 → 很强的改变过程, 阐述内置混合式转子可控磁通永磁同步电机驱动装置控制电机转子内钕铁硼和铝镍钴永磁体的磁化过程, 实现转子气隙永磁磁场可控, 实现宽调速的过程。其中钕铁硼和铝镍钴永磁体的磁化过程如图 5 所示。

[0032] 图 4 所示 4 极内置混合式转子结构可控磁通永磁同步电机, 定子铁心 8 采用 4 极三相感应电动机定子铁心, 它由硅钢片冲剪叠压而成, 其上布置三相对称绕组。转子铁心 9 也由硅钢片冲剪叠压而成, 转子冲片上冲有用于嵌入永磁体 5、6 的 4 个 W 形槽, 每个 W 形槽中都分别插入铝镍钴和钕铁硼永磁体。图 4 中 10 为轴、7、11 为隔磁桥。各块钕铁硼永磁体 5 的磁化方向如图中单箭头所示, 根据它们磁化方向近似认为钕铁硼处于径向磁路位置, 由于钕铁硼剩磁密度和矫顽力很高, 又有足够的磁化方向厚度, 工作中钕铁硼永磁体磁化方向始终不变。处于切向磁路位置的铝镍钴磁化方向如图中双箭头所示, 它们可以由正反向直轴电流 i_d 脉冲产生的直轴电枢磁动势正反向磁化。由于铝镍钴剩磁密度较高但矫顽力

很低,磁化方向厚度也有限,它们被正向强磁化后对永磁气隙磁场贡献也不大;但是,铝镍钴被反向磁化后,会将钕铁硼产生的一部分磁通在转子内部旁路,起到弱磁的作用。铝镍钴旁路钕铁硼产生的永磁磁通的多与寡,取决于铝镍钴被反向磁化的强与弱。

[0033] 系统上电开始准备工作时,真正转速给定信号尚未读入,电机转速给定 n_{ref} 、转速 n、直轴电流 i_d 和交轴电流 i_q 这四个逻辑判断模块的输入信号均为 0,于是逻辑判断模块对转子气隙永磁磁场进行最强磁化控制,电机通入最大允许的正向直轴电流脉冲,产生的较强的直轴电枢磁动势对永磁转子进行较强的磁化,实际上是对转子中的铝镍钴进行较强的磁化。此时,钕铁硼和铝镍钴都沿各自的磁滞回线进入到第 I 象限,两者的磁化方向相同。起正向强磁化作用的定子直轴电枢磁动势消失后,钕铁硼和铝镍钴又都沿各自的磁滞回线由第 I 象限进入到第 II 象限,工作点分别对应于 A、a 点,两者的磁化方向相同,两种永磁体内部的磁密分别为 B_A 和 B_a ,为外部磁路提供的磁动势为 F_a ,为外磁路贡献出来较强的永磁磁通为

$$[0034] \Phi_{mA} = \Phi_{mNA} + \Phi_{mAa} = B_A A_{mN} + B_a A_{mA}$$

[0035] 式中 Φ_{mA} ——两种永磁体工作于 A、a 点时为外磁路贡献的永磁磁通,单位 Wb;

[0036] Φ_{mNA} ——钕铁硼永磁体工作于 A 点时提供的磁通,单位 Wb;

[0037] Φ_{mAa} ——铝镍钴永磁体工作于 a 点时提供的磁通,单位 Wb;

[0038] B_A ——工作于 A 点时钕铁硼永磁体内部的磁密,单位 Wb;

[0039] B_a ——工作于 a 点时铝镍钴永磁体内部的磁密,单位 Wb;

[0040] A_{mN} ——钕铁硼永磁体提供每极磁通的截面积,单位 m^2 ;

[0041] A_{mA} ——钕铁硼永磁体提供每极磁通的截面积,单位 m^2 。

[0042] 显然,两种永磁体工作于 A、a 点时,两种永磁体为外磁路贡献出来的永磁磁通比较多,电机的气隙永磁磁场也就比较强。为电机在低速时具有很好的恒转矩特性做好准备。

[0043] 当有电机转速给定 n_{ref} 时,电机按照 $i_d = 0$ 矢量控制策略控制电机升速,电枢电流仅为交轴电流。若 n_{ref} 小于等于电机的额定转速 n_N ,即 $n_{ref} \leq n_N$,则电机一直升速到与 n_{ref} 对应的某一转速下平稳运行。若 n_{ref} 大于电机的额定转速 n_N ,即 $n_{ref} > n_N$,则电机一直升速到电机的额定转速 n_N ,即 $n_{ref} = n_N$ 时,逻辑判断模块做出削弱转子气隙永磁磁场的控制决定,对电机施加特定幅值的反向 i_d 脉冲,产生的作用到永磁体两侧最大幅值为 F_b 的去磁磁动势。在去磁磁动势增加的过程中,钕铁硼和铝镍钴的工作点沿着各自的磁滞曲线分别由 A、a 点过渡到 B、b 点。这时,钕铁硼的工作点 B 仍在第 II 象限,而铝镍钴的工作点 b 则进入到第 III 象限,说明铝镍钴已被反向磁化。当去磁磁动势 F_b 消失之后,工作点又沿着各自的磁滞回线回复到 C、c 点,两种永磁体对外部提供的磁动势为 F_c 。此时,钕铁硼工作于 C 点,仍在第 II 象限,内部磁密 B_c 为正。铝镍钴工作于 c 点,在第 III 象限,铝镍钴与钕铁硼磁化方向相反,内部磁密 B_c 为负。此时,铝镍钴将钕铁硼产生的一部分永磁磁通在转子内部旁路,则两种永磁体为外磁路贡献出来的永磁磁通为

$$[0044] \Phi_{mc} = \Phi_{mNC} + \Phi_{mAe} = B_c A_{mN} + B_e A_{mA} = B_c A_{mN} - |B_e| A_{mA}$$

[0045] 式中 Φ_{mc} ——两种永磁体工作于 C、c 点时为外磁路贡献的永磁磁通,单位 Wb。

[0046] 两种永磁体工作于 C、c 点时与工作于 A、a 点时相比,为外磁路贡献出来的永磁磁通明显减少,电机的气隙永磁磁场减弱,电机可以运行于较高的转速。

[0047] 当希望电机运行转速更高时,再施加更大幅值的反向 i_d 脉冲,产生作用到永磁体

两侧最大幅值为 F_d 的去磁磁动势。在去磁磁动势增加的过程中, 钕铁硼和铝镍钴工作点沿着各自的磁滞曲线分别由 C、c 点过渡到 D、d 点。D、d 还分别在第 II、III 象限, 但是铝镍钴已被反向更强的磁化。当去磁磁动势 F_d 消失之后, 工作点又沿着各自的磁滞回线由 D、d 过渡到 E、e 点, E、e 点也仍分别还在第 II、III 象限, 两种永磁体对外部磁路提供的磁动势为 F_e 。此时, 钕铁硼工作于 E 点, 在第 II 象限, 其内部磁密 B_E 为正, B_E 比 B_c 略有增加。铝镍钴的工作于 e 点, 在第 III 象限, 其内部磁密 B_e 为负, B_e 的绝对值比 B_c 的绝对值增大许多。铝镍钴将钕铁硼产生的更大的一部分永磁磁通在转子内部旁路, 两种永磁体为外磁路贡献出来的永磁磁通为

$$[0048] \quad \Phi_{meE} = \Phi_{mN} + \Phi_{mA} = B_E A_{mN} + B_e A_{mA} = B_E A_{mN} - |B_e| A_{mA}$$

[0049] 式中 Φ_{meE} ——两种永磁体工作于 E、e 点时为外磁路贡献的永磁磁通, 单位 Wb。

[0050] 可见, 两种永磁体工作于 E、e 点时与工作于 C、c 点时相比, 为外磁路贡献出来的永磁磁通更小, 气隙永磁磁场更弱, 电机可以运行于更高的转速。

[0051] 当希望电机转速降低些但还高于额定转速时, 则希望电机气隙永磁磁场较强一些, 以提高电机力能特性。施加幅值较小的正向 i_d 脉冲, 产生作用到永磁体两侧最大幅值为 F_F 的较弱的助磁磁动势。在此较弱的助磁磁动势增加的过程中, 钕铁硼沿其磁滞曲线由第 II 象限的 E 点进入第 I 象限过渡到 F 点; 铝镍钴沿其磁滞曲线由第 III 象限的 e 点进入第 IV 象限过渡到 f 点。当较弱的助磁磁动势 F_F 消失后, 钕铁硼沿其退磁曲线由第 I 象限的 F 点进入第 II 象限过渡到 G 点; 铝镍钴沿其磁滞曲线由第 IV 象限的 f 点再次退回到第 III 象限过渡到 g 点。此时, 钕铁硼内部磁密 B_g 为正, B_g 比 B_E 略有减小。铝镍钴内部磁密 B_g 为负, B_g 的绝对值比 B_e 的绝对值小了许多。只不过铝镍钴将钕铁硼产生的在转子内部旁路的那一部分永磁磁通减少, 则两种永磁体为外磁路贡献出来的永磁磁通有些增强, 此时为外磁路贡献出来的永磁磁通为

$$[0052] \quad \Phi_{mgG} = \Phi_{mN} + \Phi_{mA} = B_g A_{mN} + B_g A_{mA} = B_g A_{mN} - |B_g| A_{mA}$$

[0053] 式中 Φ_{mgG} ——两种永磁体工作于 G、g 点时为外磁路贡献的永磁磁通, 单位 Wb。

[0054] 当再希望电机转速低于额定转速运行时, 则希望电机气隙永磁磁场很强, 以提高电机恒转矩工作能力。施加很强的正向 i_d 脉冲, 产生作用到永磁体两侧最大幅值为 F_h 的很强的助磁磁动势, 在此很强的助磁磁动势增加的过程中, 钕铁硼和铝镍钴各自的磁滞曲线分别由 G、g 点过渡到 H、h 点。钕铁硼沿其磁化曲线由第 II 象限进入第 I 象限; 铝镍钴沿其磁滞曲线由第 III 象限穿过第 IV 象限进入第 I 象限。当很强的助磁磁动势 F_h 消失后, 钕铁硼和铝镍钴的工作点从 H、h 点过渡到 I、i 点, 又都从第 I 象限进入到第 II 象限。两种永磁体内部的磁密分别为 B_i 和 B_i , 两者为外部磁路提供的磁动势为 F_i , 两者一起为外磁路贡献出来的永磁磁通为

$$[0055] \quad \Phi_{miI} = \Phi_{mN} + \Phi_{mA} = B_i A_{mN} + B_i A_{mA}$$

[0056] 式中 Φ_{miI} ——两种永磁体工作于 I、i 点时为外磁路贡献的永磁磁通, 单位 Wb。

[0057] 显然, 钕铁硼和铝镍钴工作于 I、i 点时, 它们为外磁路贡献出来的永磁磁通最多, 电机的气隙永磁磁场也就最强。因为铝镍钴不能被饱和磁化, 如果重新磁化前的工作点不同, 在有限的最强的定子直轴磁动势助磁磁化后, 最后工作点与以前强磁化后的工作点一般不会重合, 但非常接近, 即通常 I、i 与 A、a 点是不重合的, 却是非常接近的。电机转速低于额定转速时, 总是希望永磁体的工作于 I、i 或 A、a 点那样的工作点上, 气隙永磁磁场较

强, 电机有较高的恒转矩工作能力。

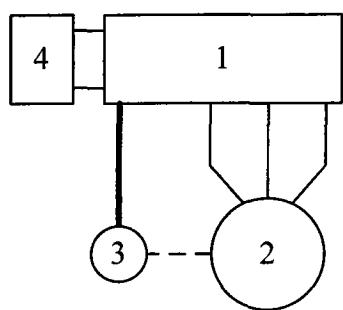


图 1

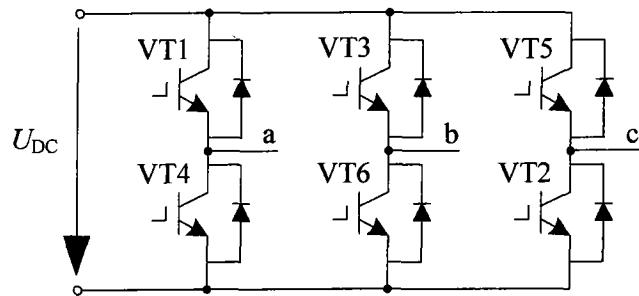


图 2

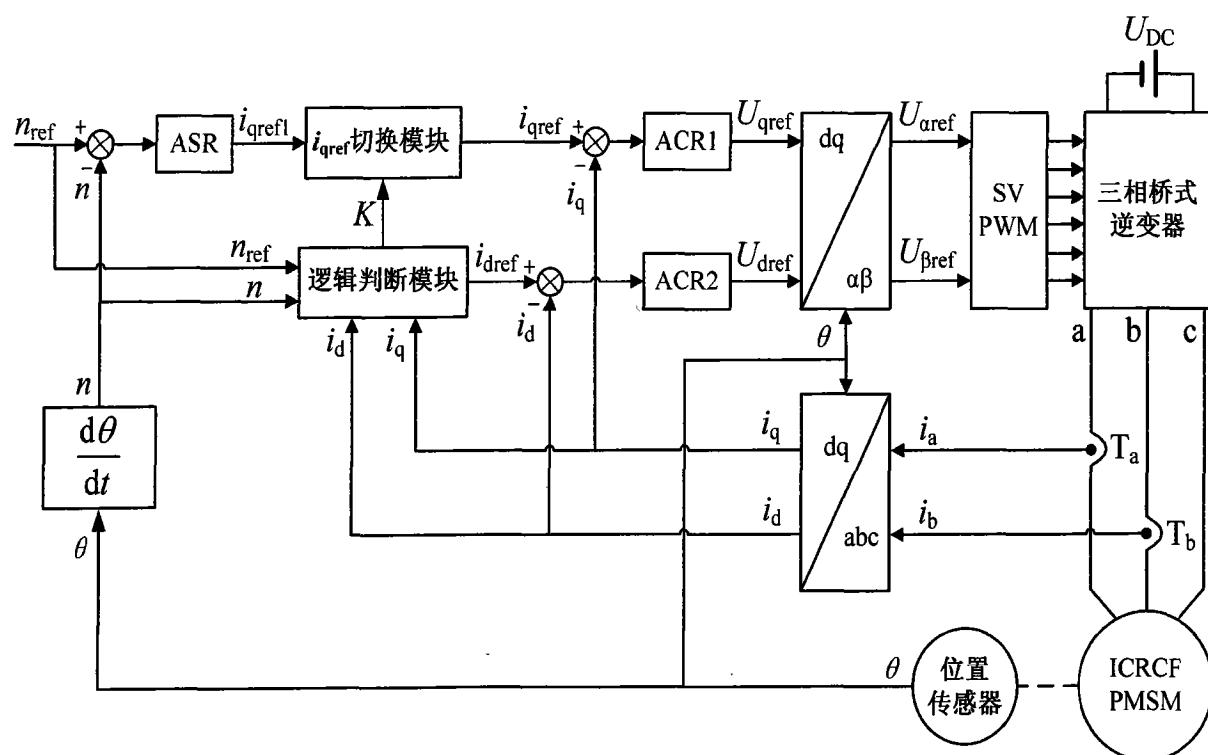


图 3

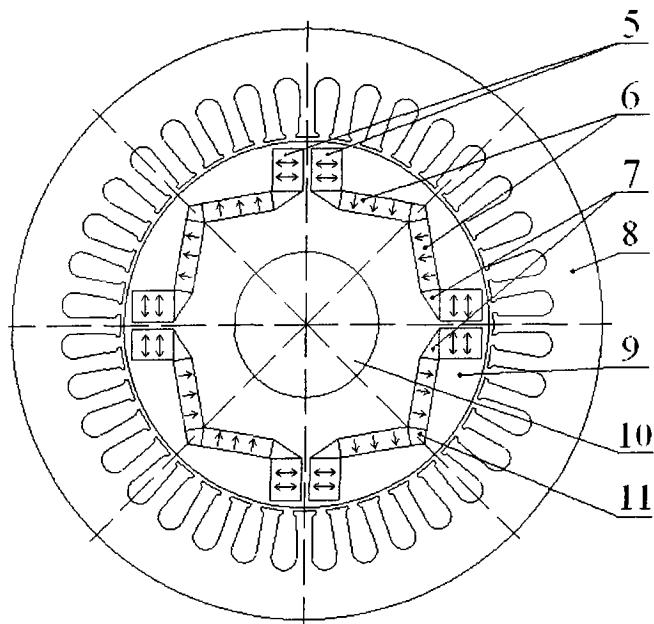


图 4

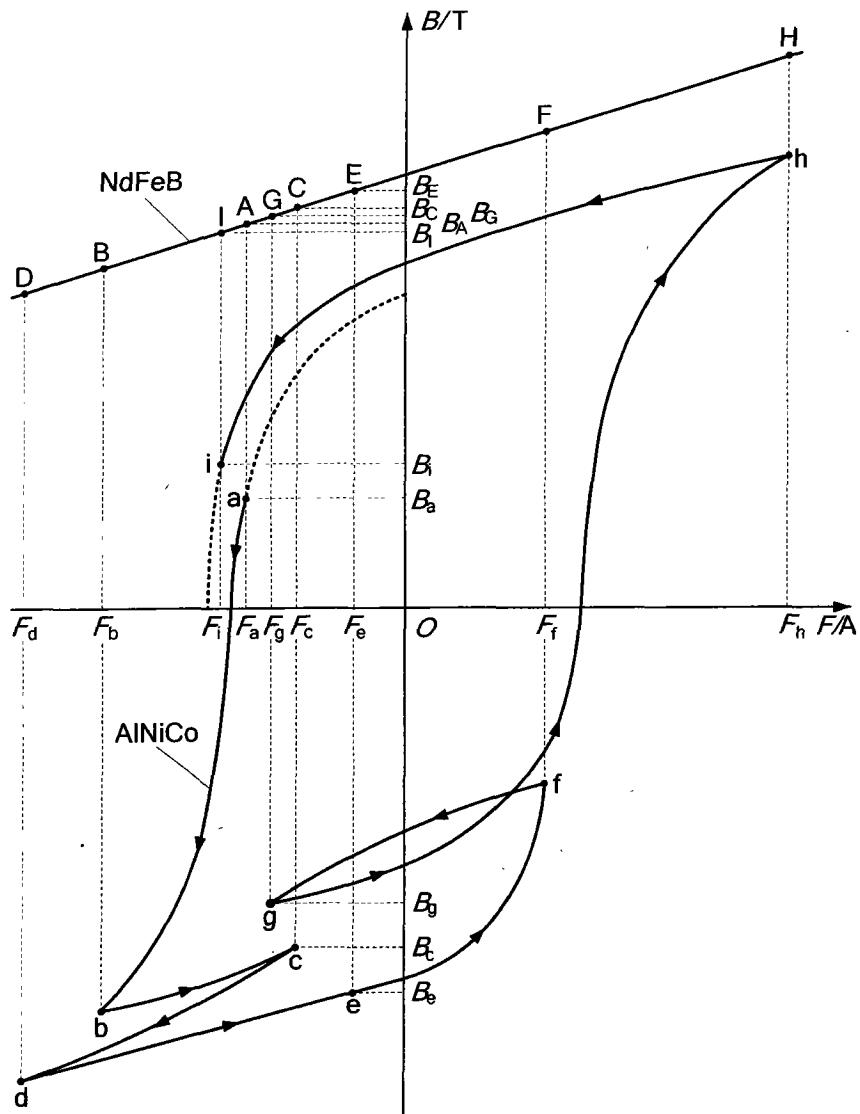


图 5