

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局



(10) 国际公布号

WO 2020/228201 A1

(43) 国际公布日

2020 年 11 月 19 日 (19.11.2020)

(51) 国际专利分类号:

H02P 21/34 (2016.01) H02P 21/18 (2016.01)

H02P 21/24 (2016.01)

(21) 国际申请号:

PCT/CN2019/105364

(22) 国际申请日:

2019 年 9 月 11 日 (11.09.2019)

(25) 申请语言:

中文

(26) 公布语言:

中文

(30) 优先权:

201910389348.7 2019年5月10日 (10.05.2019) CN

(71) 申请人: 中山大洋电机股份有限公司
(ZHONGSHAN BROAD-OCEAN MOTOR CO., LTD)
[CN/CN]; 中国广东省中山市西区沙朗第三
工业区, Guangdong 528400 (CN)。

(72) 发明人: 蓝竞豪(LAN, Jinghao); 中国广东省中山市
西区沙朗第三工业区, Guangdong 528400 (CN)。
边文清(BIAN, Wenqing); 中国广东省中山市西区
沙朗第三工业区, Guangdong 528400 (CN)。

(74) 代理人: 中山市汉通知识产权代理事务
所(普通合伙)(ZHONGSHAN HANTONG
INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY (GENERAL
PARTNERSHIP)); 中国广东省中山市东区
新兴花园翠园街 2-8 幢首层 13\14 卡,
Guangdong 528400 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS,
JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) Title: METHOD FOR CONTROLLING SMOOTH START OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR UNDER
SENSOR-LESS VECTOR CONTROL

(54) 发明名称: 无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法

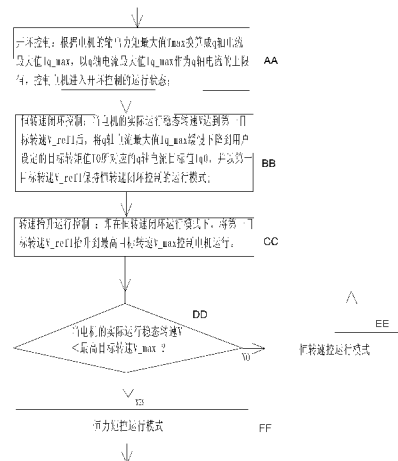


图 9

AA Open-loop control by means of converting the maximum value
Tmax of an output torque of a motor to the maximum value Iq_max
of a q-axis current and taking the maximum value Iq_max of the
q-axis current as an upper limit value of the q-axis current control
the motor to enter an open-loop control operating state
BB Constant-speed closed-loop control after an actual steady-state
operating speed V of the motor reaches a first target speed V_ref1
slowly reduce the maximum value Iq_max of the q-axis current to a
target value Iq0 corresponding to a target torque value T0 set by a
user of the q-axis current and maintain a constant-speed
closed-loop control operating mode at the first target speed V_ref1
CC Speed increase operation control in a constant-speed closed-loop
operating mode increase the first target speed V_ref1 to the
highest target speed V_max to control the motor to operate
DD is the actual steady-state operating speed V of the motor less than
the highest target speed V_max?
EE Constant-speed control operating mode
FF Constant-torque control operating mode

(57) Abstract: A method for controlling a smooth start of a permanent magnet synchronous motor under sensor-less vector control. After a permanent magnet synchronous motor is started, a mode thereof is set as a constant-torque operating mode or a constant-speed operating mode. The method comprises: open-loop control: driving, with Iq_max as a target value of a q-axis current, a motor to operate, and under the open-loop control, when an actual steady-state operating speed V of the motor reaches a first target speed V_ref1, entering a constant-speed closed-loop control mode; and a constant-speed closed-loop control stage: using a current PI control loop of

LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

a q axis to slowly converge a real-time detected current value I_{q1} of the q axis to I_{q0} ; and in the constant-speed closed-loop control mode, increasing the first target speed V_{ref1} to the highest target speed V_{max} to control the motor to operate, and then entering a constant-torque control mode. The method can ensure a smooth and stable start, reduce the vibration and noise during motor operation and improve start reliability.

(57) 摘要: 一种无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法, 该永磁同步电机在启动后被设定为恒转矩运行模式或恒转速运行模式, 该方法包括: 开环控制, 以 I_{q_max} 为 q 轴电流的目标值驱动电机运行, 在开环控制下, 当电机的实际运行稳态转速 V 达到第一目标转速 V_{ref1} , 进入恒转速闭环控制模式; 恒转速闭环控制阶段, 利用 q 轴的电流 PI 控制环将 q 轴实时检测电流值 I_{q1} 缓慢地收敛到 I_{q0} ; 在转速闭环控制模式下, 将第一目标转速 V_{ref1} 抬升到最高目标转速 V_{max} 控制电机运行, 然后进入恒转矩控制模式。该方法能保证启动的平滑稳定, 减少电机运行的振动和噪音, 提高启动可靠性。

无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法

技术领域:

本发明涉及无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法。

背景技术:

目前,无位置传感器矢量控制永磁同步电机的控制方法,一般有恒转矩控制模式、或恒转速控制模式,或恒风量控制模式三种。

例如美国专利 US7525269 公开的无位置传感器三相同步电机矢量控制器,只公开了电流转矩控制模式,进行恒转矩控制。

中国专利 CN103929109(A)也公开,基于无位置传感器矢量控制永磁同步电机的恒转速控制方法。

如图 1 所示,一般恒转矩控制的方框图如图 1 所示,由于力矩 T 只与 q 轴电流有关,根据力矩计算公式 $T=K \cdot I_q$,给出力矩设定值 T 就换算成 q 轴的设定电流 I_q ,就可以利用 q 轴 PI 电流环进行闭环控制实现恒力矩的控制。

基于恒转矩运行模式下的无位置传感矢量控制的永磁同步电机启动控制策略,通常是采用电流观测器控制策略来估算反电动势,再通过反电动来估算转速和转子位置。在过低的转速,由于电参量幅值偏小,很难进行有效的估算。所以,通常电机启动时,先通过开环控制将电机转速提高到能够可靠估算的转速,然后再切入到闭环控制。而恒转矩控制策略并未对转速做闭环控制,所以在启动阶段为了能够可靠的接入闭环控制,通常的做法是提高开环控制的转速,这样容易引起启动阶段超调,启动时电机震动和噪音较大。在低速启动阶段电流信号比较混乱,若用户以较小的力矩指令值来启动,则容易引起电流限幅而导致转速估算失步,最终启动失败。因此,需要有一个有效可靠的控制策略,既能保证在恒转速模式下运行平稳,又可以在恒转矩模式下启动平稳,提高用户体验,又能够确保启动成功可靠性。

发明内容:

本发明的目的是提供一种无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，主要解决现有技术中基于恒转矩运行模式下的无位置传感矢量控制的永磁同步电机在启动中启动不平稳，电机震动和噪音较大，容易引起启动失败，启动不可靠的技术问题。

本发明的目的是通过以下的技术方案予以实现的：

无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，至少包括开环控制和恒转速闭环控制两个阶段。

上述的无位置传感器矢量控制永磁同步电机在启动后被设定为恒转矩运行模式或恒转速运行模式，所述控制方法包括如下步骤：

开环控制：根据电机的输出力矩最大值 $T_{\max}$ 换算成 q 轴电流最大值 I_{q_max} ，以 q 轴电流最大值 I_{q_max} 作为 q 轴电流的上限值，控制电机进入开环控制的运行状态；

恒转速闭环控制：当电机的实际运行稳态转速 V 达到第一目标转速 V_{ref1} 后，将 q 轴电流最大值 I_{q_max} 缓慢下降到用户设定的目标转矩值 T_0 所对应的 q 轴电流目标值 I_{q0} ，并以第一目标转速 V_{ref1} 保持恒转速闭环控制的运行模式。

上述的无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，还包括：

转速抬升运行控制：即在恒转速闭环运行模式下，将第一目标转速 V_{ref1} 抬升到最高目标转速 V_{max} 控制电机运行，当电机的实际运行稳态转速 V 达到最高目标转速 V_{max} 时，以最高目标转速 V_{max} 保持恒转速闭环控制的运行模式；当电机的实际运行稳态转速 V 达不到最高目标转速 V_{max} 时，则进入恒转矩闭环控制的运行模式。

上述控制方法所述恒转矩闭环控制的运行模式是以目标转矩值 T_0 作恒转矩闭环控制，即根据用户设定的目标转矩值 T_0 换算成 q 轴电流目标值 I_{q0} ，利用 q 轴的电流 PI 控制环以 q 轴电流目标值 I_{q0} 为目标进行闭环控制。

上述控制方法所述恒转矩闭环控制中，当转矩指令值偏小时或者负载变重

时, 实际运行稳态转速 V 小于预设的最低目标转速 $V_{\min}$ 时, 退出恒转矩闭环控制模式进入恒转速控制, 并通过在 q 轴电流目标值 I_{q0} 基础上增加电流增量 ΔI_q 对转速进行干预, 使电机以设定的最低目标转速 $V_{\min}$ 作恒转速闭环控制, $V_{\max} > V_{\min} \geq V_{\text{ref1}}$ 。

上述控制方法所述在电机以设定的最低目标转速 $V_{\min}$ 作恒转速控制时, 若实际运行稳态转速 V 与最低目标转速 $V_{\min}$ 的转速差 Err 大于设定值 $E0$ 时, 退出恒转速控制重新进入恒转矩控制, 即以目标转矩值 $T0$ 作恒转矩闭环控制。

上述控制方法所述的实际运行稳态转速 V , 是指电机以第一目标转速 V_{ref1} 恒速运行在一定的时间 $T2$ 内实时检测转速 V_t 与第一目标转速 V_{ref1} 相当。

上述控制方法所述的一定的时间 $T2$ 是指 2 秒至 4 秒, 所述的实时检测转速 V_t 与第一目标转速 V_{ref1} 相当是指两者相差不超过 10 转/分钟。

本发明的无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法有益效果是:

1) 本发明的平滑启动控制方法, 至少包括开环控制和恒转速闭环控制两个阶段, 开环控制: 根据电机的输出力矩最大值 $T_{\max}$ 换算成 q 轴电流最大值 $I_{q_{\max}}$, 以 q 轴电流最大值 $I_{q_{\max}}$ 作为 q 轴电流的上限值, 控制电机进入开环控制的运行状态; 在恒转速闭环控制: 当电机的实际运行稳态转速 V 达到第一目标转速 V_{ref1} 后, 将 q 轴电流最大值 $I_{q_{\max}}$ 缓慢下降到用户设定的目标转矩值 $T0$ 所对应的 q 轴电流目标值 I_{q0} , 并以第一目标转速 V_{ref1} 保持恒转速闭环控制的运行模式; 转速抬升运行控制: 即在恒转速闭环运行模式下, 将第一目标转速 V_{ref1} 抬升到最高目标转速 $V_{\max}$ 控制电机运行, 当电机的实际运行稳态转速 V 达到最高目标转速 $V_{\max}$ 时, 以最高目标转速 $V_{\max}$ 保持恒转速闭环控制的运行模式; 当电机的实际运行稳态转速 V 达不到最高目标转速 $V_{\max}$ 时, 则进入恒转矩闭环控制的运行模式。这样控制方式产生如下的技术效果:

A、启动过程非常平滑, 避免传统的做法容易引起启动阶段超调问题, 消除

传统的控制策略下引起启动时电机震动和噪音问题，提高用户体验；

B、启动稳定，有效消除启动失败，提高启动的可靠性；

C、能够在最小力矩指令下稳定可靠的启动电机，控制模式切换过程平滑；
本发明整个启动过程效果可以做到与带霍尔传感器的永磁同步电机的启动效果无多大差别；

D、扩大电机的在启动阶段的力矩值整定范围，有利于启动控制的平滑。

附图说明：

图 1 是传统无位置传感器矢量控制永磁同步电机恒转矩控制方框图。

图 2 是无位置传感器矢量控制永磁同步电机原理示意图。

图 3 是本发明永磁同步电机的立体图；

图 4 是本发明永磁同步电机的电机控制器的立体图；

图 5 是本发明永磁同步电机的剖视图；

图 6 是本发明永磁同步电机的电机控制器的原理方框图；

图 7 是图 6 对应的电路图；

图 8 是永磁同步电机矢量控制的各坐标系关系图；

图 9 是本发明的永磁同步电机的平滑启动控制流程图；

图 10 是本发明的永磁同步电机的开环控制的框图；

图 11 是本发明的永磁同步电机的恒转速闭环控制的框图；

图 12 是本发明的永磁同步电机的转速抬升运行控制的框图；

图 13 是本发明的永磁同步电机的恒转矩闭环控制的框图。

具体实施方式：

下面通过具体实施例并结合附图对本发明作进一步详细的描述。

如图 3、图 4、图 5 所示，举例：假设本发明是一种三相永磁同步电机，由电机控制器 2 和电机单体 1，所述的电机单体 1 包括定子组件 12、转子组件 13 和机壳组件 11，定子组件 13 安装在机壳组件 11 上，转子组件 13 套装在定子组

件 12 的内侧或者外侧组成, 电机控制器 2 包括控制盒 22 和安装在控制盒 22 里面的控制线路板 21, 控制线路板 21 一般包括电源电路、微处理器、母线电压检测电路、逆变器, 电源电路为各部分电路供电, 母线电压检测电路将直流母线电压 U_{abc} 输入到微处理器, 微处理器控制逆变器, 逆变器控制定子组件 12 的各相线圈绕组的通断电。

如图 6、图 7 所示, 假设 3 相无刷直流永磁同步电机的相线电流检测电路将各相的电流 i_a 、 i_b 、 i_c 输入到微处理器。交流输入 (AC INPUT) 经过由二极管 D7、D8、D9、D10 组成的全波整流电路后, 在电容 C1 的一端输出直流母线电压 V_{bus} , 直流母线电压 V_{bus} 与输入交流电压有关, 微处理器输入到逆变器的 PWM 信号, 逆变器由电子开关管 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 、 q_5 、 q_6 组成, 电子开关管 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 、 q_5 、 q_6 的控制端分别由微处理器输出的 6 路 PWM 信号 (P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6) 控制。

如图 2 所示, 简述无位置传感器矢量控制永磁同步电机的基本工作原理 (教科书有详细的描述), 永磁同步电机看作是定子的旋转磁场与转子旋转磁场相互作用的结果, 图中有两个坐标系, 一个是转子旋转坐标系 dq 轴; 另一个定子静止坐标系 ABC 坐标系 (可以转换成 α β 相互垂直的坐标系); 转子可以看作是励磁电流 i_f 的作用以转速 ω_r 旋转, 定子可以看作是励磁电流 i_s 的作用转速 ω_s 旋转, 图中定子的合成矢量是 S; 根据电磁转矩的计算公式:

$$T_e = P_0 \cdot \psi_f \times i_q \text{ --- (1)}$$

P_0 是电机的极对数 (常数), ψ_f 是励磁电流 i_f 的作用产生的磁链, 由于转子是永磁转子, $i_f=0$, ψ_f 变成常熟, 电磁转矩的公式变成:

$$T_e = K \times i_q \text{ --- (2)}$$

K 是一个常数, 永磁同步电机电磁转矩 T_e 只与 q 轴电流有关。

如图 8 所示, 定子静止坐标系 ABC 坐标系用 α β 相互垂直的坐标系代替。

定子静止坐标系是 $\alpha\beta$ 的坐标系，转子旋转坐标系是 dq 坐标系， $\alpha\beta$ 的坐标系与 dq 坐标系的夹角是 θ 。

如图 9 所示，本发明的无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，至少包括开环控制和恒转速闭环控制两个阶段，该无位置传感器矢量控制永磁同步电机在启动后被设定为恒转矩运行模式或恒转速运行模式，所述控制方法包括如下步骤：

开环控制：根据电机的输出力矩最大值 $T_{\max}$ 换算成 q 轴电流最大值 I_{q_max} ，以 q 轴电流最大值 I_{q_max} 作为 q 轴电流的上限值，控制电机进入开环控制的运行状态；

恒转速闭环控制：当电机的实际运行稳态转速 V 达到第一目标转速 V_{ref1} 后，将 q 轴电流最大值 I_{q_max} 缓慢下降到用户设定的目标转矩值 T_0 所对应的 q 轴电流目标值 I_{q0} ，并以第一目标转速 V_{ref1} 保持恒转速闭环控制的运行模式。

转速抬升运行控制：即在恒转速闭环运行模式下，将第一目标转速 V_{ref1} 抬升到最高目标转速 V_{max} 控制电机运行，当电机的实际运行稳态转速 V 达到最高目标转速 V_{max} 时，以最高目标转速 V_{max} 保持恒转速闭环控制的运行模式；当电机的实际运行稳态转速 V 达不到最高目标转速 V_{max} 时，则进入恒转矩闭环控制的运行模式。

其中，开环控制：根据电机的输出力矩最大值 $T_{\max}$ 换算成 q 轴电流最大值 I_{q_max} ，以 q 轴电流最大值 I_{q_max} 作为 q 轴电流的上限值，控制电机进入开环控制的运行状态，见图 10 所示；

恒转速闭环控制：设定第一目标转速 V_{ref1} 为闭环切入点转速，在开环控制下，当电机的实际运行稳态转速 V 达到第一目标转速 V_{ref1} 后，将 q 轴电流最大值 I_{q_max} 缓慢下降到用户设定的目标转矩值 T_0 所对应的 q 轴电流目标值 I_{q0} ，并以第一目标转速 V_{ref1} 保持恒转速闭环控制的运行模式，见图 11 所示；

转速抬升运行控制：即在恒转速闭环运行模式下，将第一目标转速 V_{ref1} 抬升到最高目标转速 V_{max} 控制电机运行，当电机的实际运行稳态转速 V 达到

最高目标转速 $V_{\max}$ 时, 以最高目标转速 $V_{\max}$ 保持恒转速闭环控制的运行模式; 当电机的实际运行稳态转速 V 达不到最高目标转速 $V_{\max}$ 时, 则进入恒转矩闭环控制的运行模式, 见图 12 所示, $V_{\max} > V_{\text{ref1}}$ 。

恒转矩闭环控制: 以目标转矩值 T_0 作恒转矩闭环控制, 即根据用户设定的目标转矩值 T_0 换算成 q 轴电流目标值 I_{q0} , 利用 q 轴的电流 PI 控制环以 q 轴电流目标值 I_{q0} 为目标进行闭环控制, 见图 13 所示, 在恒转矩闭环控制中, 当转矩指令值偏小时或者负载变重时, 实际运行稳态转速 V 小于预设的最低目标转速 $V_{\min}$ 时, 退出恒转矩闭环控制模式进入恒转速控制, 并通过在 q 轴电流目标值 I_{q0} 基础上增加电流增量 ΔI_q 对转速进行干预, 使电机以设定的最低目标转速 $V_{\min}$ 作恒转速闭环控制, $V_{\max} > V_{\min} \geq V_{\text{ref1}}$ 。在电机以设定的最低目标转速 $V_{\min}$ 作恒转速控制时, 若实际运行稳态转速 V 与最低目标转速 $V_{\min}$ 的转速差 Err 大于设定值 E_0 时, 退出恒转速控制重新进入恒转矩控制, 即以目标转矩值 T_0 作恒转矩闭环控制, 即利用 q 轴的电流 PI 控制环, 根据用户设定的目标转矩值 T_0 换算成 q 轴电流目标值 I_{q0} 为目标进行闭环控制。

上述控制方法所述的实际运行稳态转速 V , 是指电机以第一目标转速 V_{ref1} 恒速运行在一定的时间 T_2 内实时检测转速 V_t 与第一目标转速 V_{ref1} 相当。

上述控制方法所述的一定的时间 T_2 是指 2 秒至 4 秒, 所述的实时检测转速 V_t 与第一目标转速 V_{ref1} 相当是指两者相差不超过 10 转/分钟。

本发明经过分析和大量试验后, 采用此发明控制策略, 电机的启动运行过程做到平滑可靠, 其噪音和震动可以忽略, 满足用户需求和体验。而且, 采用默认的最小力矩值启动电机, 其启动过程一样稳定平滑, 满足用户的力矩调整范围。

具体实验过程如下: 提取一台电机做实验, 假设 $V_{\text{ref1}}=300$ 转/分, $V_{\text{ref2}}=600$ 转/分, $V_{\min}=580$ 转/分, 该永磁同步电机在启动后被设定为恒转矩运行模式, 即根据用户设定的目标转矩值 $T_0=79$ 牛·米, 换算成 q 轴电流目标值 $I_{q0}=1.5\text{A}$, 以目标转矩值 T_0 作恒转矩控制。

第一步：开环控制阶段，根据电机的最大输出力矩值 $T_{\max}$ 换算成 q 轴电流最大值为 I_{q_max} ，并以 I_{q_max} 为 q 轴电流给定的上限值驱动电机运行，设定第一目标转速 V_{ref1} 为闭环切入点转速，开环控制阶段的时间为 t_1 ，适当较长，避免 q 轴电流的增量过大导致的震动和噪音，设定第一目标转速 $V_{ref1}=300$ 转/分为闭环切入点转速：

第二步：恒转速闭环控制阶段，在以第一目标转速 $V_{ref1}=300$ 转/分为目标的恒转速控制下，使电机以第一目标转速 V_{ref1} 恒速运行达到稳定后，将 q 轴电流给定上限值从 I_{q_max} 缓慢下降到用户设定的目标转矩值 T_0 所对应的电流值 I_{q0} ，此时还是以第一目标转速 V_{ref1} 恒速运行，然后进入转速抬升阶段；也就是缩小 q 轴实际检测电流值 I_{q1} ，将 q 轴实时检测电流值 I_{q1} 与目标转矩值 T_0 对应的 q 轴电流给定值 I_{q0} 进行比较，利用 q 轴的电流 PI 控制环将 q 轴实时检测电流值 I_{q1} 缓慢的收敛到 I_{q0} ；

第三步：转速抬升阶段，将第一目标转速 $V_{ref1}=300$ 转/分提高到 $V_{ref2}=600$ 转/分，在转速闭环控制的模式下，将第一目标转速 V_{ref1} 抬升到最高目标转速 V_{max} 控制电机运行， V_{max} 为最高转速，当电机的实际运行稳态转速 V 达到最高目标转速 V_{max} 时，以最高目标转速 V_{max} 保持恒转速闭环控制的运行模式；当电机的实际运行稳态转速 V 达不到最高目标转速 V_{max} 时，则进入恒转矩闭环控制的运行模式。

第四步：恒转矩闭环控制阶段：以目标转矩值 T_0 作恒转矩控制，即利用 q 轴的电流 PI 控制环以 q 轴电流目标值 I_{q0} 为目标进行闭环控制，见图 13 所示。

在恒转矩控制阶段中，当转矩指令值偏小时或者负载变重时，转速会下降，当实际运行稳态转速 V 小于预设的最低目标转速 V_{min} 时，退出恒转矩控制模式进入恒转速控制模式，通过在 q 轴的电流给定值 I_{q0} 基础上增加额外电流增量 ΔI_q 对转速进行干预，使电机以设定的最低目标转速 V_{min} 作恒转速闭环控制；在电机以设定的最低目标转速 V_{min} 作恒转速控制时，若实际运行稳态转速 V 与最低目标转速 V_{min} 的转速差 Err 大于设定值 E_0 时，退出恒转速控

制重新进入恒转矩控制若实际运行稳态转速 V 与最低目标转速 $V_{\min}$ 的转速差 Err 大于设定值 $E0$ 时，退出恒转速控制重新进入恒转矩闭环控制，即以目标转矩值 $T0$ 作恒转矩控制，利用 q 轴的电流 PI 控制环以 q 轴电流目标值 $Iq0$ 为目标进行闭环控制。

上述的转速 PI 控制环设置进入和退出机制，转速差 $Err=V-V_{\min}$ ，利用转速差 Err 作为判断要件，当转速差 Err 大于设定值 $E0$ 时，退出转速 PI 控制环， ΔIq 是对转速差 Err 积分后获得。

上述的转速 PI 控制环设置进入和退出机制，转速差 $Err=V1-V_{\min}$ ，利用转速差 Err 作为判断要件，当转速差 Err 大于等于 0 时，进入转速 PI 控制环， q 轴电流的增量 ΔIq 不为零；当转速差 Err 小于等于 0 时，退出转速 PI 控制环， q 轴电流的增量 ΔIq 为 0，相当于进入恒转矩闭环控制模式。

例如一般的风机由电机驱动，电机设置恒转矩控制，即根据用户设定的力矩 T 换算成 q 轴的电流给定值 $Iq0$ ，然后给定 q 轴的目标电流值 $Iq0$ 等于电流给定值 Iq_limit ，利用 q 轴的电流 PI 控制环实现恒转矩控制；当外部静压突然增加很多（相当于负载增加），转速会下降，当实际运行稳态转速 V 小于预设的最低目标转速 $V_{\min}$ （例如 600 转/分）时，退出恒转矩控制模式进入恒转速控制。

实际运行稳态转速 V 是由速度观测器来估算，实际运行稳态转速 V 的信号加了均值滤波和递推滤波处理，能够把转速波动抑制在较小范围内，又不影响响应速度。

在进入转速 PI 控制环调整时，由于转速 PI 控制环的作用，能快速动态调整电流增量 ΔIq ，保证转差 Err 趋于 0，转速波动非常小。在负载（转速 V ）波动时也能够短时间内调整到稳态，而且在电流增量投入和退出时过渡平滑，基本解决传统控制策略的所有缺点。这个控制策略主要关键点有如下几点：

1、转速反馈信号的处理：转速对于无位置传感器矢量控制来说是一个相当关键的电参量，在恒转矩模式下，如果转速不稳定，必然会引起力矩不稳定。

所以，必须要对转速反馈信号加以处理，确保在不影响响应速度的情况下转速信号的稳定。目前转速信号加了均值滤波和递推滤波处理，能够把转速波动抑制在较小范围内，又不影响响应速度，基本能满足控制要求。

2、转速 PI 控制环控制速度和控制参数的选择：转速 PI 控制环输出电流增量 ΔI_q 要时刻响应内环的电流 PI 控制环，所以转速 PI 控制环要比一般恒转速控制的速度环要快得多，但要兼顾转速响应和内环（电流 PI 控制环）速度，转速 PI 控制环也不能太快。但如果太慢又会调整不及时引起震荡。而不同的负载特性，其执行速度又有所区别。

分析认为，负载的转动惯量越大，转速 PI 控制环的速度就要放慢；转动惯量越小，则为保证响应速度，可以适当加快转速 PI 控制环的响应速度。

上述所述的实际运行稳态转速 V 是由速度估算模块来实现，实际运行稳态转速 V 的信号加了均值滤波和递推滤波处理，能够把转速波动抑制在较小范围内，又不影响响应速度。

以上实施例为本发明的较佳实施方式，但本发明的实施方式不限于此，其他任何未背离本发明的精神实质与原理下所作的改变、修饰、替代、组合、简化，均为等效的置换方式，都包含在本发明的保护范围之内。

权利要求

1、无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，其特征在于，所述控制方法至少包括开环控制和恒转速闭环控制两个阶段。

2、根据权利要求1所述的无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，其特征在于：所述的无位置传感器矢量控制永磁同步电机在启动后被设定为恒转矩运行模式或恒转速运行模式，所述控制方法包括：

开环控制：根据电机的输出力矩最大值 T_{max} 换算成 q 轴电流最大值 I_{q_max} ，以 q 轴电流最大值 I_{q_max} 作为 q 轴电流的上限值，控制电机进入开环控制的运行状态；

恒转速闭环控制：当电机的实际运行稳态转速 V 达到第一目标转速 V_{ref1} 后，将 q 轴电流最大值 I_{q_max} 缓慢下降到用户设定的目标转矩值 T_0 所对应的 q 轴电流目标值 I_{q0} ，并以第一目标转速 V_{ref1} 保持恒转速闭环控制的运行模式。

3、根据权利要求2所述的无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，其特征在于，所述控制方法还包括：

转速抬升运行控制：即在恒转速闭环运行模式下，将第一目标转速 V_{ref1} 抬升到最高目标转速 V_{max} 控制电机运行，当电机的实际运行稳态转速 V 达到最高目标转速 V_{max} 时，以最高目标转速 V_{max} 保持恒转速闭环控制的运行模式；当电机的实际运行稳态转速 V 达不到最高目标转速 V_{max} 时，则进入恒转矩闭环控制的运行模式。

4、根据权利要求3所述的无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，其特征在于：所述的恒转矩闭环控制的运行模式是以目标转矩值 T_0 作恒转矩闭环控制，即根据用户设定的目标转矩值 T_0 换算成 q 轴电流目标值 I_{q0} ，利用 q 轴的电流 PI 控制环以 q 轴电流目标值 I_{q0} 为目标进行闭环控制。

5、根据权利要求4所述的无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，其特征在于：在所述恒转矩闭环控制中，当转矩指令值偏小时或者负载变重时，实际运行稳态转速 V 小于预设的最低目标转速 V_{min} 时，退出恒转

矩闭环控制模式进入恒转速控制，并通过在 q 轴电流目标值 I_{q0} 基础上增加电流增量 ΔI_q ，使电机以设定的最低目标转速 $V_{\min}$ 作恒转速闭环控制。

6、根据权利要求 5 无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，其特征在于：在电机以设定的最低目标转速 $V_{\min}$ 作恒转速控制时，若实际运行稳态转速 V 与最低目标转速 $V_{\min}$ 的转速差 Err 大于设定值 $E0$ 时，退出恒转速控制重新进入恒转矩控制，即以目标转矩值 $T0$ 作恒转矩闭环控制。

7、根据权利要求 2 至 6 所述的任一种所述的无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，其特征在于：所述的实际运行稳态转速 V ，是指电机以第一目标转速 V_{ref1} 恒速运行在一定的时间 $T2$ 内实时检测转速 V_t 与第一目标转速 V_{ref1} 相当。

8、根据权利要求 7 所述的无位置传感器矢量控制永磁同步电机平滑启动控制方法，其特征在于：所述的一定的时间 $T2$ 是指 2 秒至 4 秒，所述的实时检测转速 V_t 与第一目标转速 V_{ref1} 相当是指两者相差不超过 10 转/分钟。

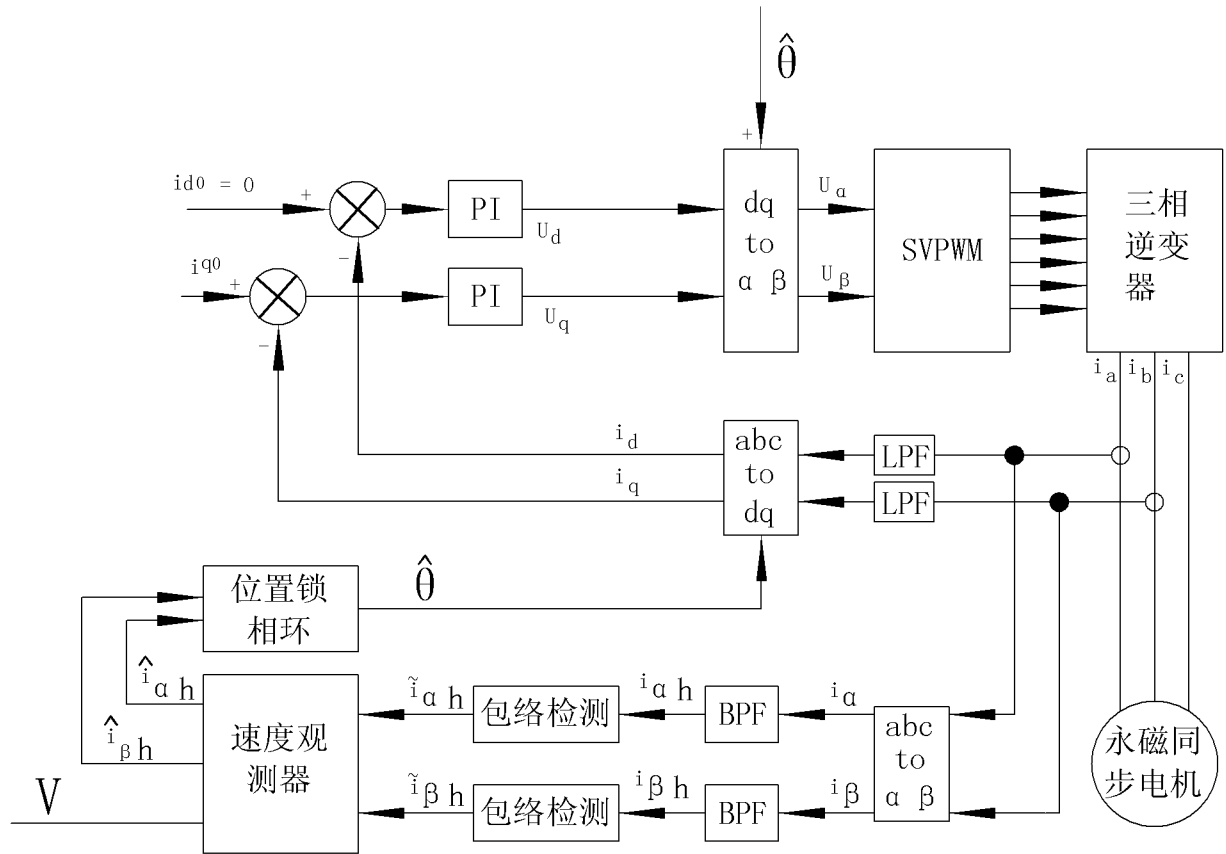


图 1

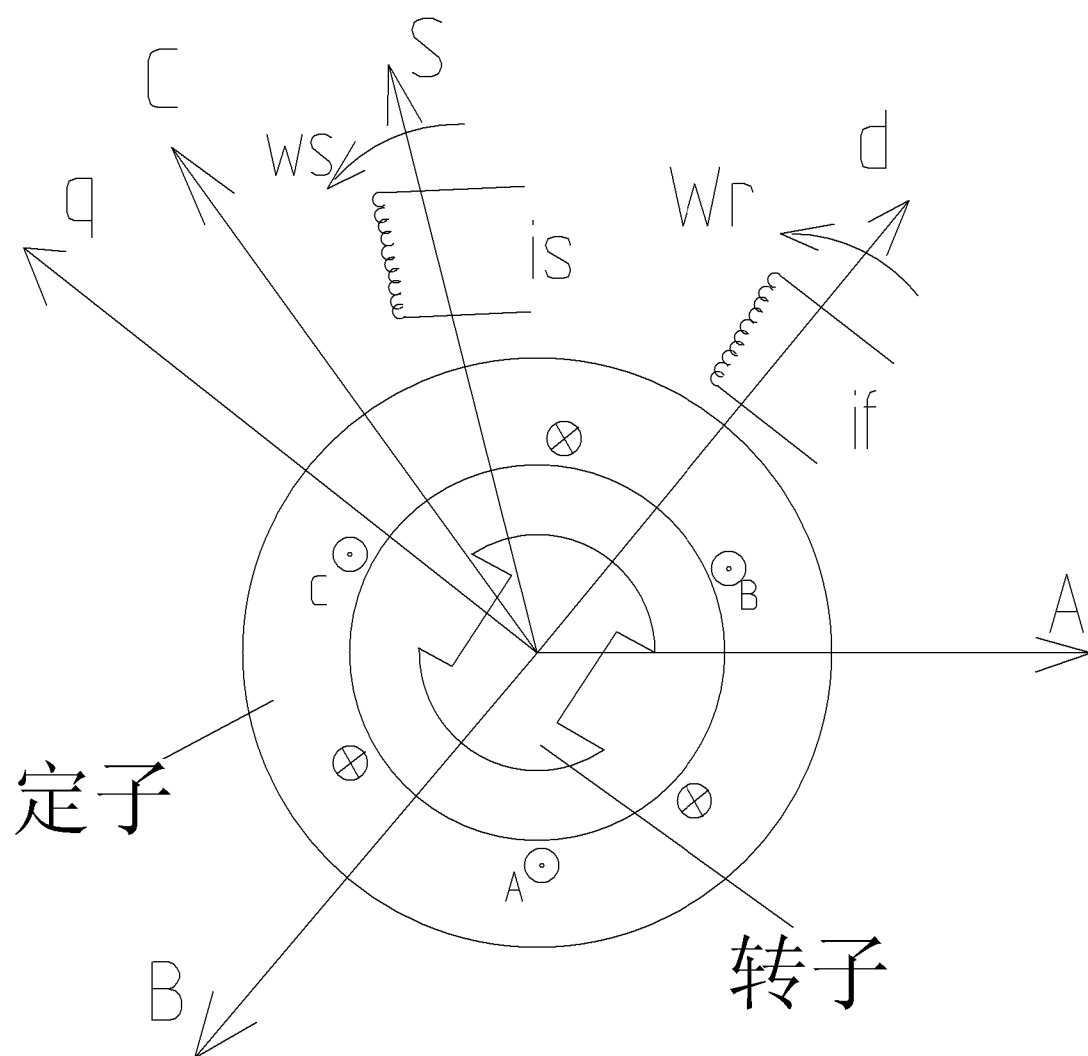


图 2

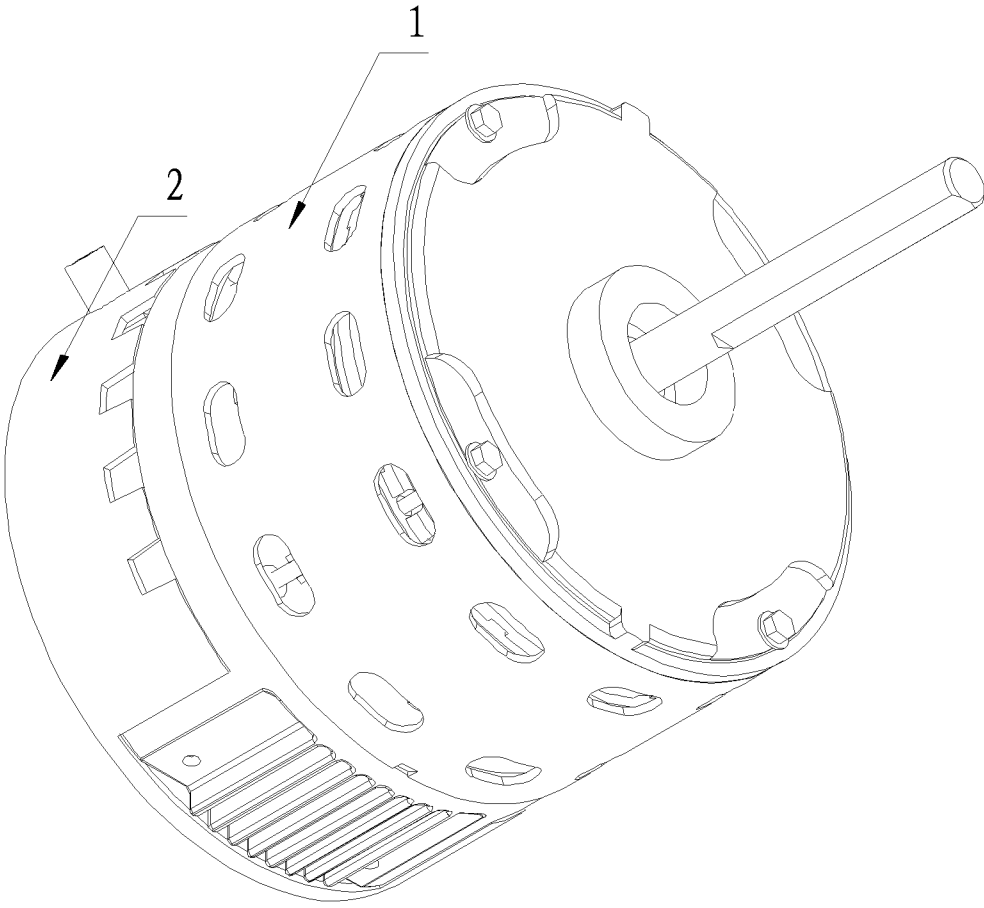


图 3

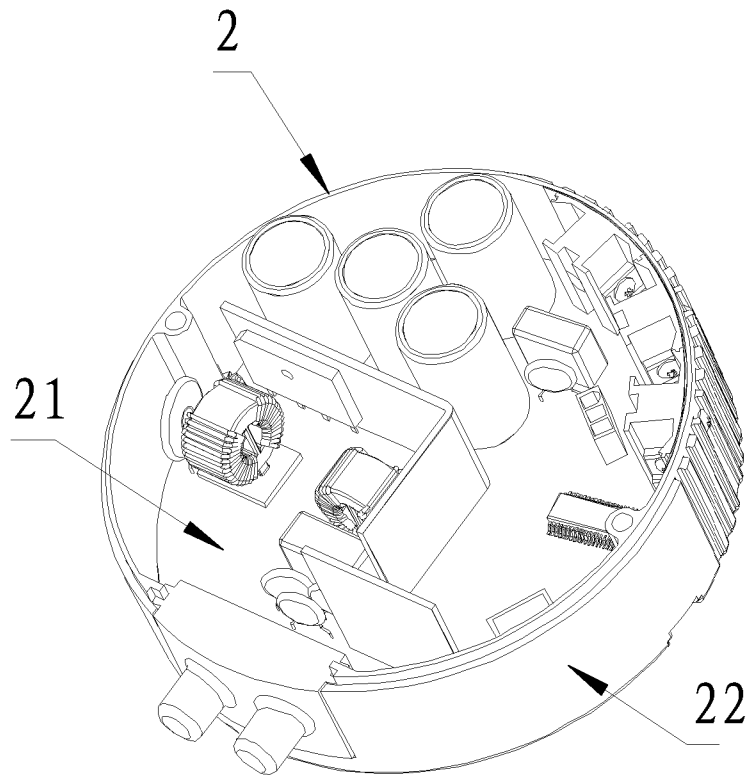


图 4

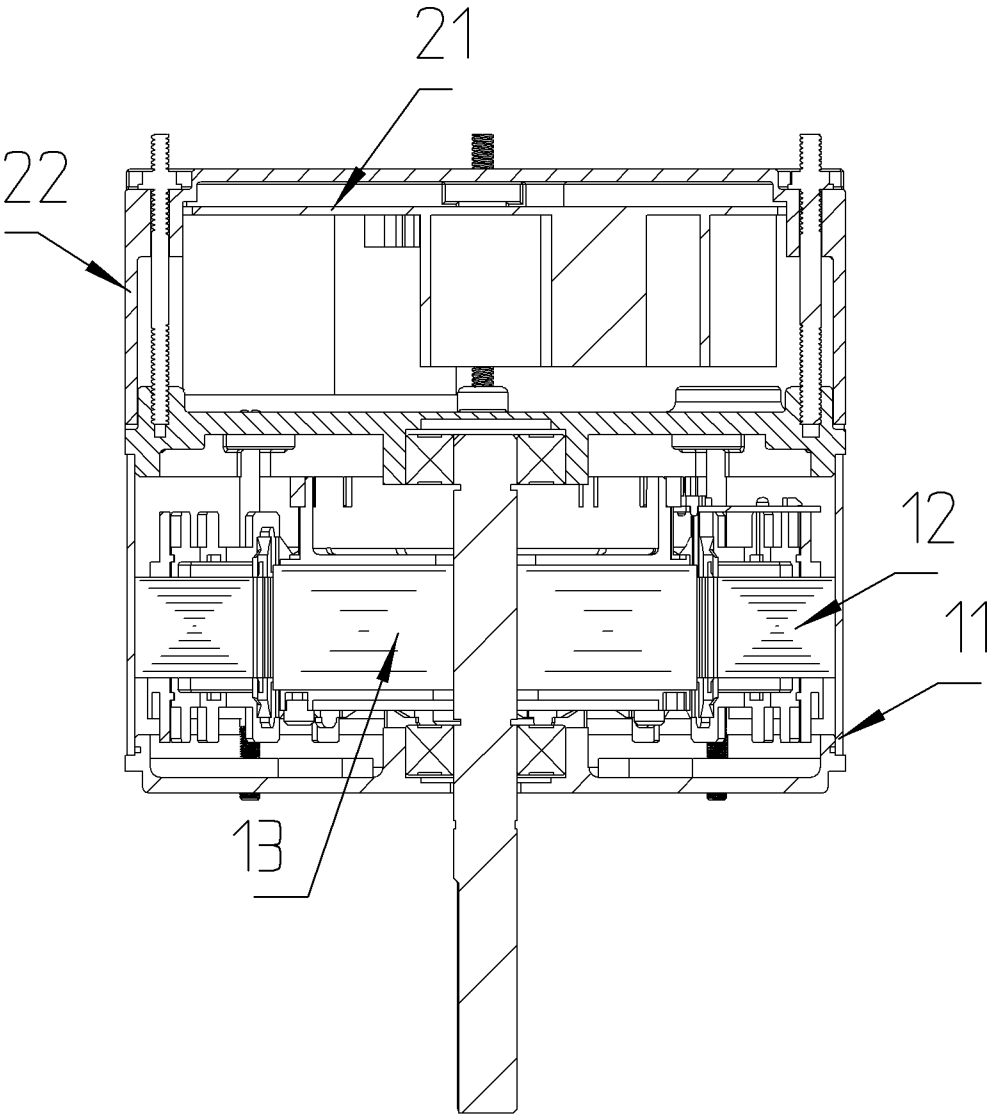


图 5

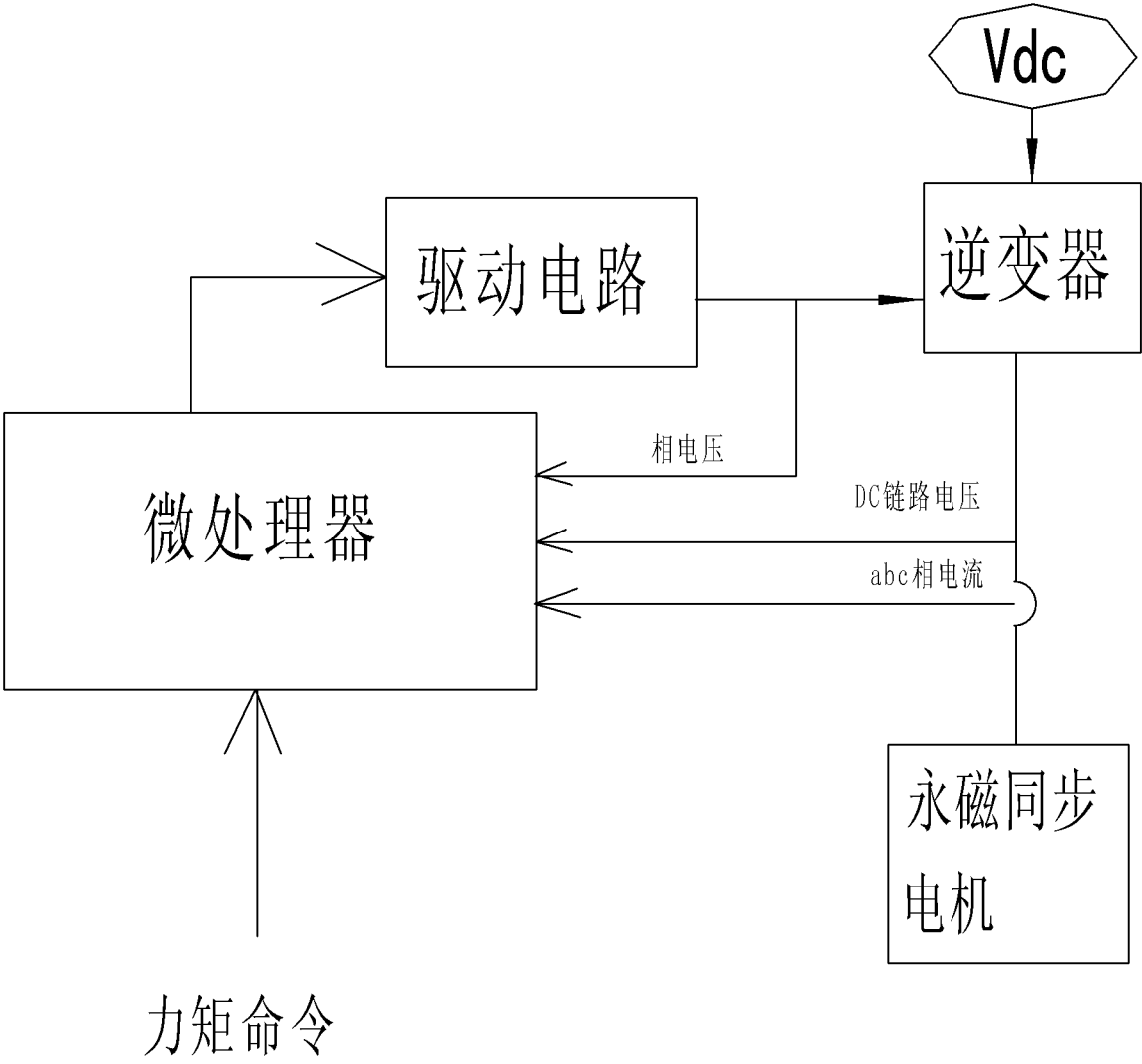


图 6

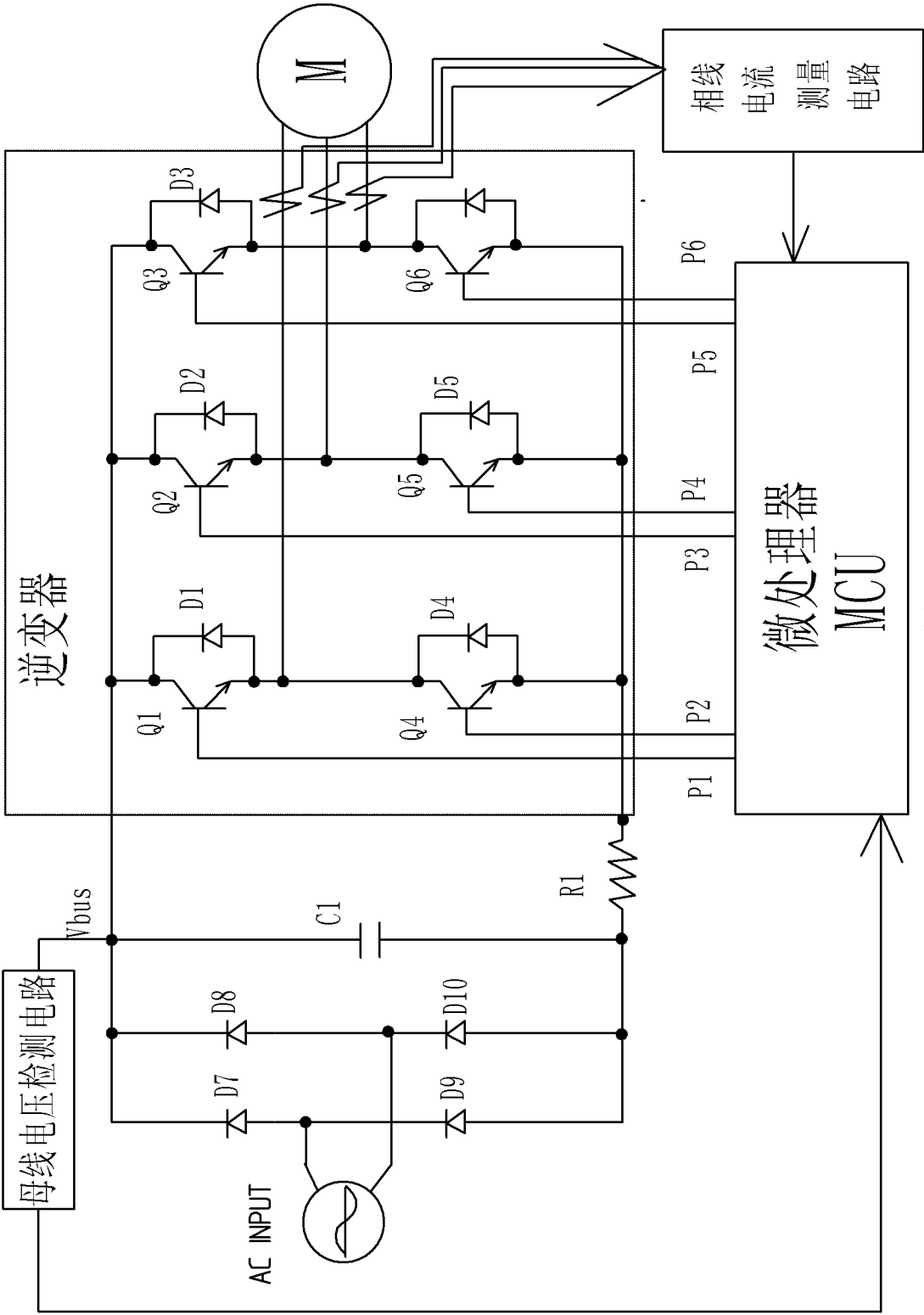


图7

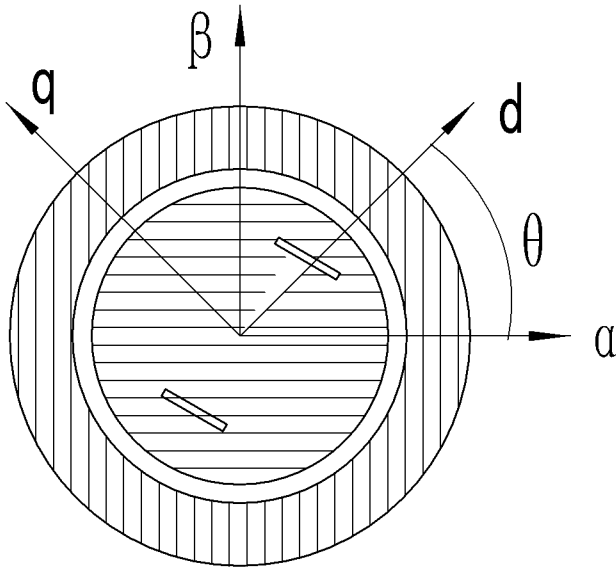


图 8

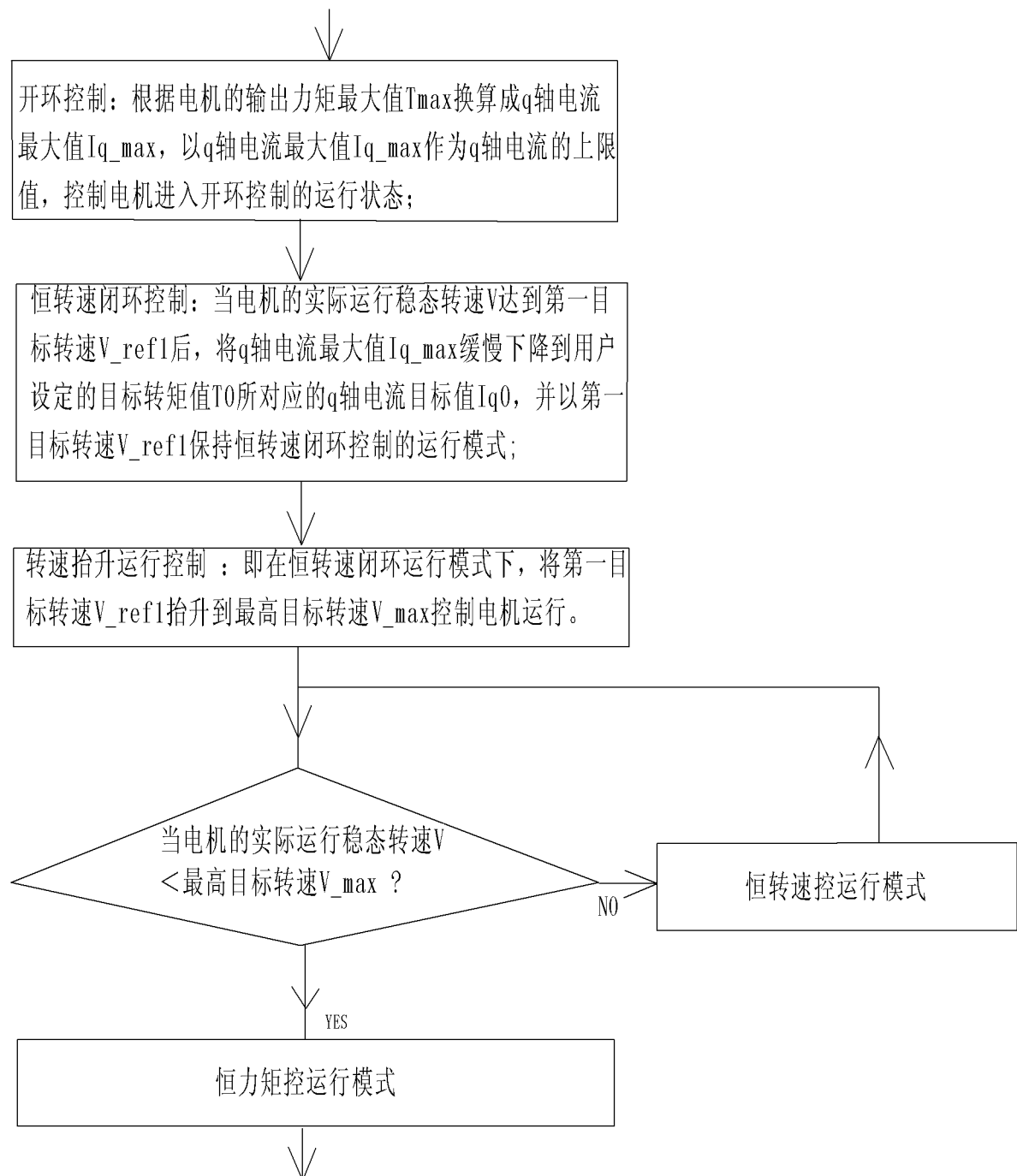


图 9

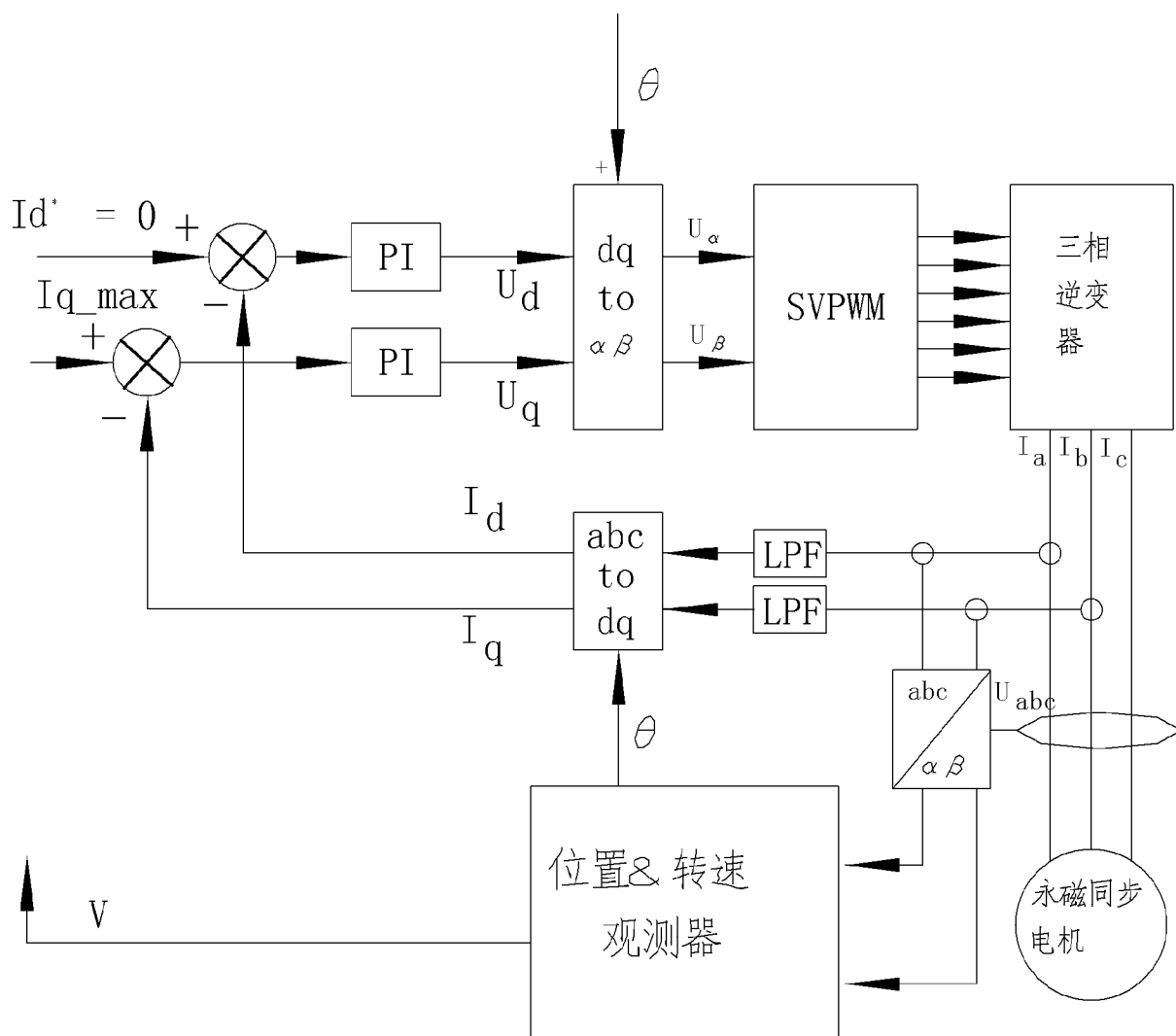


图 10

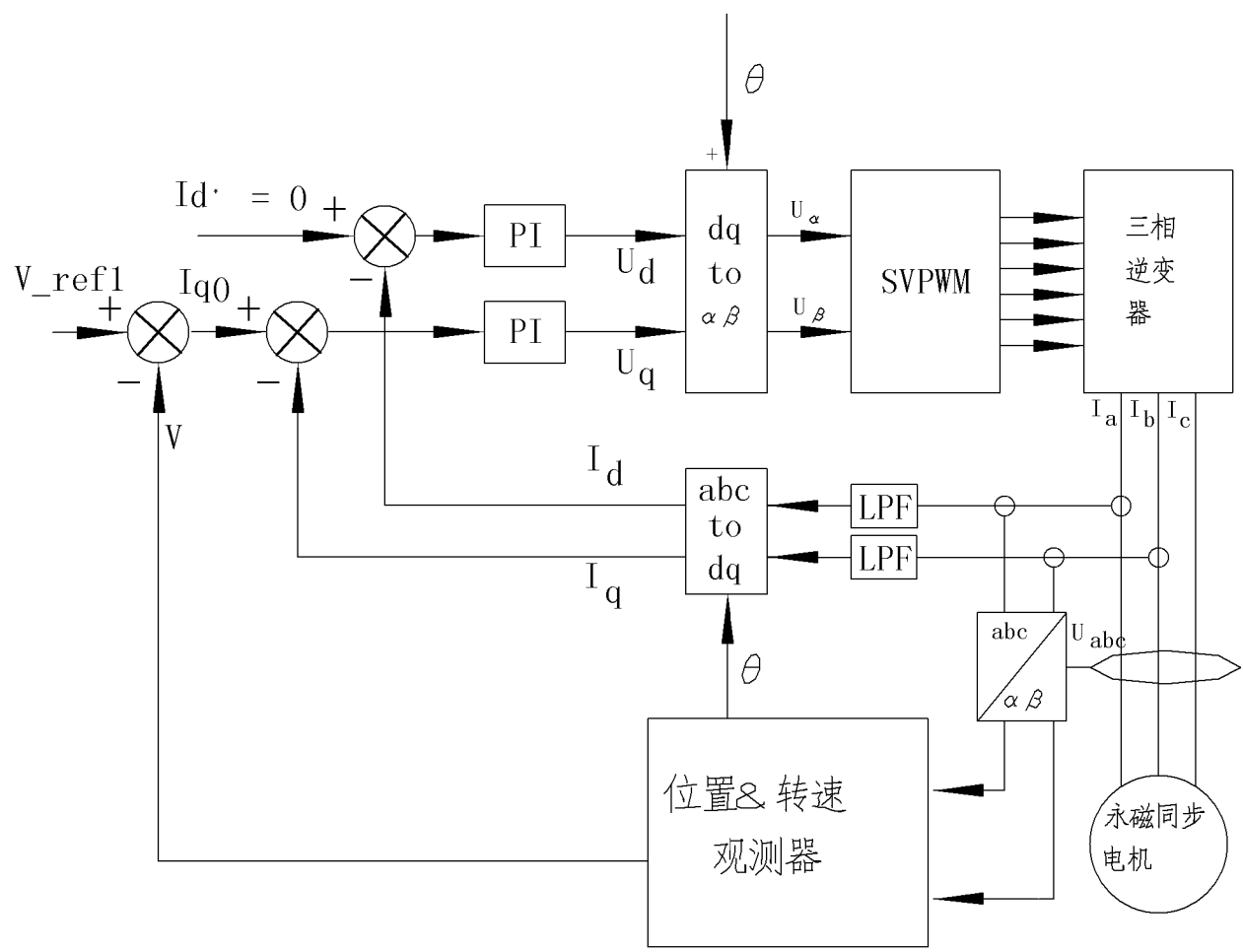


图 11

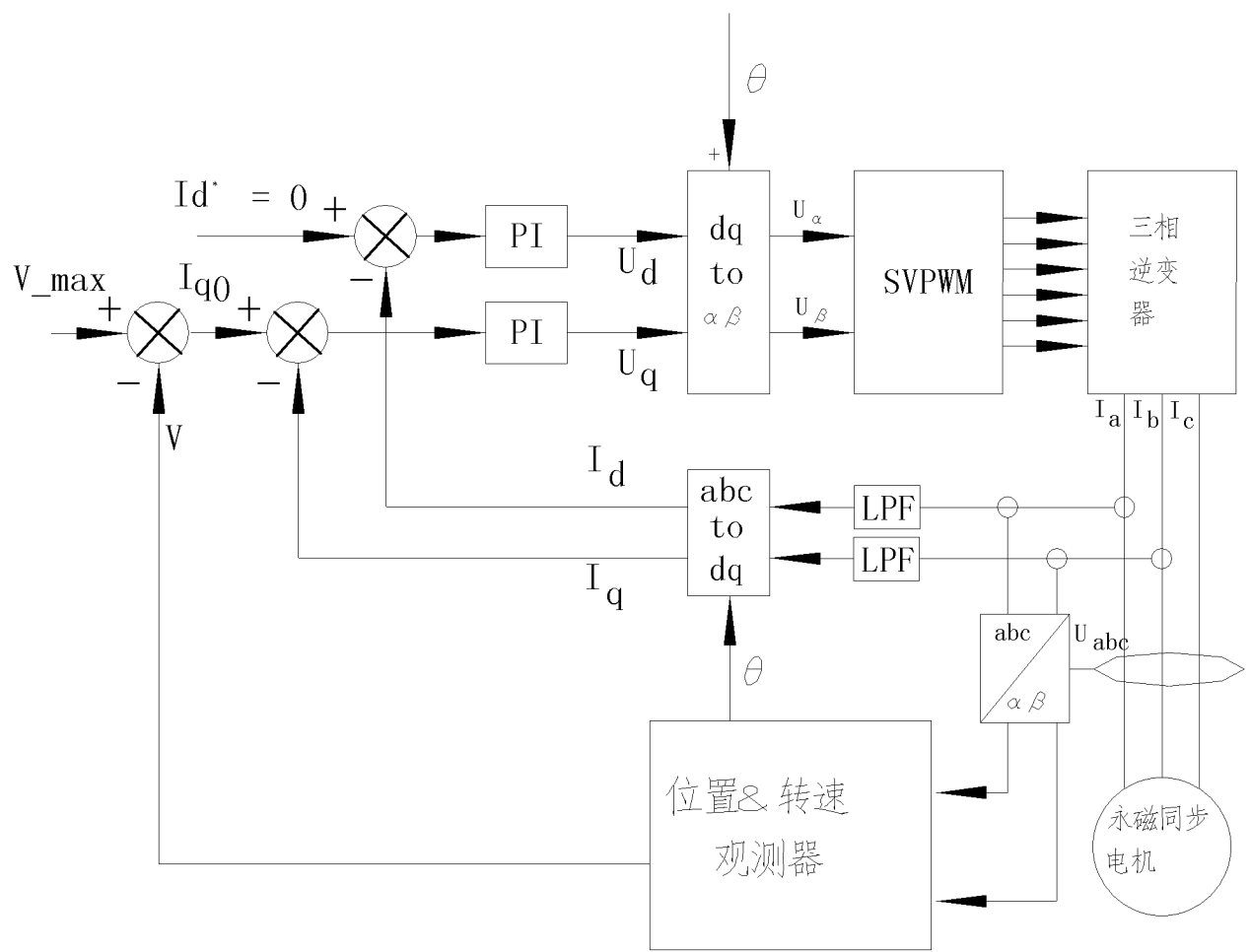


图 12

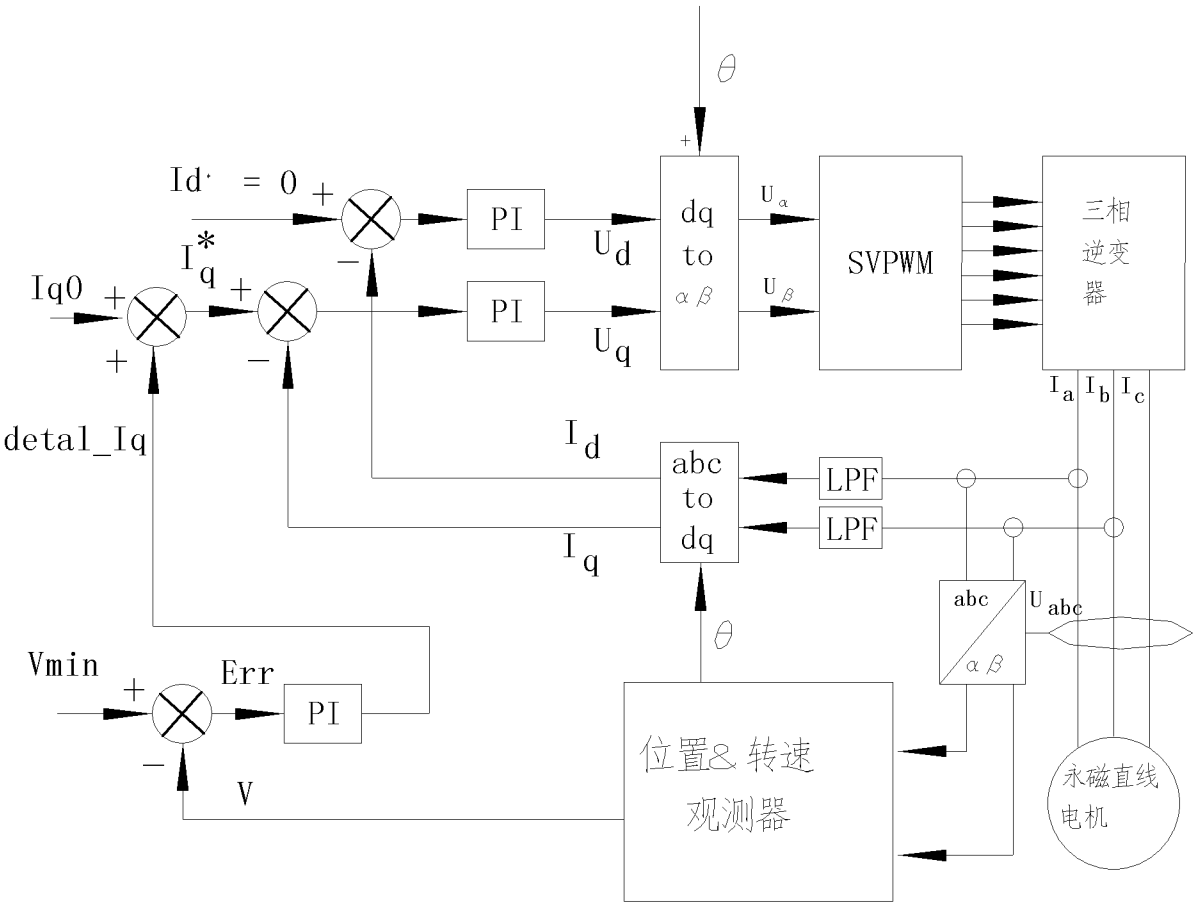


图 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/105364

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02P 21/34(2016.01)i; H02P 21/24(2016.01)i; H02P 21/18(2016.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNXTX; CNABS; CNKI; SIPOABS; DWPI; USTXT; WOTXT; EPTXT: 中山大洋电机, 开环, 闭环, q轴, 交轴, 励磁, 电流, 恒转速, 恒速, 给定, 目标, 参考, 基准, 指令, 转速, 速度, 启动, 起动, 力矩, 扭矩, 转矩, 最大, max, maximum, open loop, close + loop, q axis, quadrature axis, current, speed, target, reference, given, start, torque

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109995298 A (ZHONGSHAN BROAD-OCEAN MOTOR CO., LTD.) 09 July 2019 (2019-07-09) claims 1-8	1-8
X	CN 103219933 A (CHANGZHOU COLLEGE OF INFORMATION TECHNOLOGY) 24 July 2013 (2013-07-24) description, paragraphs [0003]-[0021], and figure 1	1
A	CN 103219933 A (CHANGZHOU COLLEGE OF INFORMATION TECHNOLOGY) 24 July 2013 (2013-07-24) entire document	2-8
A	CN 101984554 A (TECO GROUP SCIENCE-TECHNOLOGY (HANGZHOU) CO., LTD.) 09 March 2011 (2011-03-09) entire document	1-8



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date
 “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 “&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

18 December 2019

Date of mailing of the international search report

31 January 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/105364

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)
CN	109995298	A	09 July 2019	None		
CN	103219933	A	24 July 2013	CN	103219933	B 19 August 2015
CN	101984554	A	09 March 2011	CN	101984554	B 02 January 2013

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/105364

A. 主题的分类 H02P 21/34(2016.01)i; H02P 21/24(2016.01)i; H02P 21/18(2016.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类																	
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) H02P 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNTXT;CNABS;CNKI;SIPOABS;DWPI;USTXT;WOTXT;EPTXT: 中山大洋电机, 开环, 闭环, q轴, 交轴, 励磁, 电流, 恒转速, 恒速, 给定, 目标, 参考, 基准, 指令, 转速, 速度, 启动, 起动, 力矩, 扭矩, 转矩, 最大, max, maximum, open loop, close+ loop, q axis, quadrature axis, current, speed, target, reference, given, start, torque																	
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 109995298 A (中山大洋电机股份有限公司) 2019年 7月 9日 (2019 - 07 - 09) 权利要求1-8</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>CN 103219933 A (常州信息职业技术学院) 2013年 7月 24日 (2013 - 07 - 24) 说明书第[0003]-[0021]段, 附图1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103219933 A (常州信息职业技术学院) 2013年 7月 24日 (2013 - 07 - 24) 全文</td> <td>2-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 101984554 A (东元总合科技杭州有限公司) 2011年 3月 9日 (2011 - 03 - 09) 全文</td> <td>1-8</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 109995298 A (中山大洋电机股份有限公司) 2019年 7月 9日 (2019 - 07 - 09) 权利要求1-8	1-8	X	CN 103219933 A (常州信息职业技术学院) 2013年 7月 24日 (2013 - 07 - 24) 说明书第[0003]-[0021]段, 附图1	1	A	CN 103219933 A (常州信息职业技术学院) 2013年 7月 24日 (2013 - 07 - 24) 全文	2-8	A	CN 101984554 A (东元总合科技杭州有限公司) 2011年 3月 9日 (2011 - 03 - 09) 全文	1-8
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
PX	CN 109995298 A (中山大洋电机股份有限公司) 2019年 7月 9日 (2019 - 07 - 09) 权利要求1-8	1-8															
X	CN 103219933 A (常州信息职业技术学院) 2013年 7月 24日 (2013 - 07 - 24) 说明书第[0003]-[0021]段, 附图1	1															
A	CN 103219933 A (常州信息职业技术学院) 2013年 7月 24日 (2013 - 07 - 24) 全文	2-8															
A	CN 101984554 A (东元总合科技杭州有限公司) 2011年 3月 9日 (2011 - 03 - 09) 全文	1-8															
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																	
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																	
国际检索实际完成的日期 2019年 12月 18日		国际检索报告邮寄日期 2020年 1月 31日															
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		授权官员 王敏希 电话号码 (86-512) 88995701															

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/105364

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109995298	A	2019年 7月 9日	无	
CN	103219933	A	2013年 7月 24日	CN	103219933 B 2015年 8月 19日
CN	101984554	A	2011年 3月 9日	CN	101984554 B 2013年 1月 2日