

(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

(43) 国际公布日
2021 年 5 月 6 日 (06.05.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/081968 A1

(51) 国际专利分类号:
H02P 21/26 (2016.01) *H02P 25/024* (2016.01)
H02P 21/24 (2016.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/114919

(22) 国际申请日: 2019 年 11 月 1 日 (01.11.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201911028408.9 2019 年 10 月 28 日 (28.10.2019) 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)。

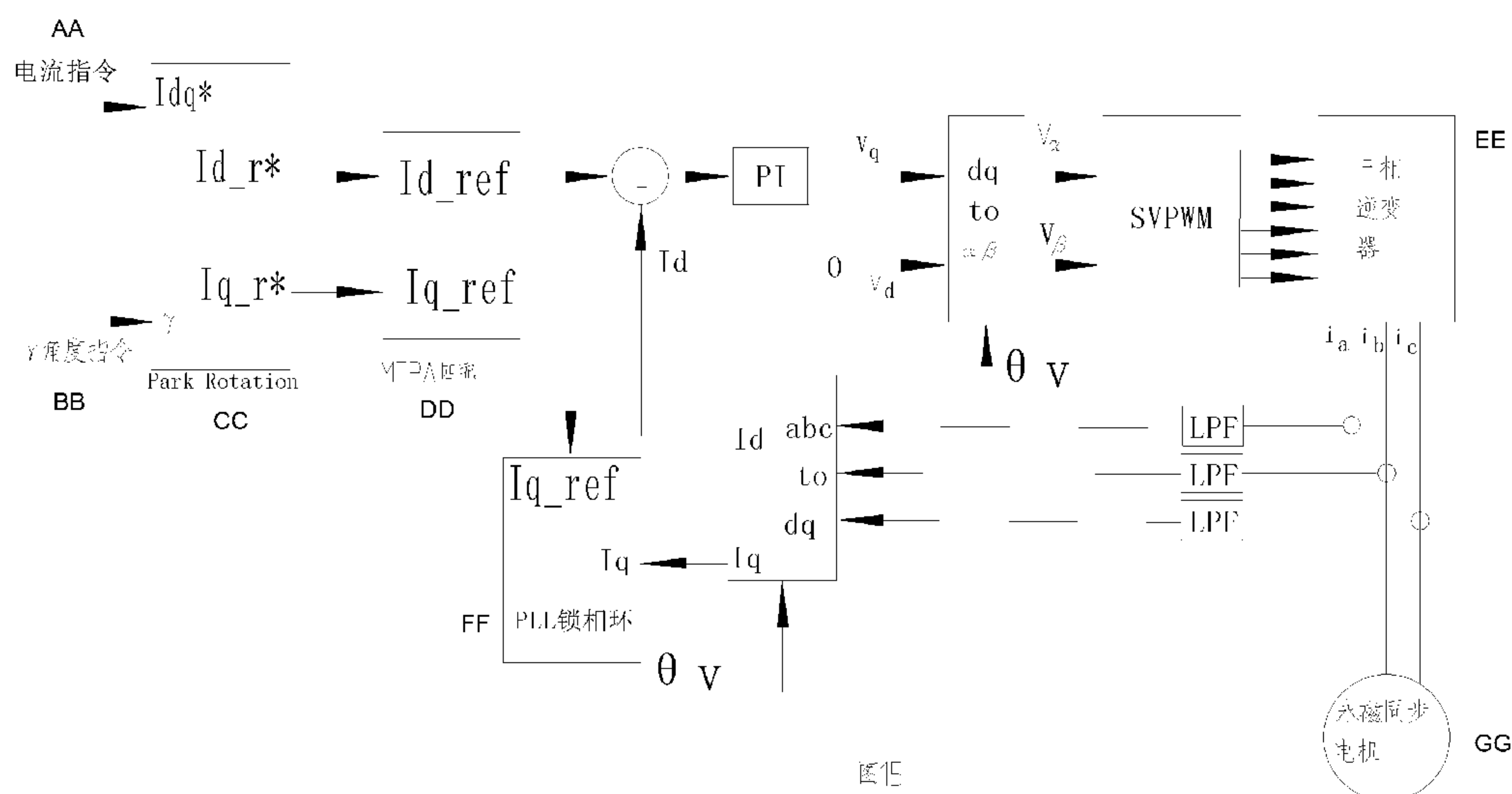
(72) 发明人: 刘宁(LIU, Ning); 中国广东省中山市西
区沙朗第三工业区, Guangdong 528400 (CN)。
郭伟(GUO, Wei); 中国广东省中山市西区沙
朗第三工业区, Guangdong 528400 (CN)。 杨妍
(YANG, Yan); 中国广东省中山市西区沙朗第
三工业区, Guangdong 528400 (CN)。

(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,

(54) Title: PARAMETERLESS POSITION-SENSORLESS PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR CONTROL METHOD BASED ON MTPA

(54) 发明名称: 基于MTPA无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法



AA Current instruction
BB γ angle instruction
CC Park Rotation
DD MTPA matching
EE Three-phase inverter
FF Phase-Locked Loop (PLL)
GG Permanent magnet synchronous motor

(57) Abstract: A parameterless position-sensorless permanent magnet synchronous motor control method based on MTPA. The control method comprises a current control mode and comprises steps: step 1, receiving a given current I_{dq}^* and a γ angle inputted by a user, and calculating $I_{d\_r}^*$ and $I_{q\_r}^*$; step 2, looking up a corresponding α angle in an MTPA data table according to the $I_{d\_r}^*$ and the $I_{q\_r}^*$; step 3, calculating I_{d_Ref} and I_{q_Ref} by utilizing the α angle, the $I_{d\_r}^*$ and the $I_{q\_r}^*$; and step 4, obtaining $\theta(v)$ by inputting the current I_{q_Ref} and a feedback current I_q of real-time operation of a motor into a Phase-Locked Loop (PLL), and obtaining V_q by means of PI

[见续页]

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, 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))。

processing of the current Id_Ref and a feedback current Id of real-time operation of the motor. Because $V_d=0$, $V_{dq}=V_q$ in an MTPA mode, V_α and V_β can be obtained by using θ_v and V_{dq} , and current control can be achieved. According to the method, an algorithm is simplified, the operation is simple, the occupation of chip resources is reduced, the cost is reduced, and a bottleneck problem of high dependence on a motor resistance R_s , inductance L_q , L_q and magnetic flux λ_m is solved.

(57) 摘要：一种基于MTPA无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其含有一种电流控制模式，包括步骤1：接收用户输入给定电流 I_{dq}^* 和 γ 角，计算出 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ ；步骤2：根据 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 在MTPA数据表查找对应的 α 角；步骤3：利用 α 角、 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 计算出 I_{d_Ref} 和 I_{q_Ref} ；步骤4：通过对电流 I_{q_Ref} 和电机实时运行的反馈电流 I_q 输入到PLL锁相环中获取 θ_v ，利用对电流 I_{d_Ref} 和电机实时运行的反馈电流 I_d 的PI处理获取 V_q ，因为在MTPA模式下， $V_d=0$ ， $V_{dq}=V_q$ ，利用 θ_v 和 V_{dq} 可以获取 V_α 和 V_β ，从而实现对电流的控制，该方法算法精简，运算简单，减少芯片资源占用，降低成本，解决了在对电机电阻 R_s 、电感 L_q 、 L_q 和磁通 λ_m 有高度依赖性的的瓶颈问题。

基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法

技术领域:

本发明涉及基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法。

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,一般有恒力矩控制模式、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 公开了无位置传感器的 3 相同步电机电机矢量控制器,只公开了电流力矩控制模式,进行恒力矩控制。

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,一般恒力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。

无位置传感器矢量控制永磁同步电机的控制方法最常规的 FOC 理论,大多都是建立在转子坐标系(rotor frame)上的。当转子位置未知时,无位置传感器算法就会被用来估算转子位置,从而 FOC 理论可以继续沿用。估算转子位置采用理论与电机相关参数,数学模型复杂,运算耗时复杂,占用大量的控制芯片(微处理器 MCU)资源,对微处理器 MCU 要求较高,成本也高。另外,FOC 理论对电机参数:电机电阻 R_s 、电感 L_q 、 L_d 和磁通 λ_m 有高度依赖性,造成方案适应范围较窄。

发明内容:

本发明的目的是提供基于MTPA无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，解决现有技术中常规FOC理论估算转子位置采用理论与电机相关参数密切相关，数学模型复杂，运算耗时复杂，占用大量的控制芯片资源，对微处理器MCU要求较高，成本也高的技术问题。

本发明的目的是通过以下的技术方案予以实现的。

基于MTPA无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其特征在于：它含有一种电流控制模式，包括如下步骤：

步骤1：接收用户输入给定电流 I_{dq}^* 和 γ 角， γ 角是电流矢量 I_{dq}^* 与 q 轴的夹角，计算出 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ ，所述的 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 是电流矢量 I_{dq}^* 投影在转子旋转坐标系 dq 中 d 轴的电流值和 q 轴的电流值，给定电流 I_{dq}^* 和 γ 角是符合MTPA模式的数据；

步骤2：根据 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 在MTPA数据表查找对应的 α 角，所述的 α 角是转子坐标系 dq 与电压坐标系 $VdVq$ 之间的夹角，所述的MTPA数据表是指最大力矩每安培的模式下获得的数据；

步骤3：利用 α 角、 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 计算出 I_{d_Ref} 和 I_{q_Ref} ， I_{d_Ref} 和 I_{q_Ref} 是电流矢量 I_{dq}^* 在电压坐标系 $VdVq$ 中的投影；

步骤4：通过对电流 I_{q_Ref} 和电机实时运行的反馈电流 I_q 输入到PLL锁相环中获取 θ_v ， θ_v 是电压矢量与静止坐标系 $\alpha\beta$ 的夹角，利用对电流 I_{d_Ref} 和电机实时运行的反馈电流 I_d 的PI处理获取 V_q ，因为在MTPA模式下， $V_d=0$ ， $V_{dq}=V_q$ ，利用 θ_v 和 V_{dq} 可以获取 V_α 和 V_β ，从而实现对电流的控制。

上述所述的 I_{d_Ref} 和 I_{q_Ref} 是这样获得的：

$$Id\_ref = Id\_r^* \times \cos(\alpha) + Iq\_r^* \times \sin(\alpha)$$

$$Iq\_ref = -Id\_r^* \times \sin(\alpha) + Iq\_r^* \times \cos(\alpha) \quad。$$

上述所述的步骤 2 的 Id_r^* 和 Iq_r^* 是这样计算得到：

$$Id\_r^* = -Idq^* \times \sin(\gamma)$$

$$Iq\_r^* = Idq^* \times \cos(\gamma)。$$

上述所述的 MTPA 数据表是通过实验获取的数据或者通过理论计算获取的数据或者是通过计算机的有限元分析软件获取的数据。

上述所述的电流控制模式中，当电压值 V_q 大于或等于设定的阈值 V_{max} 时，PI 调节器进入饱和状态，其电压输出被限制在 V_{max} ， Id 不再受控，此状态即为弱磁控制方式。

基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其特征在于：它含有一种速度控制模式，包括如下步骤：

步骤 1：接收用户输入给定速度 spd 指令和 γ 角，使电压矢量 V_{dq} 的矢量角按给定速度 spd 旋转，获得 θ_v ， θ_v 是电压矢量与静止坐标系 $\alpha\beta$ 的夹角， γ 角是电流矢量 Idq 与 q 轴的夹角；

步骤 2：根据电机实时运行的反馈电流 Id 和 γ 角计算出 Id_r^* 和 Iq_r^* ，所述的 Id_r^* 和 Iq_r^* 是当前电流矢量 Idq 在转子旋转坐标系 dq 中 d 轴的电流值和 q 轴的电流值， Id_r^* 和 Iq_r^* 是符合 MTPA 模式的数据，利用 Id_r^* 和 Iq_r^* 在 MTPA 数据表查找对应的 β 角， β 是在 MTPA 模式下电压矢量 V_{dq} 与电流矢量 Idq 的夹角，使电流矢量 Idq 与 V_d 轴重合获取角度 θ_i ；

步骤 3：获得 $\theta_{iv} = \theta_v - \theta_i$ ，利用对角度 β 和 θ_{iv} 的 PI 处理获取电压

V_q ，因为在 MTPA 模式下， $V_d=0$ ， $V_{dq}=V_q$ ，利用 θ_v 和 V_{dq} 可以获取 V_α 和 V_β ，从而实现对转速的控制。

上述所述的 MTPA 数据表是通过实验获取的数据或者通过理论计算获取的数据或者是通过计算机的有限元分析软件获取的数据。

上述所述的步骤 2 是将电机实时运行的反馈电流 I_q 作为 PLL 锁相环一个输入，将 PLL 锁相环的另一个输入 I_q^* 设置为 0， I_q^* 是电流矢量 I_{dq} 在 V_dV_q 坐标系下 V_q 轴的投影，PLL 锁相环输出角度 θ_i ， θ_i 使 $I_q^*=0$ 是 PLL 锁相环解析 I_α ， I_β 所产生的角度。

上述所述的 θ_v 是这样获得：

$$\theta_v = \int spd \times (pole\_pair \times 360 \times \Delta t \div 60) \cdot dt$$

其中： spd 是速度值， $Pole\_pair$ 为电机极对数， Δt 是时间变量。

在速度控制模式中，当电压值 V_q 大于或等于设定的阈值 V_{max} 时，PI 调节器进入饱和状态，其输出被限制在 V_{max} ，自动转换入弱磁控制方式。

本发明的与现有技术相比具有的有益效果是：

1) 本发明的基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法不再通过用磁通观测器来解析转子位置，从而大大降低了 CPU 的计算时间，无位置电机控制变得更加简捷直观，电机的电流和速度控制模式同时由两路解耦的 PI 调节器完成，控制的稳定性和动态响应均优于多级坎套式控制回路；

2) 本发明在电流和速度控制模式中，电机的优化是使其电流沿可标定的 MTPA 轨迹运行。电机具有满载启动功能，其运行区间包括从无 BEMF 至弱磁控制，功能完善。

3) 本发明基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其

PLSL-MTPA 数学模型不再以单一的转子坐标系为前提，该算法将电机电流矢量同时投影在电流和电压坐标系上，以解析矢量夹角的方式完成无位置控制，数学模型简单，算法简单，运算简单，不占用大量的控制芯片资源，对微处理器 MCU 要求不高，有利于降低成本。

4) 基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其 PLSL-MTPA 数学模型是一种无需电机参数的无位置传感器的优化电机控制技术，该技术解决了在对电机实行对无位置和优化控制中，对电机电阻 R_s 、电感 L_q 、 L_d 和磁通 λ_m 有高度依赖性的瓶颈问题。

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 FOC 控制方框图。

图 2 是本发明永磁同步电机的立体图；

图 3 是本发明永磁同步电机的电机控制器的立体图；

图 4 是本发明永磁同步电机的剖视图；

图 5 是本发明永磁同步电机的电机控制器的原理方框图；

图 6 是图 5 对应的电路图；

图 7 是三相永磁同步电机的静止坐标系 ABC 的示意图；

图 8 是三相永磁同步电机的静止的正交坐标系 $\alpha\beta$ 的示意图；

图 9 是三相永磁同步电机矢量控制的各坐标系关系图；

图 10 是本发明的正交坐标系 $\alpha\beta$ 与转子坐标系 dq 的关系图；

图 11 是本发明的 θ_v 、 θ_i ， θ_r 是三个同频率的时域变量图；

图 12 是本发明的标示电压矢量和电流矢量的角度关系图；

图 13 是本发明的 MTPA 模式下的原理示意图；

图 14 是本发明电流控制模式下的原理示意图；

图 15 是本发明的电流控制模式下的原理方框图；

图 16 是本发明的速度控制模式下的原理方框图；

图 17 是本发明的 α 角与 $I_{d\_r^*}$ 、 $I_{q\_r^*}$ 对应的分析数据图；

图 18 是本发明的 β 角与 $I_{d\_r^*}$ 、 $I_{q\_r^*}$ 对应的分析数据图。

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 2、图 3、图 4 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 5、图 6 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 $V_{dc\ bus}$ ，直流母线电压 $V_{dc\ bus}$ 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 Q1、Q2、Q3、Q4、Q5、Q6 组成，电子开关管 Q1、Q2、Q3、Q4、Q5、Q6 的控制端分别由微处理器输出的 6 路 PWM 信号（P1、P2、P3、P4、P5、P6）控制。

如图 7 所示，三相电机电流为 I_a 、 I_b 、 I_c 。在时域中有 120 度的相位角，

一般称为静止坐标系。这三个时域电流量可以简化为两个正交的电流量 I_α 、 I_β ，如图 8 所示。由三角矢量图来描述，见图 9 所示。其数学关系式为：

$$I_\alpha = \frac{2}{3}(I_a) - \frac{1}{3}(I_b - I_c)$$

$$I_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}}(I_b - I_c)$$

----- (公式 1)

这就是常用的 克拉克变换 (Clarke Transformation)， I_α, I_β 是随时间变化的正旋电流。如果我们站在一个同频率的旋转平台去观测 I_α, I_β ，引入转子旋转坐标系 dq ，其正旋特性就会被消除，只由相位特性得到保留。

建立这个旋转平台就是常用的 PARK 变换 (Park Transformation:)。

$$I_d = I_\alpha * \cos(\theta) + I_\beta * \sin(\theta)$$

$$I_q = I_\beta * \cos(\theta) - I_\alpha * \sin(\theta)$$

----- (公式 2)

如图 10 所示，在 PARK 变换 中我们引入了变量 θ 。 θ 即为我们观测 I_α, I_β 的观测方位角。当然从不同的观测方位去解析 I_α, I_β ，其投影在不同的旋转平台（也就是坐标系）上的投影是不同的。一但选好了一个观测角，Park 变换就将正旋 I_α, I_β 变成直流 I_d, I_q 。在无位置传感器的永磁同步电机中，该如何选择 θ 角成为最重要的问题，在电机控制中通常把转子磁场的北极定位 0 度。转子转一圈为 360 度，转子位置与极对数的关系如下：

$\theta_r = \text{Pole\_pair} \times \theta_0$ ，其中 θ_0 为转子机械角度， Pole_pair 为电机极对数。

在绝大多数无位置传感器的永磁同步电机控制中，其转子机械角度当然是未知的。算法的中心任务就是估算 θ_r 。一旦估算出 θ_r ，电机的矢量控制算法就立即可实现。但传统的 FOC 理论的估算 θ_r 的算法极为复杂，运算时间长，数学模型复杂，高度依赖电机的参数。

本发明基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法【简称 PLSL-MTPA 算法 (parameterless sensorless --MTPA)】，在 PLSL-MTPA 中我们用另外的方法来对 I_α ， I_β 进行解析。也就是说用不同的 θ 角来建立旋转平台来分析 I_α ， I_β 。在此，我们引入 $V_d V_q$ 电压坐标系并用了锁相环逻辑，锁相环的工作原理正好与 Park 变换相反。后者是通过用角度将正旋量变成直流量。锁相环则是通过锁定直流量其中的一个，找出建立旋转平台的 θ 角来。

本发明引入 θ_v ， θ_i 分别代表电压矢量和电流矢量与静止坐标系 ABC 的夹角，见图 12 所示。

在速度控制模式下 θ_v 是由开环速度积分得来的。它用来产生 V_α ， V_β ，继而生成为 V_a, V_b, V_c 。 θ_i 锁相环解析 I_α ， I_β 使 $I_q^*=0$ 所产生的角度。

根据上述公式 2 和 $(I_d, 0) = \text{Park 转换}(I_\alpha, I_\beta)$ by θ_i 满足：

$$I_d = I_\alpha \times \cos(\theta_i) + I_\beta \times \sin(\theta_i)$$

$$0 = I_\beta \times \cos(\theta_i) - I_\alpha \times \sin(\theta_i)$$

在同步电机的理论中， θ_v 、 θ_i ， θ_r 是三个同频率的时域变量。以 A 相为例，当 $V_a(t)$ 超前 $I_a(t)$ β 时，见图 12 所示：

$$V_a(t) = V_{abc} \times \cos(\theta_v) = V_{abc} \times \cos(\omega t + \beta)$$

$$I_a(t) = I_{abc} \times \cos(\theta_i) = I_{abc} \times \cos(\omega t)$$

其中 V_{abc} 是 A 相、B 相、C 相绕组合成的电压矢量， I_{abc} A 相、B 相、C 相绕组合成的电流矢量， ω 是角速度， t 是时间， β 是 A 相的电压矢量 $V_a(t)$ 与电流矢量 $I_a(t)$ 的夹角。

θ_v , θ_i , θ_r 三者间的关系为：

$$\beta = \theta_v - \theta_i \text{-----公式 3}$$

$$\theta_r = \theta_v - \alpha \text{-----公式 4}$$

θ_v , θ_i , θ_r 是电压电流在时域上的关系见图 11 所示, PLSL-MTPA 算法的核心就是依照上述公式 3 永远让 θ_v 和 θ_i 保持一个给定的 β 角——形成速度模式，或依照上述公式 4 将 I_α , I_β 在电压坐标系(即 V_dV_q 坐标系)上的投影满足 α 角——形成电流模式。因为 PLSL-MTPA 始终让 $V_d=0$, $V_{dq}=V_q$, 形成电压，电流和转子间的矢量图见图 13 所示，图 13 是简化的 PLSL-MTPA 矢量图。

在图 13 中，可以得到角度 $\alpha = \beta + \gamma$ ，其中，角度 α 是在 MTPA 模式下转子坐标系 dq 与电压坐标系 V_dV_q 之间的夹角，角度 β 是在 MTPA 模式下电压矢量 V_{dq} 与电流矢量 I_{dq} 的夹角， γ 是电流矢量 dq 与 q 轴的夹角。

在图 14、图 15 中，在电压坐标系- V_dV_q 坐标系中，始终让 $V_d=0$, $V_{dq}=V_q$ ，在电流控制模式中，将 I_α , I_β 的电流矢量 I_{dq} 在 q 轴上的投影与电流矢量 I_{dq} 在 V_dV_q 坐标系上的 V_q 轴的投影进行 PLL 锁相环处理就能获得 θ_v ，将 I_α , I_β 的电流矢量 I_{dq} 在 d 轴上的投影与电流矢量 I_{dq} 在 V_dV_q 坐标系上的 V_d 轴的投影进行 PI 处理获得 V_q ，由于 $V_d=0$, $V_{dq}=V_q$ ，那么利用 θ_v

和 $V_{dq}=V_q$ 就可将直流量转成正旋量 V_α , V_β 。

如图 14、图 16 所示,是本发明的 PLSL-MTPA 的另一种控制模式,即速度控制模式,其原理是:使电压矢量 V_{dq} 角度按给定速度指令 spd 旋转,即开环控制运行,

$$\theta_v = \int spd \times (pole\_pair \times 360 \times \Delta t \div 60) \cdot dt$$

其中 spd 是速度值, $Pole\_pair$ 为电机极对数, Δt 是时间变量;

PLL 锁相器使 I_{dq} 与 V_d 轴重合(即用 $I_q=0$)生成 θ_i , 得到角度差 $\theta_{iv} = \theta_v - \theta_i$

电压矢量 $V_{dq} = PI(\theta_{iv} - \beta)$, 由于获得 θ_v 和 V_{dq} 就可将正旋量变成直流量获得 V_α , V_β 。

上述两种控制模式的电流 PI 器利用角度或电流误差控制获得 V_{dq} , 其中:

速度模式:

$$\Delta = \theta_{iv} - \beta$$

电流模式:

$$\Delta = I_{d\_ref} - I_d$$

而电压矢量 $V_{dq} = PI(\Delta)$, V_{abc} 由 θ_v 和 V_{dq} 生成。

这两种模式的 θ_v 和 V_{dq} 的计算方式是不同的。

本发明的 PLSL-MTPA 静态满载起动: 用最大的电流 I_{dq_Max} 启动, 在低速时由于电机呈阻性状态, 电流和电压同相位, 这时电流 PI 控制器趋于最大电流饱和, I_{dq_Max} 用于驱动电机, 当转速开始上升, 反电动势也随之增强。这也导致电流电压差角 β 渐不为 0。从而使电流 PI 控制器进入正常工作范围, V_{dq} 和 I_{dq} 差角随实际负载变化, 电机电流也随之响应。起动能

力取决于目标转速，速度递增斜率，电流 PI 增益，及最大电流限制。

常规的 FOC 理论大多都是建立在转子坐标系 (rotor frame) 上的。当转子位置未知时，无位置传感器算法就会被用来估算转子位置，从而 FOC 理论可以继续沿用，本发明的 PLSL-MTPA 控制方法与常规 FOC 的不同点就在于前者从一开始就脱离了对转子坐标系的依赖性，转而采用了与电机参数无关的角度转换方案并对电流电压相位角进行调节，以实现电机的同步控制。该设计理念大大简化了无位置传感器电机控制过程。

本发明的 PLSL-MTPA 控制方法符合 4 种控制定律：

控制定律 1：

在同步运行条件下，在电流矢量和电压矢量之间维持可调控夹角 β ，可以实现对同步电机的全面控制。该 β 角也就是通常所称的功率因数角。

控制定律 2：

在同步运行条件下，同步电机的转子位置可以由电压矢量加一个可控夹角 α 来确定。该 α 角可能超前或滞后电压矢量。基于已给定的 α 角，对同步电机实施一个电压矢量，其同步条件可以持续，即同步电机可控。

控制定律 3：

单位电流最大力矩 MTPA 控制可以将电流指令转换成 α ， β 角度来完成。其 α ， β 角度的生成均遵循 MTPA 原理，并被控制定律 1 和控制定律 2 用于对同步电机的控制。

控制定律 4：

仅当电流控制指令沿 MTPA 轨迹，且沿用 MTPA 准则将其转换成 α ， β 角，由控制定律 2 估算的转子位置为实际电机转子位置。此时电机产生的力矩

为 MTPA 力矩。

控制定律 5:

当电机在小电流运行条件下，电压与转速的比值可近似为 BEMF。同步电机运行状态可以通过将该值与阈值的比较来确定。

PLSL-MTPA 的速度模式实际上是一个能带负载也能进出弱磁区的速度开环控制。除了简单可优化外，其转速和位置仅随指令变化。这种特性在拖动控制中有着广泛的应用前景。

具体实施例一:

如图 14、图 15 所示，本发明基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其特征在于：它含有一种电流控制模式，包括如下步骤：

步骤 1：接收用户输入给定电流 I_{dq}^* 和 γ 角， γ 角是电流矢量 I_{dq}^* 与 q 轴的夹角，计算出 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ ，所述的 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 是电流矢量 I_{dq}^* 在转子旋转坐标系 dq 中 d 轴的电流值和 q 轴的电流值，给定电流 I_{dq}^* 和 γ 角是符合 MTPA 模式的数据；

步骤 2：根据 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 在 MTPA 数据表查找对应的 α 角，所述的 α 角是转子坐标系 dq 与电压坐标系 $VdVq$ 之间的夹角，所述的 MTPA 数据表是指最大力矩每安培的模式下获得的数据；

步骤 3：利用 α 角、 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 计算出 I_{d_Ref} 和 I_{q_Ref} ， I_{d_Ref} 和 I_{q_Ref} 是电流矢量 I_{dq}^* 在电压坐标系 $VdVq$ 中 Vd 轴和 Vq 轴的投影；

步骤 4：通过对电流 I_{q_Ref} 和电机实时运行的反馈电流 I_q 输入到 PLL

锁相环中获取 θ_v , θ_v 是电压矢量与静止坐标系 $\alpha\beta$ 的夹角, 利用对电流 I_{d_Ref} 和电机实时运行的反馈电流 I_d 的 PI 处理获取 V_q , 因为在 MTPA 模式下, $V_d=0, V_{dq}=V_q$, 利用 θ_v 和 V_{dq} 可以获取 V_α 和 V_β , 从而实现对电流的控制。

上述的 I_{d_Ref} 和 I_{q_Ref} 是这样获得的:

$$I_{d\_ref} = I_{d\_r}^* \times \cos(\alpha) + I_{q\_r}^* \times \sin(\alpha)$$

$$I_{q\_ref} = -I_{d\_r}^* \times \sin(\alpha) + I_{q\_r}^* \times \cos(\alpha) \quad。$$

上述的步骤 2 的 $I_{d\_r}^*$ 和 $I_{q\_r}^*$ 是这样计算得到:

$$I_{d\_r}^* = -I_{dq}^* \times \sin(\gamma)$$

$$I_{q\_r}^* = I_{dq}^* \times \cos(\gamma)。$$

上述的电流控制模式中, 当电压值 V_q 大于或等于设定的阈值 V_{max} 时, PI 调节器进入饱和状态, 其电压输出被限制在 V_{max} , I_d 不再受控, 此状态即为弱磁控制方式。

上述的 MTPA 数据表是通过实验获取的数据或者通过理论计算获取的数据或者是通过计算机的有限元分析软件获取的数据。

实施例二:

如图 14、图 16 所示, 基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法, 其特征在于: 它含有一种速度控制模式, 包括如下步骤:

步骤 1: 接收用户输入给定速度 spd 指令和 γ 角, 使电压矢量 V_{dq} 的矢量角按给定速度 spd 旋转, 获得 θ_v , θ_v 是电压矢量与静止坐标系 $\alpha\beta$ 的

夹角， γ 角是电流矢量 I_{dq} 与 q 轴的夹角；

步骤 2：根据电机实时运行的反馈电流 I_d 和 γ 角计算出 I_{d_r*} 和 I_{q_r*} ，所述的 I_{d_r*} 和 I_{q_r*} 是当前电流矢量 I_{dq} 在转子旋转坐标系 dq 中 d 轴的电流值和 q 轴的电流值， I_{d_r*} 和 I_{q_r*} 是符合 MTPA 模式的数据，利用 I_{d_r*} 和 I_{q_r*} 在 MTPA 数据表查找对应的 β 角， β 是在 MTPA 模式下电压矢量 V_{dq} 与电流矢量 I_{dq} 的夹角，使电流矢量 I_{dq} 与 V_d 轴重合获取角度 θ_i ；

步骤 3：获得 $\theta_{iv} = \theta_v - \theta_i$ ，利用对角度 β 和 θ_{iv} 的 PI 处理获取电压 V_q ，因为在 MTPA 模式下， $V_d=0$ ， $V_{dq}=V_q$ ，利用 θ_v 和 V_{dq} 可以获取 V_α 和 V_β ，从而实现对转速的控制。

上述的 MTPA 数据表是通过实验获取的数据或者通过理论计算获取的数据或者是通过计算机的有限元分析软件获取的数据。

上述的步骤 2 是将电机实时运行的反馈电流 I_q 作为 PLL 锁相环一个输入，将 PLL 锁相环的另一个输入 I_{q*} 设置为 0， I_{q*} 是电流矢量 I_{dq} 在 V_dV_q 坐标系下 V_q 轴的投影，PLL 锁相环输出角度 θ_i ， θ_i 使 $I_{q*} = 0$ 是 PLL 锁相环解析 I_α ， I_β 所产生的角度。

上述的 θ_v 是这样获得：

$$\theta_v = \int spd \times (pole\_pair \times 360 \times \Delta t \div 60) \cdot dt$$

其中： spd 是速度值， $Pole\_pair$ 为电机极对数， Δt 是时间变量。

上述在速度控制模式中，当电压值 V_q 大于或等于设定的阈值 V_{max} 时，PI 调节器进入饱和状态，其输出被限制在 V_{max} ，自动转换入弱磁控制方式。

MTPA 数据表或者称为 MTPA 查找表 (MTPA_Angle_Lookup)，主要目的是

获得图 13 中的 α 角和 β 角，见关系式如下：

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = MTPA\_Angle\_Lookup(I_{d\_r^*}, I_{q\_r^*})$$

即通过 Id_r*和 Iq_r*利用 MTPA 数据表查表获取 α 角和 β 角。

MTPA 数据表可以通过实验来获得，实测电机为 1/3 HP，在电机试验室利用测功机进行测量，电流夹角 γ 测试步骤，设定电机转速 = 1450 rpm ，设定测功机力矩间隔：10，15，20，26，31 oz-in 搜索最高系统效率或最大 MTPA_Index，对每个测功机力矩挡位，记录 Idq 和 γ 角值:验证测试结果，从五组测试数据中针对电机转速 = 1450 rpm ，最大输出力矩的一组数据作为 MTPA 数据表一项数据，见表 1 所示，在最大输出力矩的一组数据中有 γ 角、Id_r*、Iq_r*、α 角、β 角等数据。同理，我们也可以测量转速在

转速	力矩	γ 角	Id_r*	Iq_r*	α 角	β 角
1450rpm	10. 46	1728	500	1652	3391	13356
1450rpm	15. 98	2640	1240	2344	6592	11308
1450rpm	20. 94	3500	1900	2964	8640	10456
1450rpm	26. 46	4483	2608	3672	10177	9988
1450rpm	31. 64	5498	3356	4388	11328	9604
1400rpm	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o
1400rpm	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o
1400rpm	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o
1400rpm	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o
1400rpm	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o	o o o

表 1

1400 rpm、 1350 rpm、 1300 rpm... 等不同转速对应的最大输出力矩的一组数据，并写入到 MTPA 数据表中，以便查找。表 1 是针对转速控制模式。

对于电流控制模式，其测试的方法是大致相同，MTPA 数据表可以通过实验来获得，实测电机为 1/3 HP，在电机试验室利用测功机进行测量，电流夹角 γ 测试步骤，设定电流 $I_{dq} = 3.2A$ ，设定测功机力矩间隔：12, 18, 24, 28, 33 oz-in 搜索最高系统效率或最大 MTPA_Index，对每个测功机力矩挡位，记录 I_{dq} 和 γ 角值：验证测试结果，从五组测试数据中针对 $I_{dq} = 3.2A$ ，最大输出力矩的一组数据作为 MTPA 数据表一项数据，见表 2 所示。

电流	力矩	γ 角	I_{d_r*}	I_{q_r*}	α 角	β 角
3.2A	12	1455	650	2253	2351	13450
3.2A	18	2228	1440	2698	4323	12011
3.2A	24	3400	1800	3298	6543	10244
3.2A	28	4578	2708	3789	8678	951
3.2A	33	5677	3676	4565	10233	8867
ooo	ooo	ooo	ooo	ooo	ooo	ooo
ooo	ooo	ooo	ooo	ooo	ooo	ooo
ooo	ooo	ooo	ooo	ooo	ooo	ooo
ooo	ooo	ooo	ooo	ooo	ooo	ooo

表 2

另外，对于 MTPA 数据表也可以通过计算机的有限元分析软件获取，见图 17 和图 18 所示，通过计算机有限元分析获取相关的数据，图中通过坐标 $I_{d_r^*}$ 的值和坐标 $I_{q_r^*}$ 的值获取 α 角或 β 角。

当然，对于 MTPA 数据表的数据也可以通过理论计算获取数据。

本发明的基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法不再通过用磁通观测器来解析转子位置，从而大大降低了 CPU 的计算时间，无位置电机控制变得更加简捷直观，电机的电流和速度控制模式同时由两路解耦的 PI 调节器完成，控制的稳定性和动态响应均优于多级坎套式控制回路；本发明在电流和速度控制模式中，电机的优化是使其电流沿可标定的 MTPA 轨迹运行。电机具有满载启动功能，其运行区间包括从无 BEMF 至弱磁控制，功能完善；本发明基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其 PLSL-MTPA 数学模型不再以单一的转子坐标系为前提，该算法将电机电流矢量同时投影在电流和电压坐标系上，以解析矢量夹角的方式完成无位置控制，数学模型简单，算法简单，运算简单，不占用大量的控制芯片资源，对微处理器 MCU 要求不高，有利于降低成本；基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其 PLSL-MTPA 数学模型是一种无需电机参数的无位置传感器的优化电机控制技术，该技术解决了在对电机实行对无位置和优化控制中，对电机电阻 R_s 、电感 L_q 、 L_d 和磁通 λ_m 有高度依赖性的瓶颈问题。

关于本发明基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法中的弱磁控制与传统的 FOC 控制理论的弱磁控制的对比：

传统的 FOC 控制理论的弱磁控制是：对同步永磁电机的控制，多数是在两个区间内进行的：MTPA 区间和弱磁区间。随着转速的增高在弱磁区间之

外还会有最大力矩或最大电流区间，但在实际中很少用到。电机的 FOC 矢量控制就是对电流 I_d , I_q 的控制。这是一个具有两维自由度的控制手段。如何分别控制 I_d 和 I_q 从而让电机工作在最优状态，于是就有了 MTPA 理论。当进入弱磁区后， I_d 方向的自由度被锁定，仅剩下 I_q 正比于力矩输出。电机控制再无需优化。 I_d 和弱磁的关系：应为永磁体是嵌在转子上的，转子磁场在电机旋转时会感应出一个与定子电压相抵消的反向电动势 BEMF，而反向电动势 BEMF 是与转速成正比的。当转速高到一定程度时，BEMF 会大过定子电压，造成电机无法工作在电动状态。所谓弱磁控制就是当反向电动势 BEMF 高到一定程度时，让 I_d 继续往负方向增加，以此产生一个磁场专门削弱转子磁场。 I_d 的大小取决于转速和电机负载，但最终目标是让反向电动势 BEMF 小于最大定子电压。

经典的弱磁控制理论：电机电磁方程：

$$\begin{aligned} v_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} = r_s i_{ds} - \omega_r L_q i_{qs} \\ v_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} = r_s i_{qs} + \omega_r (L_d i_{ds} + \lambda_{PM}) \end{aligned}$$

由于受到电压限制， I_d , I_q 满足椭圆关系：

$$\left(\frac{V_0}{\omega_r L_q} \right)^2 = i_{qs}^2 + \left(\frac{L_d}{L_q} \right)^2 \left(i_{ds} + \frac{\lambda_{PM}}{L_d} \right)^2, \quad V_0 = \frac{2V_{DC}}{\pi}$$

在弱磁条件下， I_q 的解是唯一的：

$$i_{qs}^{Max} = \sqrt{\left(\frac{V_0}{\omega_r L_q} \right)^2 - \left(\frac{L_d}{L_q} \right)^2 \left(i_{ds} + \frac{\lambda_{PM}}{L_d} \right)^2}$$

一旦有了 I_d , I_q 就可由上式求出。

从实际测试模拟图象上看, I_d , I_q 在高速运行时还受到电压椭圆的限制, 低速时可沿 MTPA 轨迹运行。 I_d 的求解不是由公式给出的, 通常是由控制逻辑 (如 PI 调节器, 查表法等)。总之, 弱磁的核心就是找到 I_d 使电压不超调, 即而算出 I_q , 满足 FOC 理论, 完成电流控制。

关于本发明基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法, 即 PLPS-MTPA 控制方法是在弱磁控制上有很大不同。弱磁控制不再是以找 I_d 为核心, 而是直接控制电压, 只要把 V_{dq} ($V_{dq}=V_q$, $V_d=0$) 限制在直流母线电压 V_{dc_Bus} 以内, 由此而产生的 I_d 完全由逆变器吸收, 继续控制电流电压相位角产生所需力矩。该策略完全满足弱磁理论, 但实现手段大大简化, 而且控制更平稳。

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、基于MTPA无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法,其特征在于:
它含有一种电流控制模式,包括如下步骤:

步骤 1: 接收用户输入给定电流 I_{dq}^* 和 γ 角, γ 角是电流矢量 I_{dq}^* 与 q 轴的夹角, 计算出 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$, 所述的 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 是电流矢量 I_{dq}^* 在转子旋转坐标系 dq 中 d 轴的电流值和 q 轴的电流值, 给定电流 I_{dq}^* 和 γ 角是符合 MTPA 模式的数据;

步骤 2: 根据 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 在 MTPA 数据表查找对应的 α 角, 所述的 α 角是转子坐标系 dq 与电压坐标系 $VdVq$ 之间的夹角, 所述的 MTPA 数据表是指最大力矩每安培的模式下获得的数据;

步骤 3: 利用 α 角、 $I_{d_r}^*$ 和 $I_{q_r}^*$ 计算出 I_{d_ref} 和 I_{q_ref} , I_{d_ref} 和 I_{q_ref} 是电流矢量 I_{dq}^* 在电压坐标系 $VdVq$ 中 Vd 轴和 Vq 轴的投影;

步骤 4: 通过对电流 I_{q_ref} 和电机实时运行的反馈电流 I_q 输入到 PLL 锁相环中获取 θ_v , θ_v 是电压矢量与静止坐标系 $\alpha\beta$ 的夹角; 利用对电流 I_{d_ref} 和电机实时运行的反馈电流 I_d 的 PI 处理获取 V_q , 因为在 MTPA 模式下, $V_d=0$, $V_{dq}=V_q$, 利用 θ_v 和 V_{dq} 可以获取 V_α 和 V_β , 从而实现对电流的控制。

2、根据权利要求 1 所述的基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法, 其特征在于: I_{d_ref} 和 I_{q_ref} 是这样获得的:

$$\begin{aligned} I_{d\_ref} &= I_{d_r}^* \times \cos(\alpha) + I_{q_r}^* \times \sin(\alpha) \\ I_{q\_ref} &= -I_{d_r}^* \times \sin(\alpha) + I_{q_r}^* \times \cos(\alpha) \end{aligned} \quad 。$$

3、根据权利要求 1 或 2 所述的基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步

电机控制方法，其特征在于：步骤 1 的 $I_{d\_r}^*$ 和 $I_{q\_r}^*$ 是这样计算得到：

$$I_{d\_r}^* = -I_{dq}^* \times \sin(\gamma)$$

$$I_{q\_r}^* = I_{dq}^* \times \cos(\gamma)。$$

4、根据权利要求 1 或 2 或 3 所述的基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其特征在于：MTPA 数据表是通过实验获取的数据或者通过理论计算获取的数据或者是通过计算机的有限元分析软件获取的数据。

5、根据权利要求 4 所述的基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其特征在于：电流控制模式中，当电压值 V_q 大于或等于设定的阈值 V_{max} 时，PI 调节器进入饱和状态，其电压输出被限制在 V_{max} ， I_d 不再受控，此状态即为弱磁控制方式。

6、基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法，其特征在于：它含有一种速度控制模式，包括如下步骤：

步骤 1：接收用户输入给定速度 spd 指令和 γ 角，使电压矢量 V_{dq} 的矢量角按给定速度 spd 旋转，获得 θ_v ， θ_v 是电压矢量与静止坐标系 $\alpha\beta$ 的夹角， γ 角是电流矢量 I_{dq} 与 q 轴的夹角；

步骤 2：根据电机实时运行的反馈电流 I_d 和 γ 角计算出 $I_{d\_r}^*$ 和 $I_{q\_r}^*$ ，所述的 $I_{d\_r}^*$ 和 $I_{q\_r}^*$ 是当前电流矢量 I_{dq} 在转子旋转坐标系 dq 中 d 轴的电流值和 q 轴的电流值， $I_{d\_r}^*$ 和 $I_{q\_r}^*$ 是符合 MTPA 模式的数据，利用 $I_{d\_r}^*$ 和 $I_{q\_r}^*$ 在 MTPA 数据表查找对应的 β 角， β 是在 MTPA 模式下电压矢量 V_{dq} 与电流矢量 I_{dq} 的夹角；使电流矢量 I_{dq} 与 V_d 轴重合获取角度 θ_i ；

步骤 3: 获得 $\theta_{iv} = \theta_v - \theta_i$, 利用对角度 β 和 θ_{iv} 的 PI 处理获取电压 V_q , 因为在 MTPA 模式下, $V_d=0$, $V_{dq}=V_q$, 利用 θ_v 和 V_{dq} 可以获取 V_α 和 V_β , 从而实现对转速的控制。

7、根据权利要求 6 所述的基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法, 其特征在于: MTPA 数据表是通过实验获取的数据或者通过理论计算获取的数据或者是通过计算机的有限元分析软件获取的数据。

8、根据权利要求 7 所述的基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法, 其特征在于: 步骤 2 是将电机实时运行的反馈电流 I_q 作为 PLL 锁相环一个输入, 将 PLL 锁相环的另一个输入 I_q^* 设置为 0, I_q^* 是电流矢量 I_{dq} 在 V_dV_q 坐标系下 V_q 轴的投影, PLL 锁相环输出角度 θ_i , θ_i 使 $I_q^*=0$ 是 PLL 锁相环解析 I_α , I_β 所产生的角度。

9、根据权利要求 8 所述的基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法, 其特征在于: θ_v 是这样获得:

$$\theta_v = \int spd \times (pole\_pair \times 360 \times \Delta t \div 60) \cdot dt$$

其中: spd 是速度值, $Pole\_pair$ 为电机极对数, Δt 是时间变量。

10、根据权利要求 9 所述的基于 MTPA 无参数无位置传感的永磁同步电机控制方法, 其特征在于: 在速度控制模式中, 当电压值 V_q 大于或等于设定的阈值 V_{max} 时, PI 调节器进入饱和状态, 其输出被限制在 V_{max} , 自动转换入弱磁控制方式。

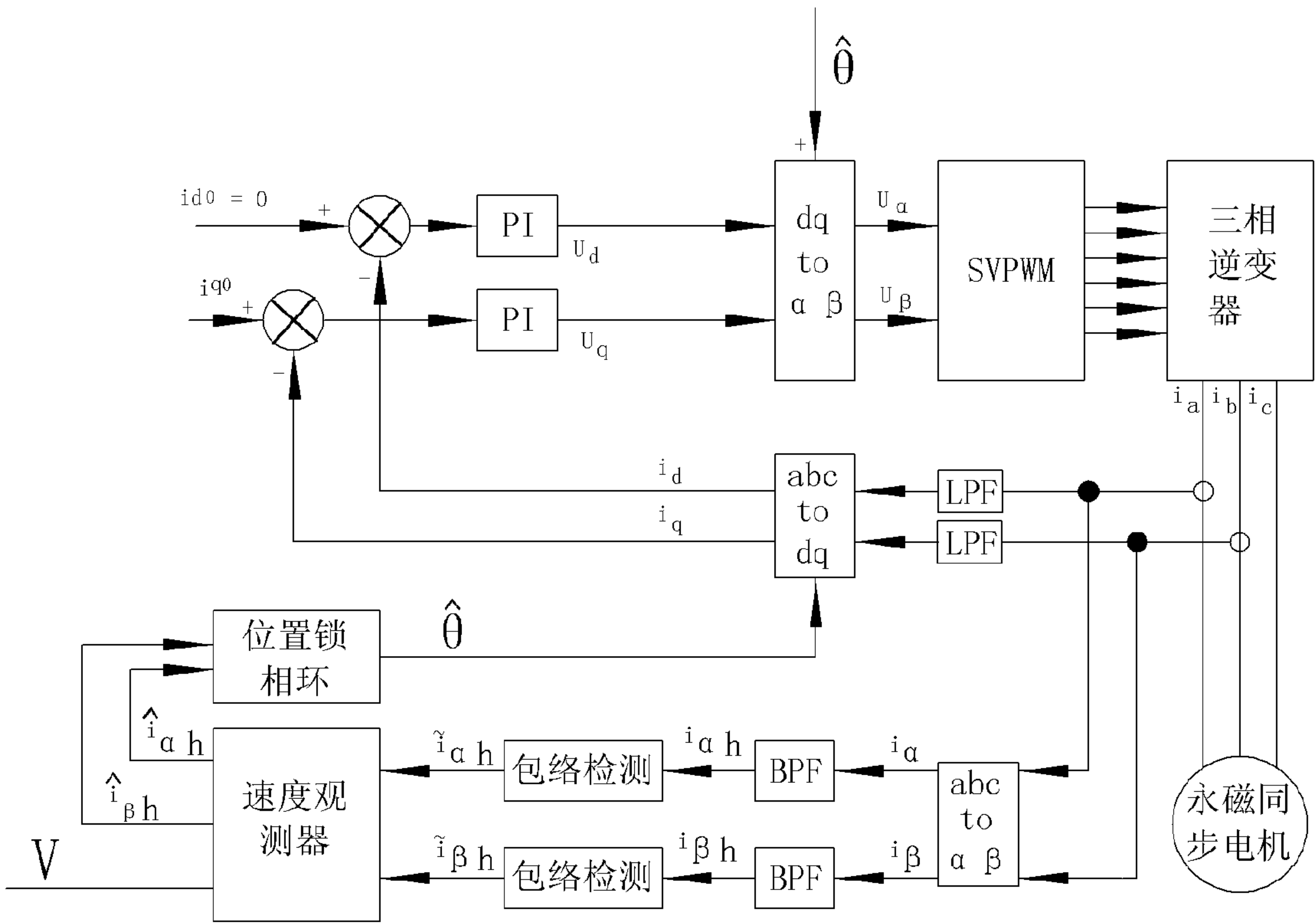


图 1

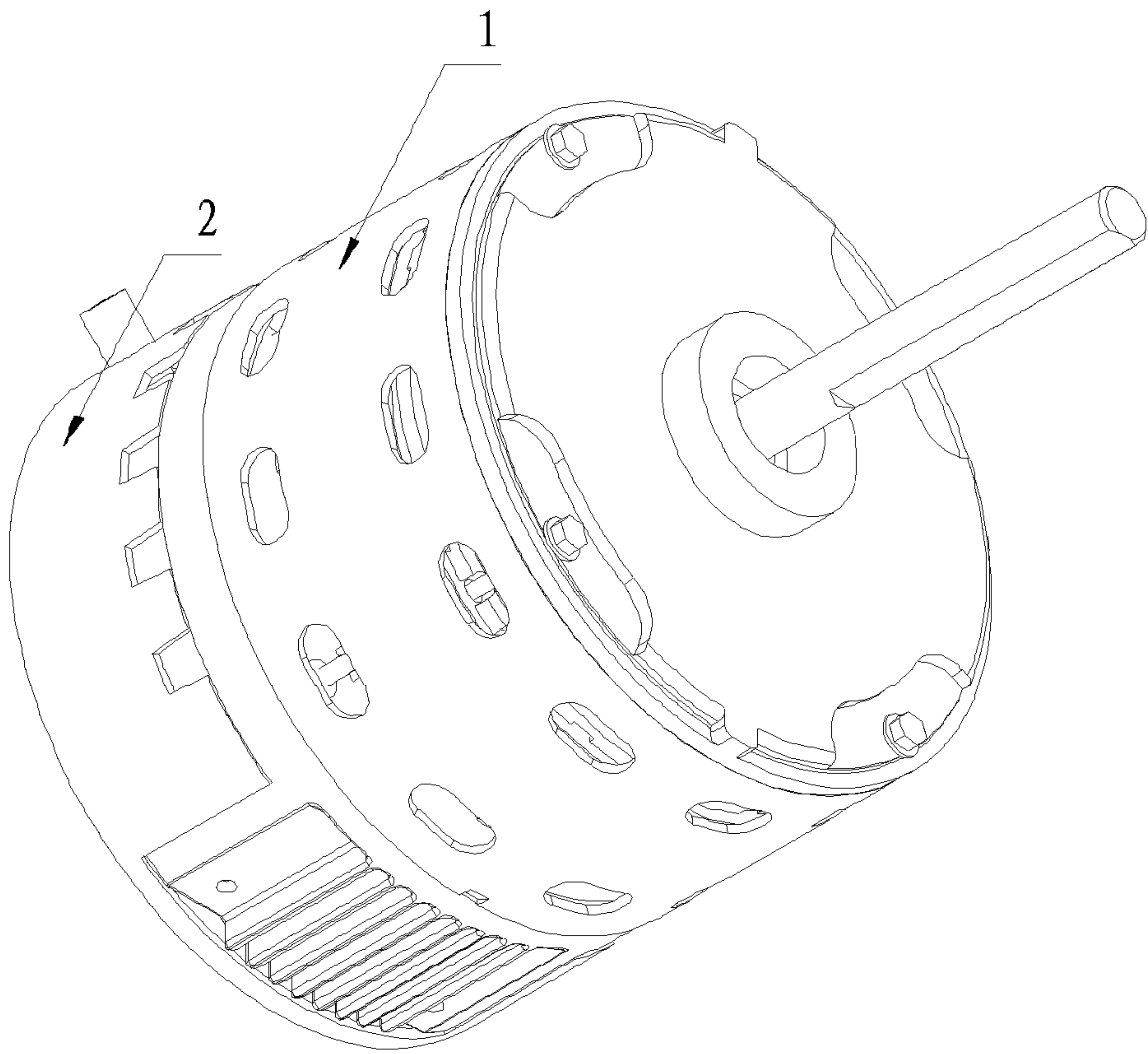


图 2

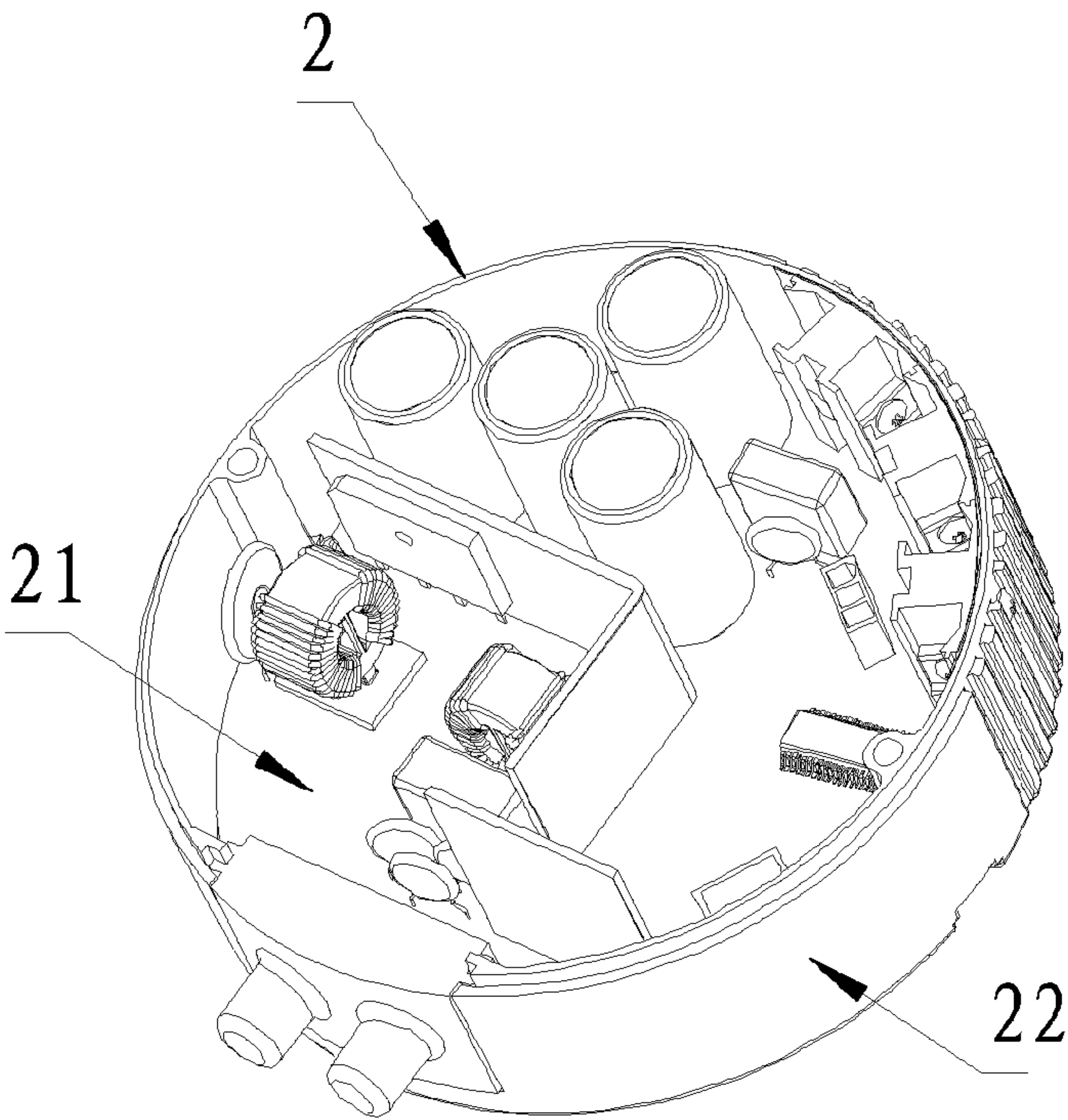


图 3

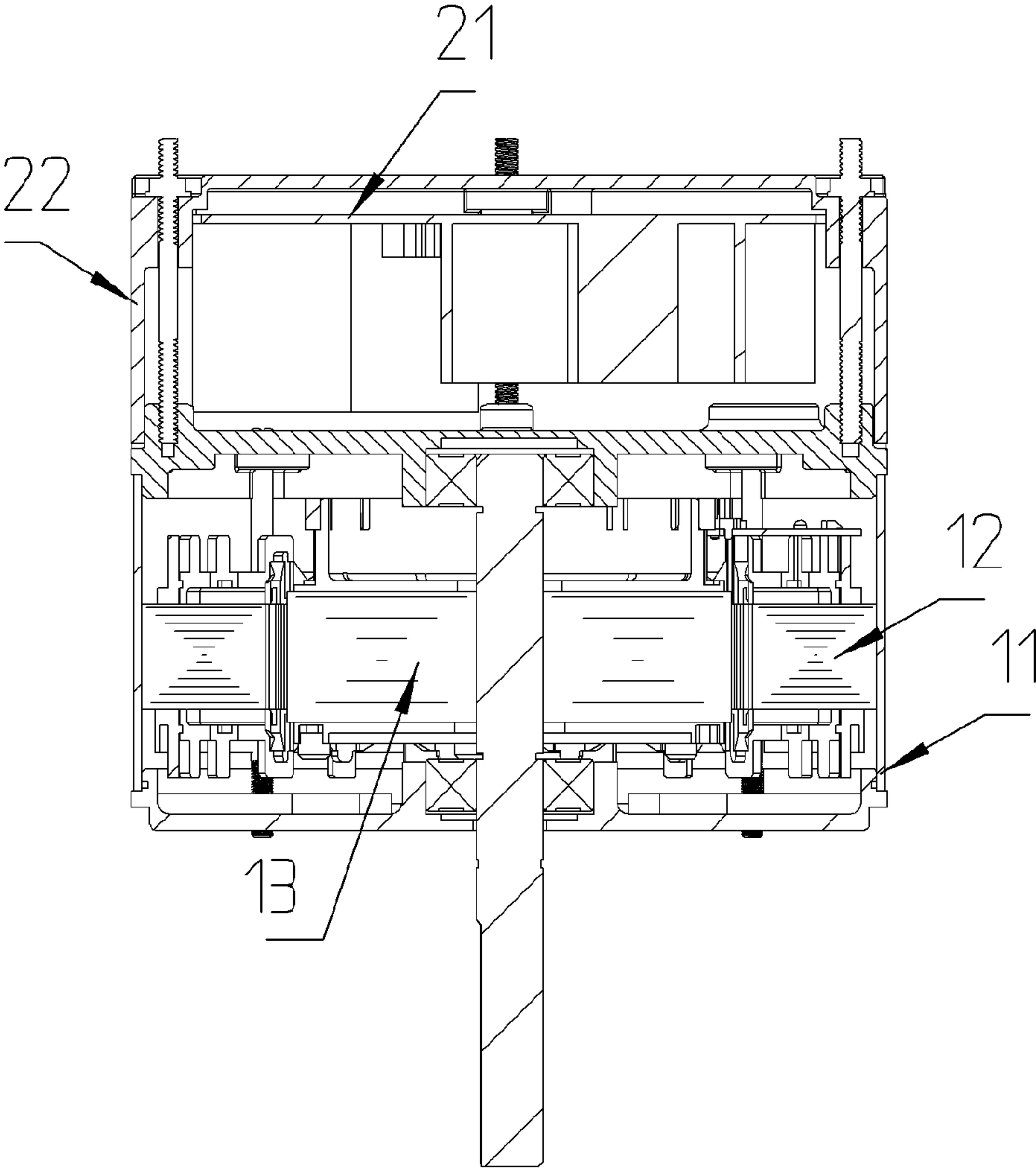


图 4

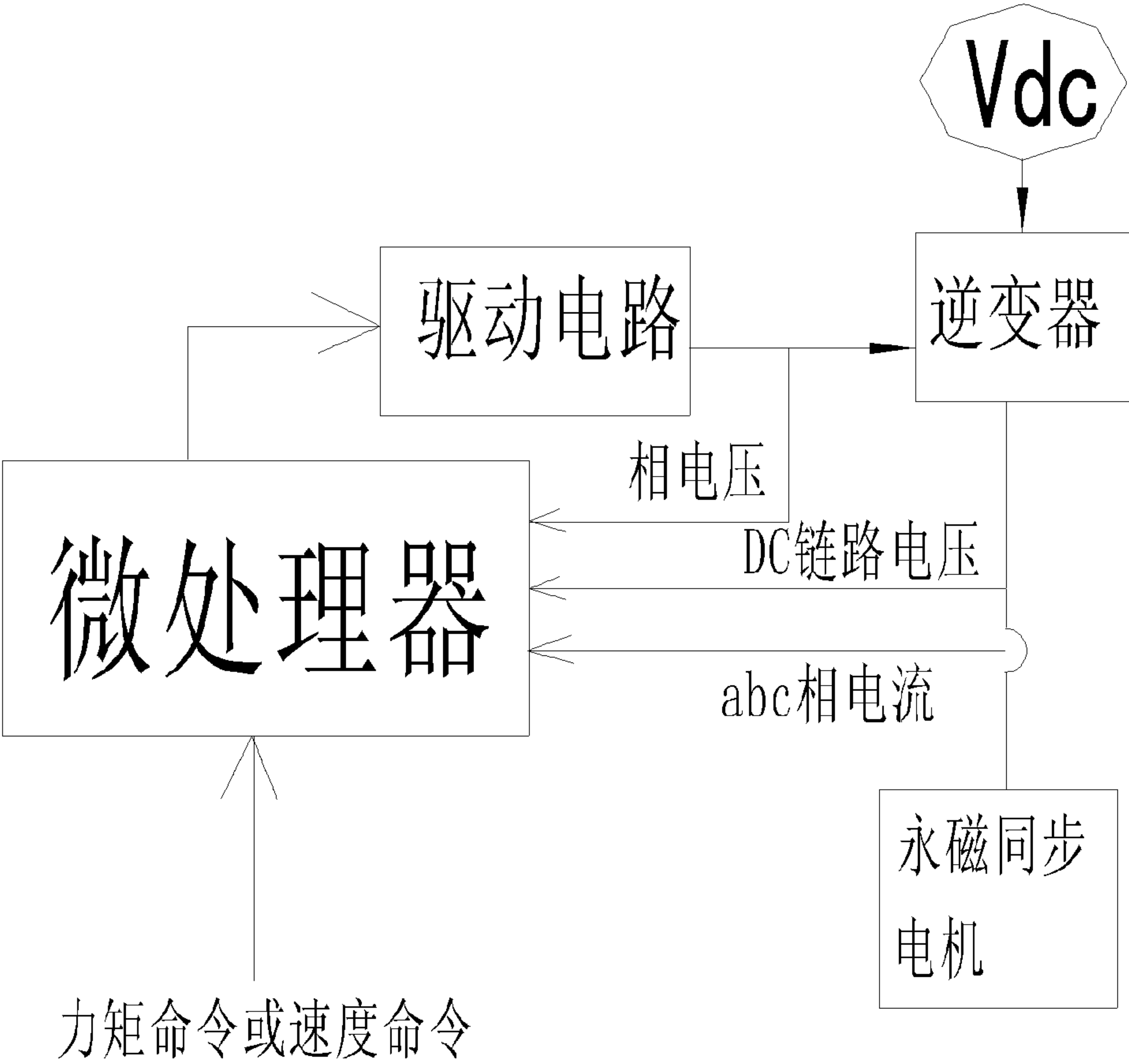


图 5

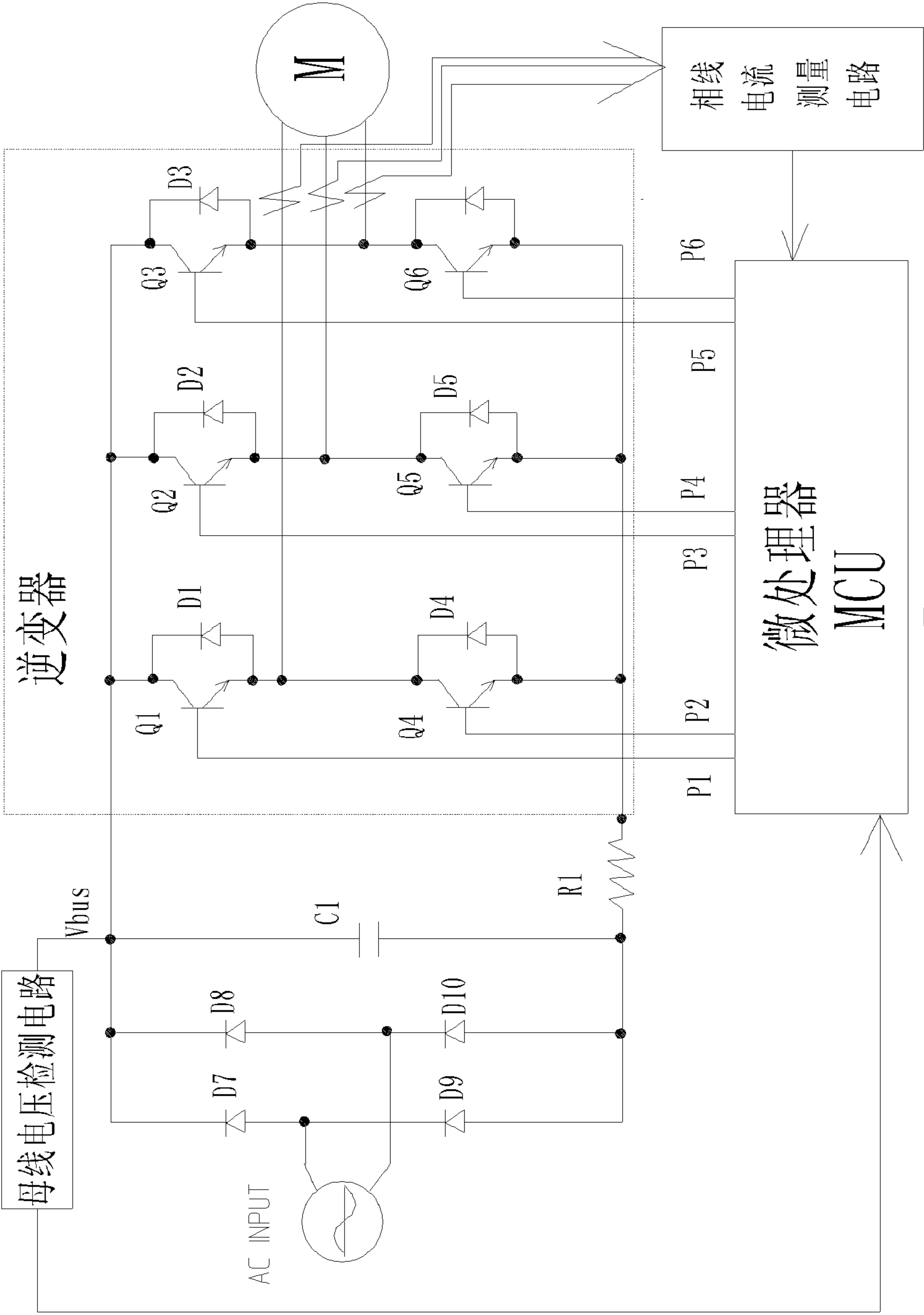


图6

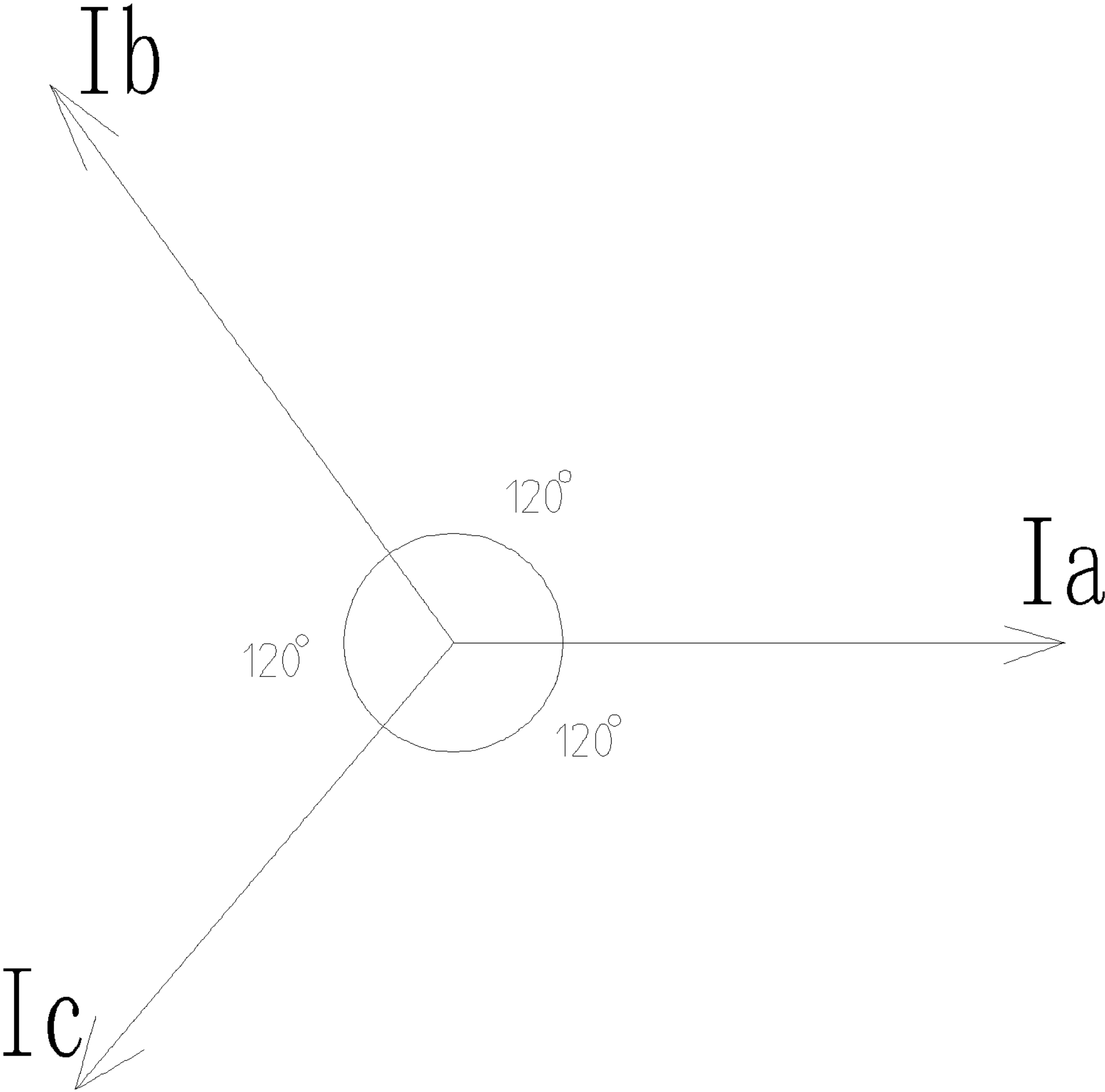


图 7

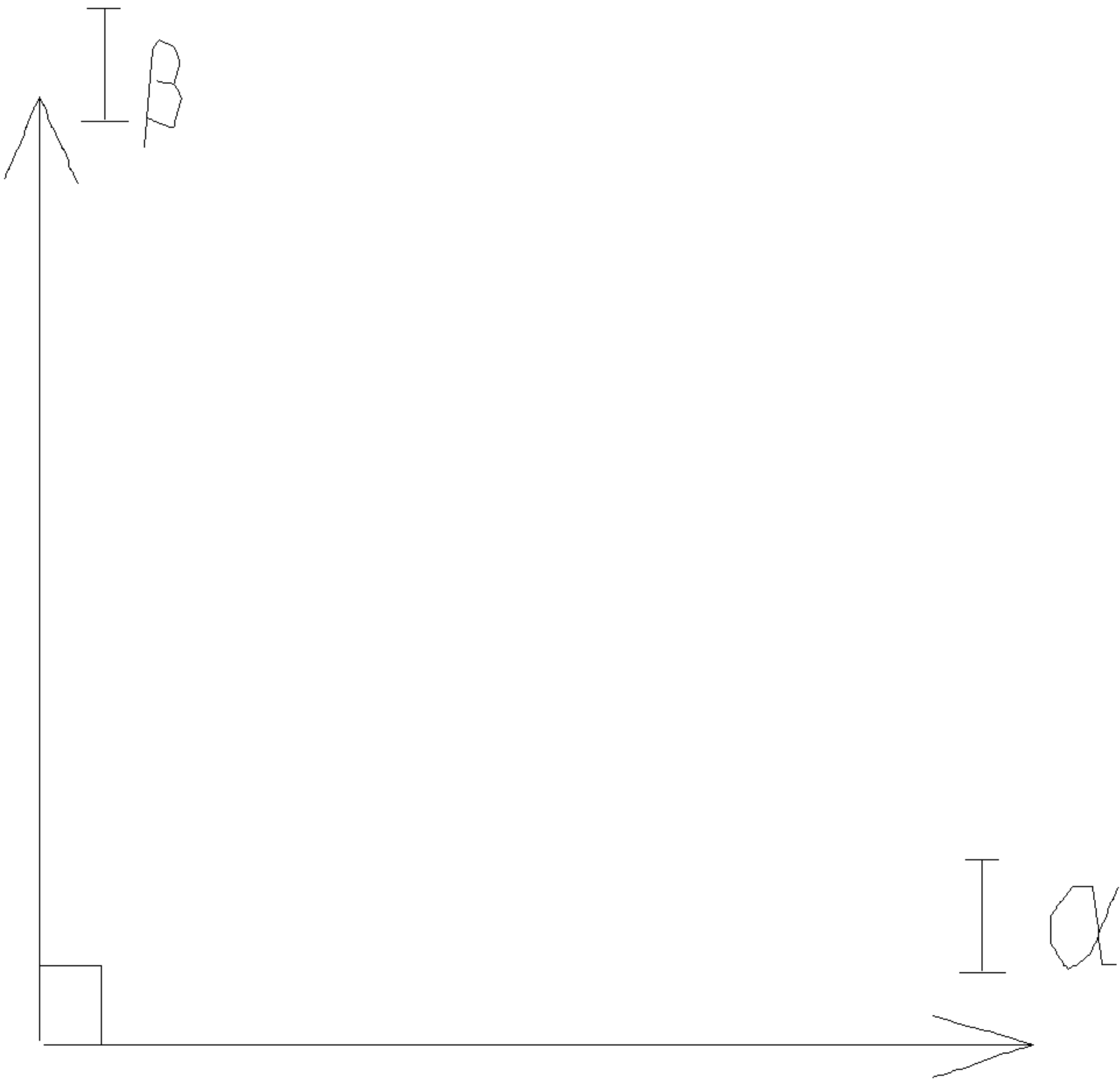


图 8

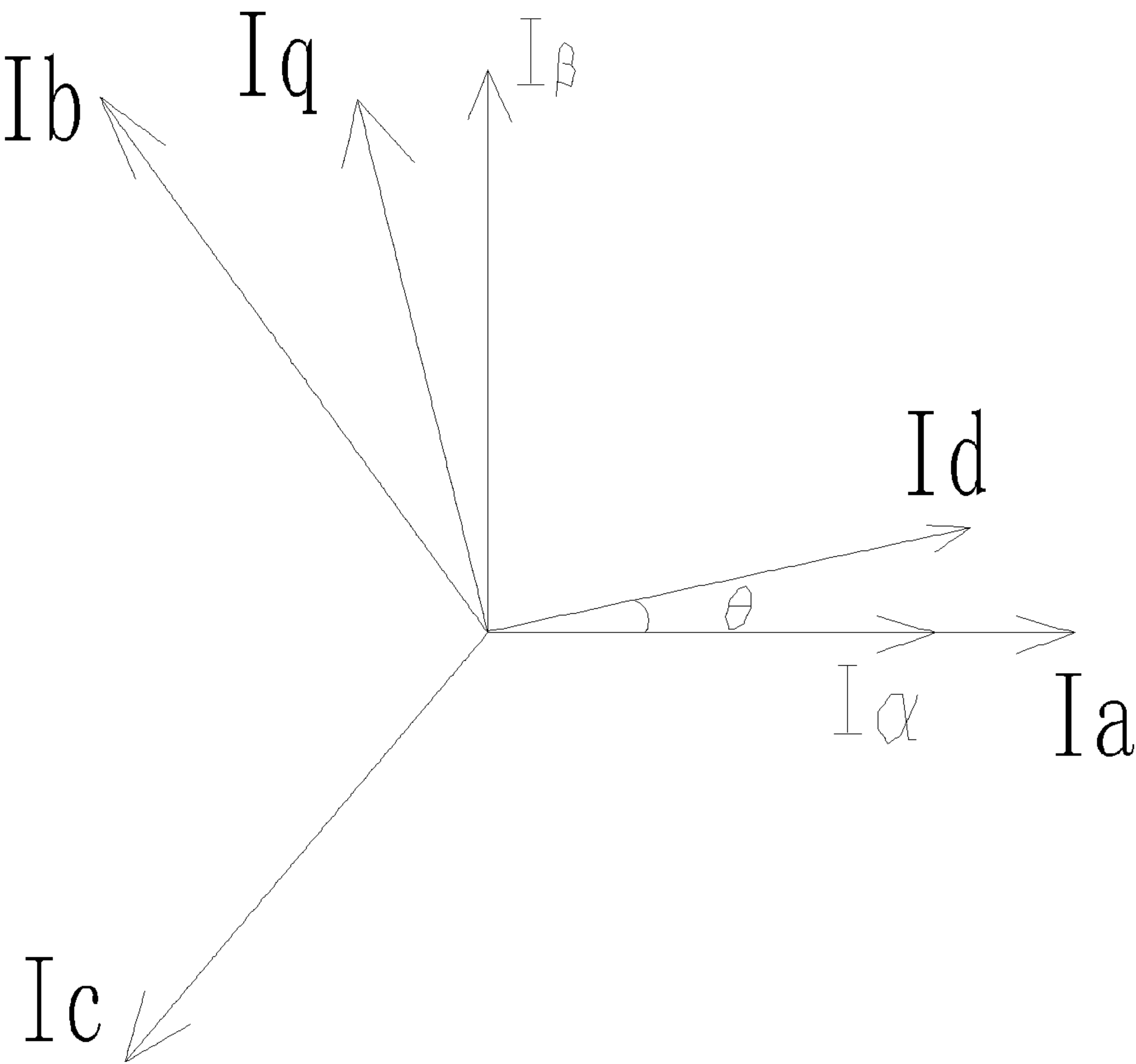


图 9

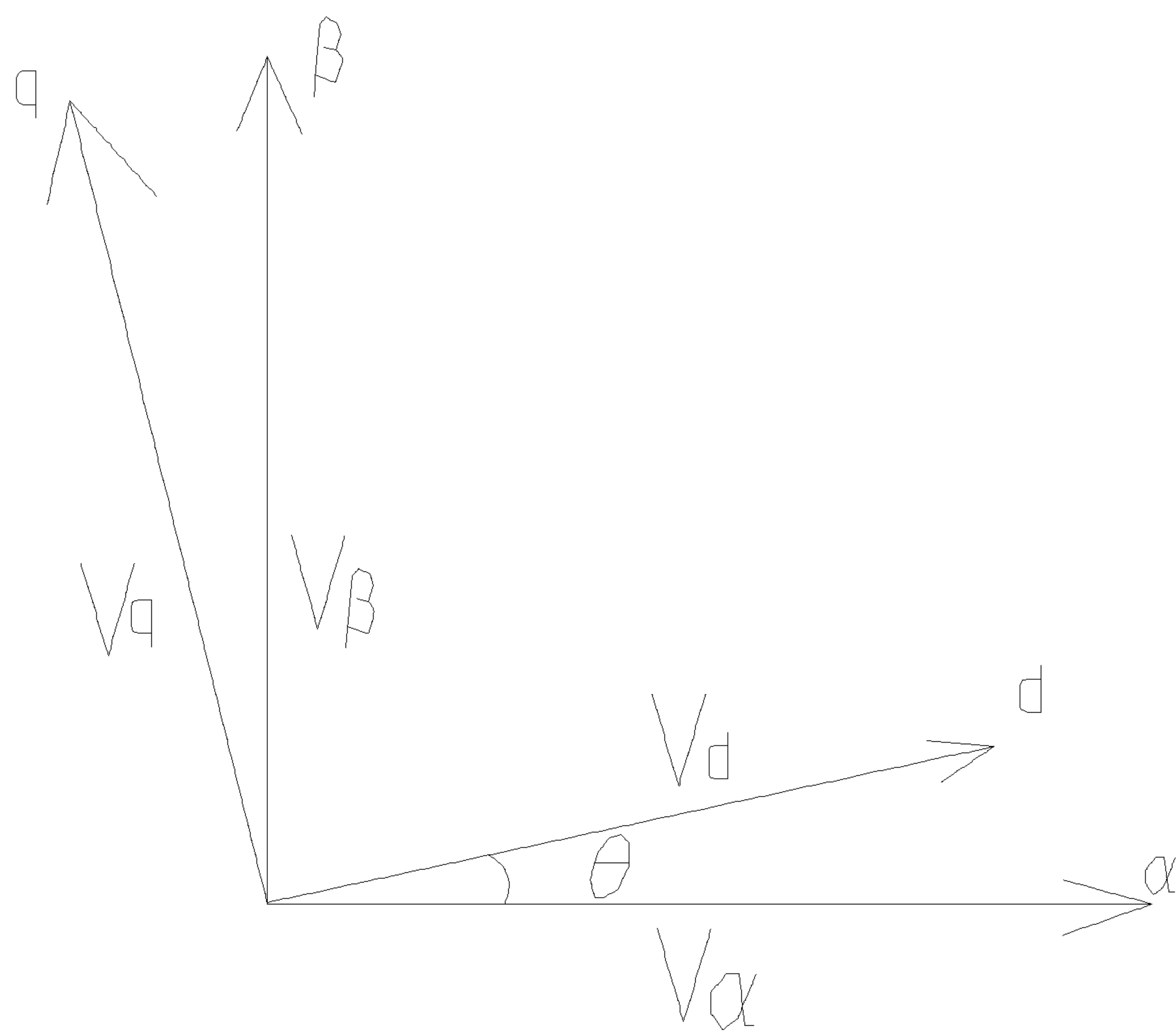


图 10

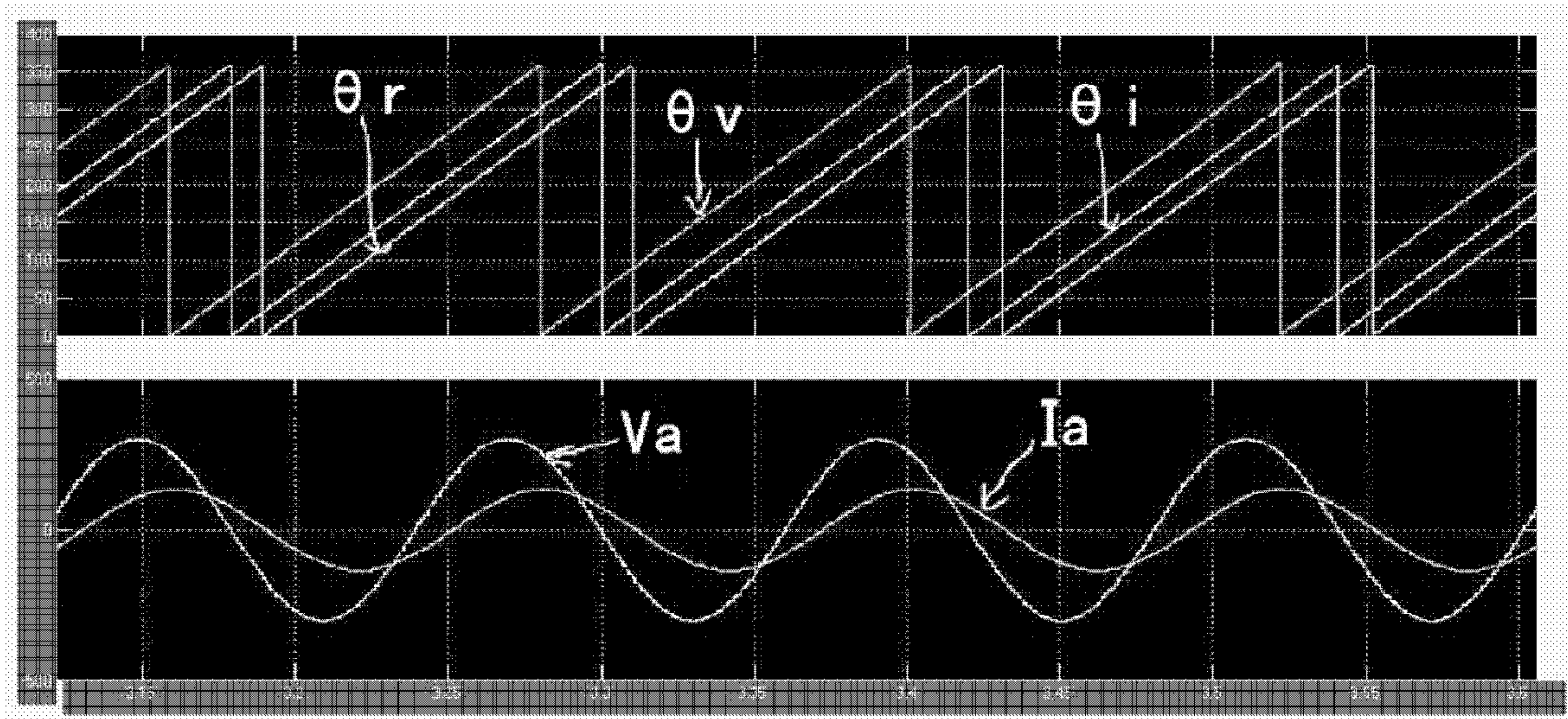


图 11

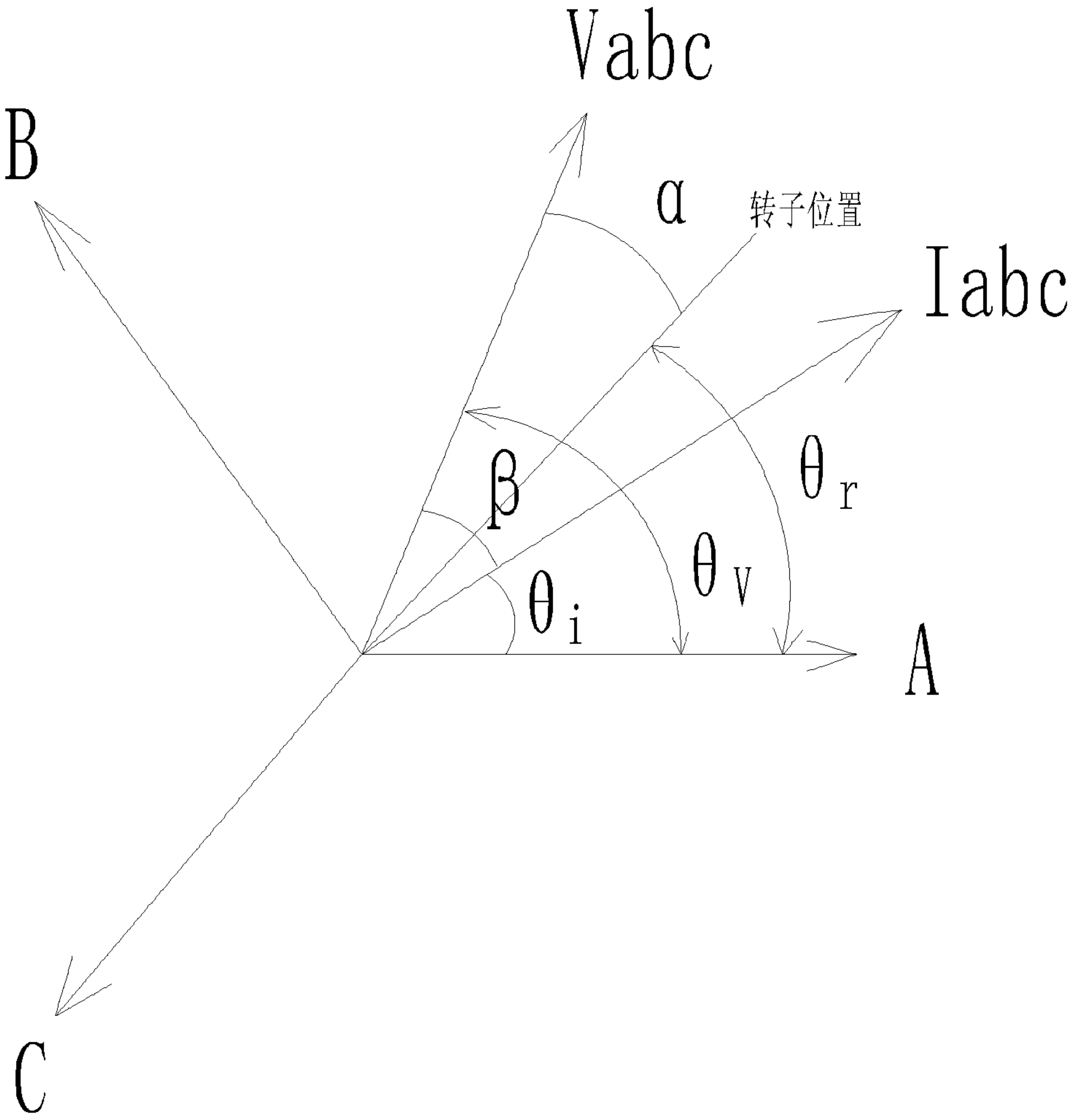


图 12

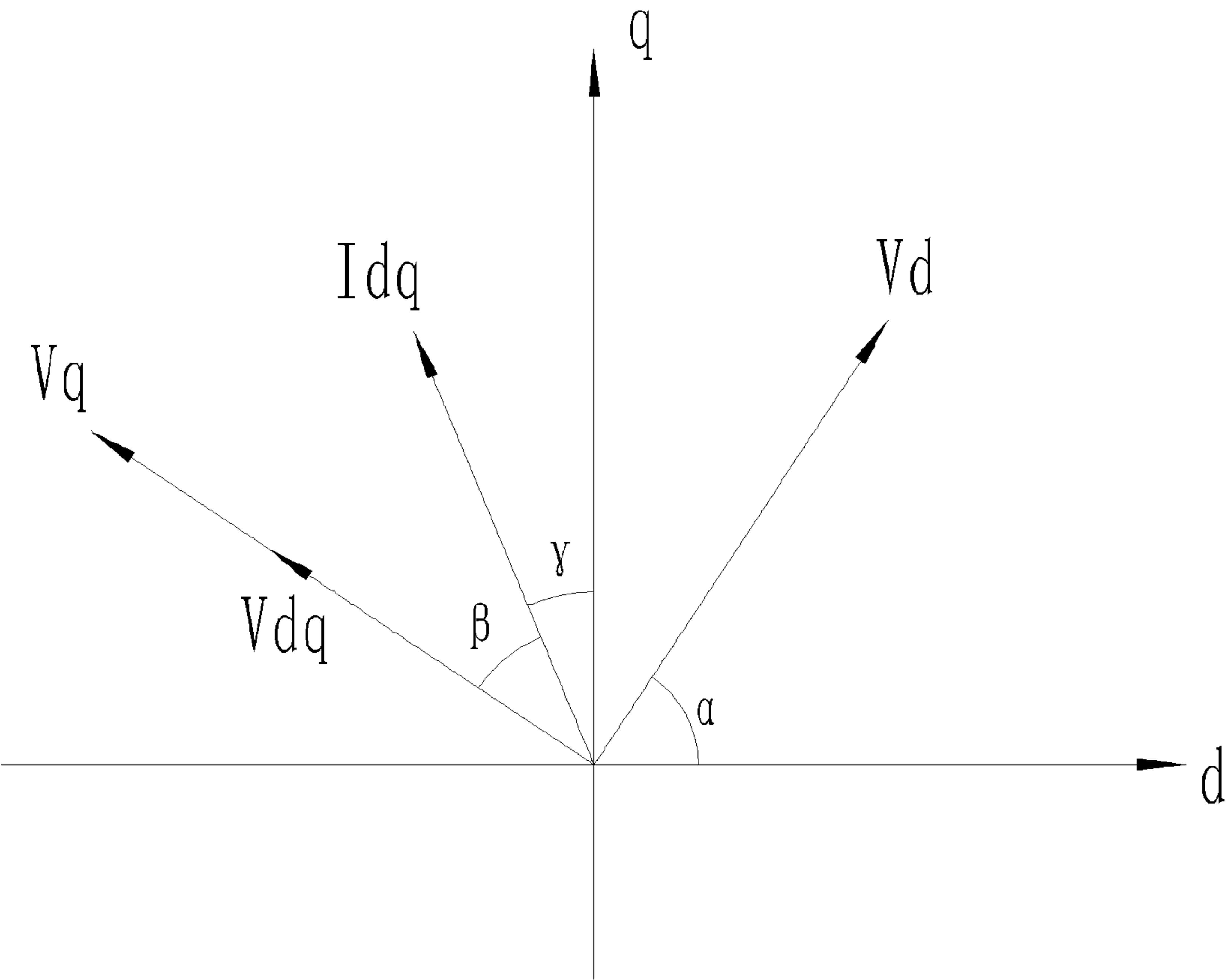


图 13

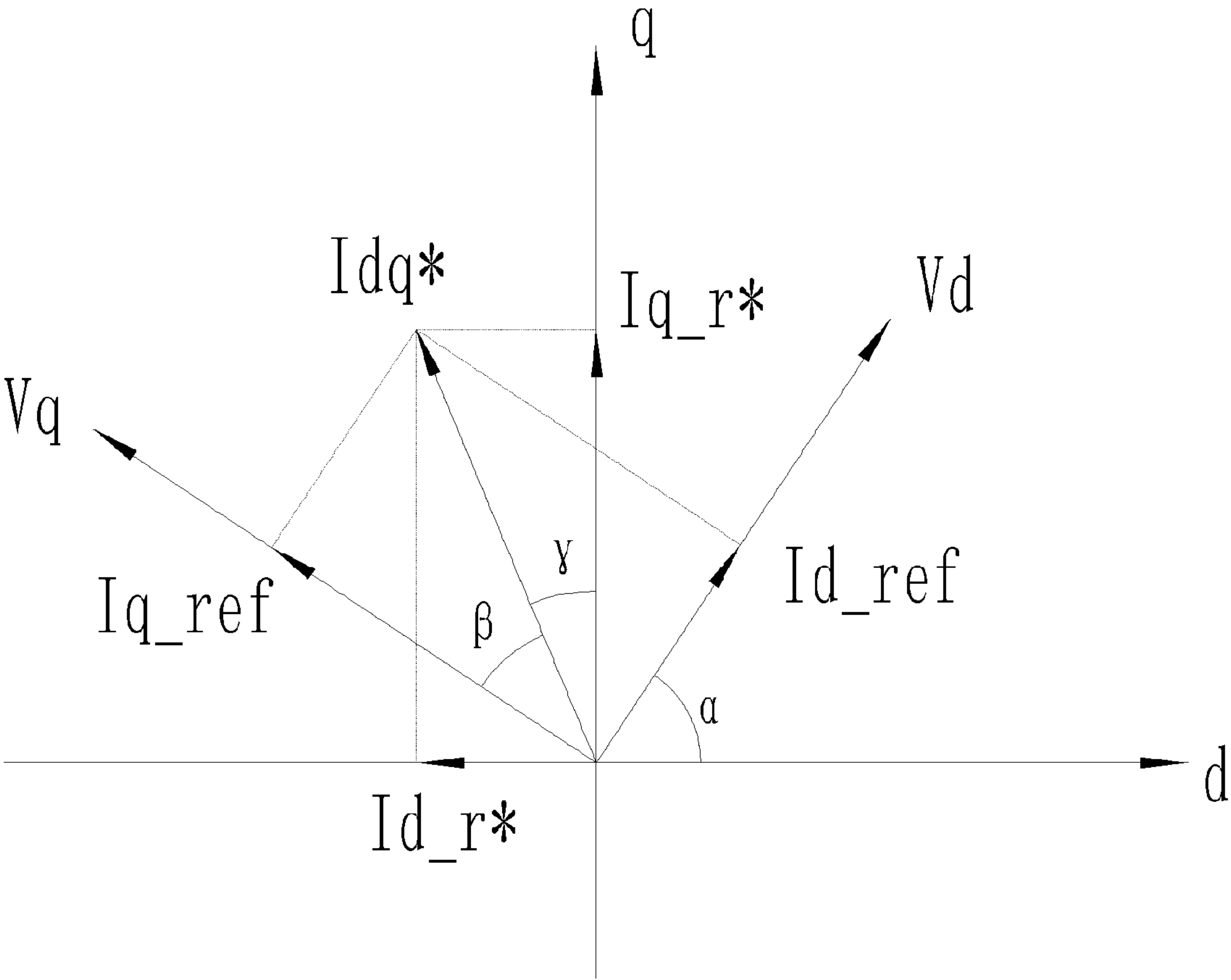


图 14

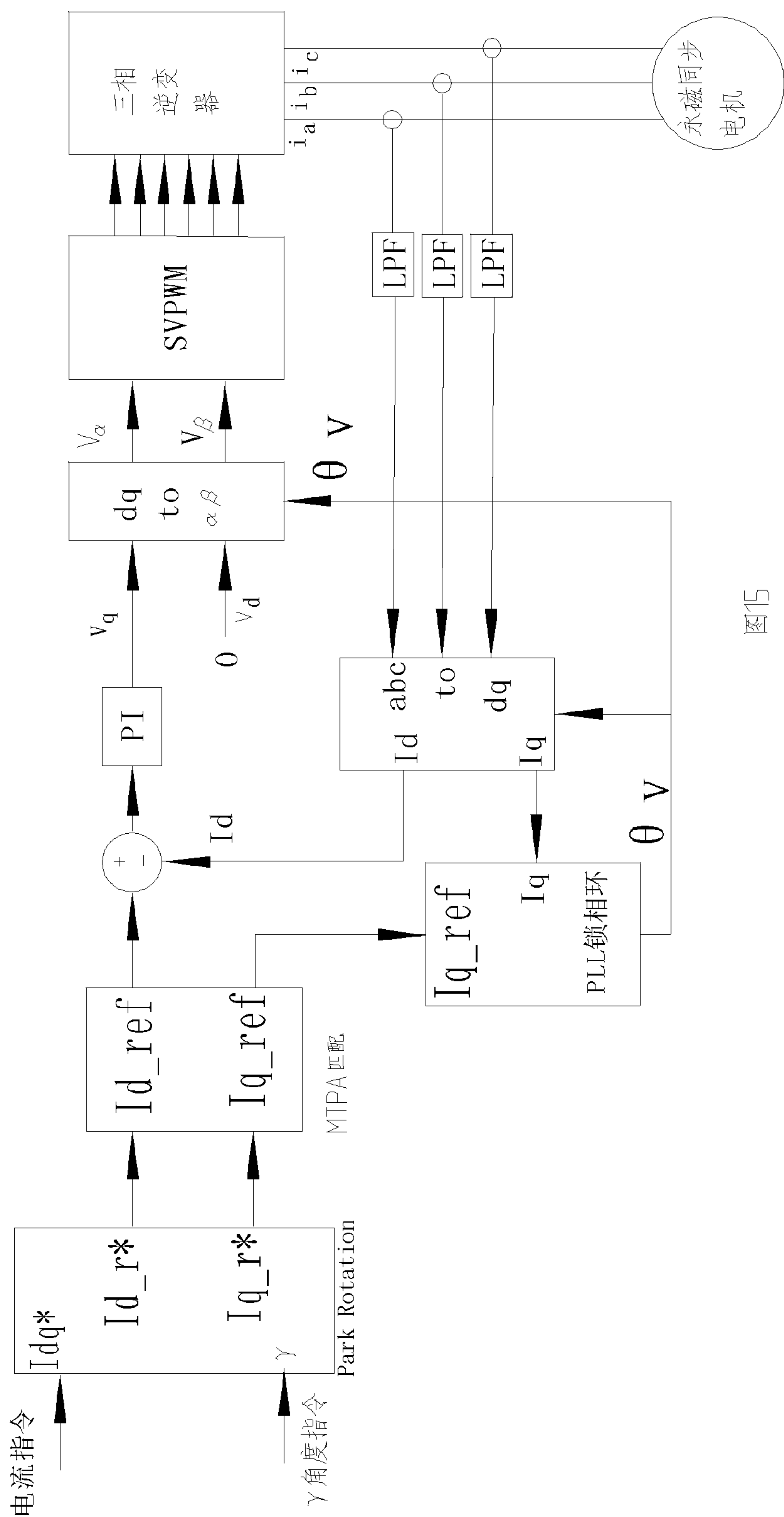


图15

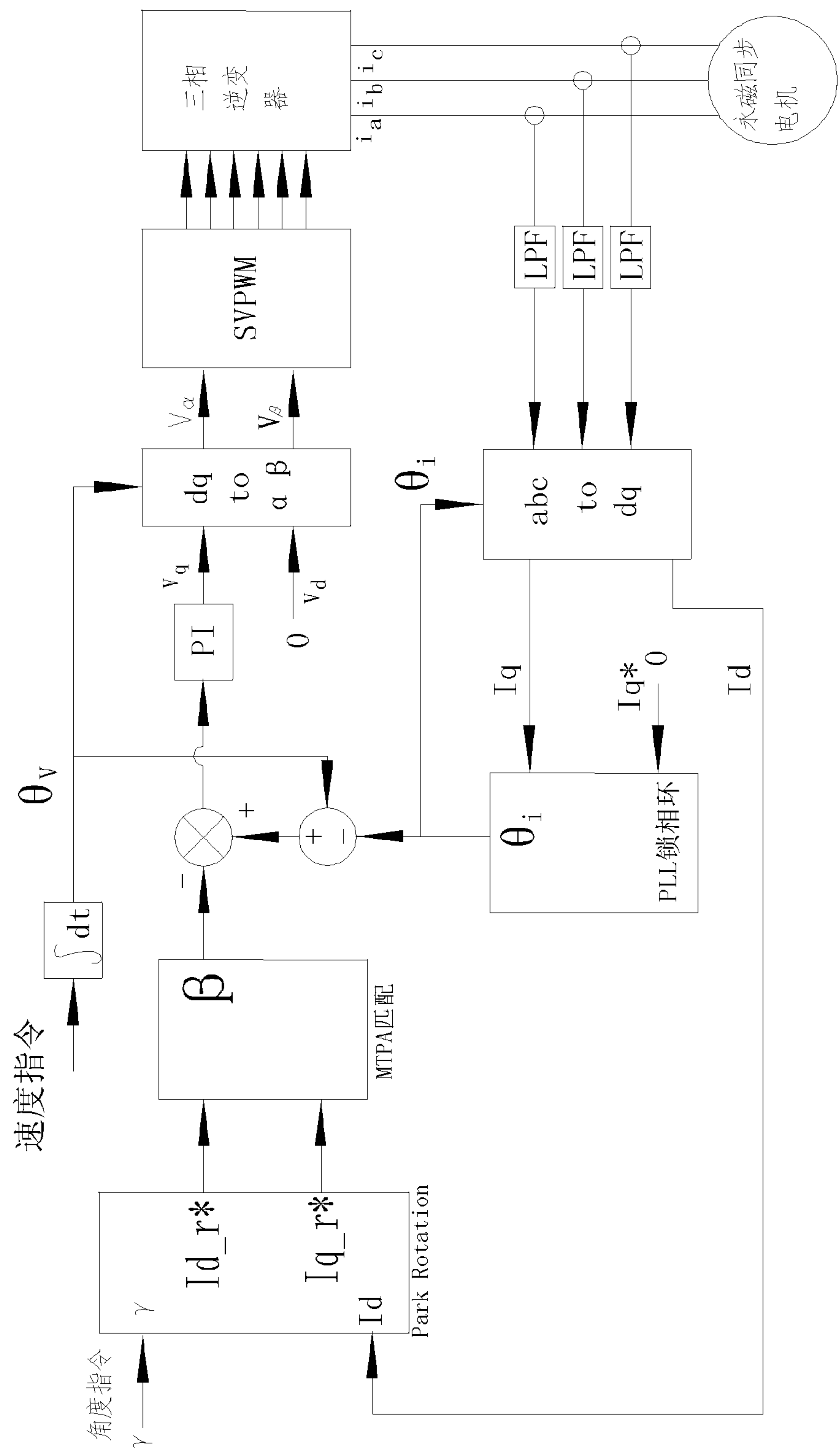


图16

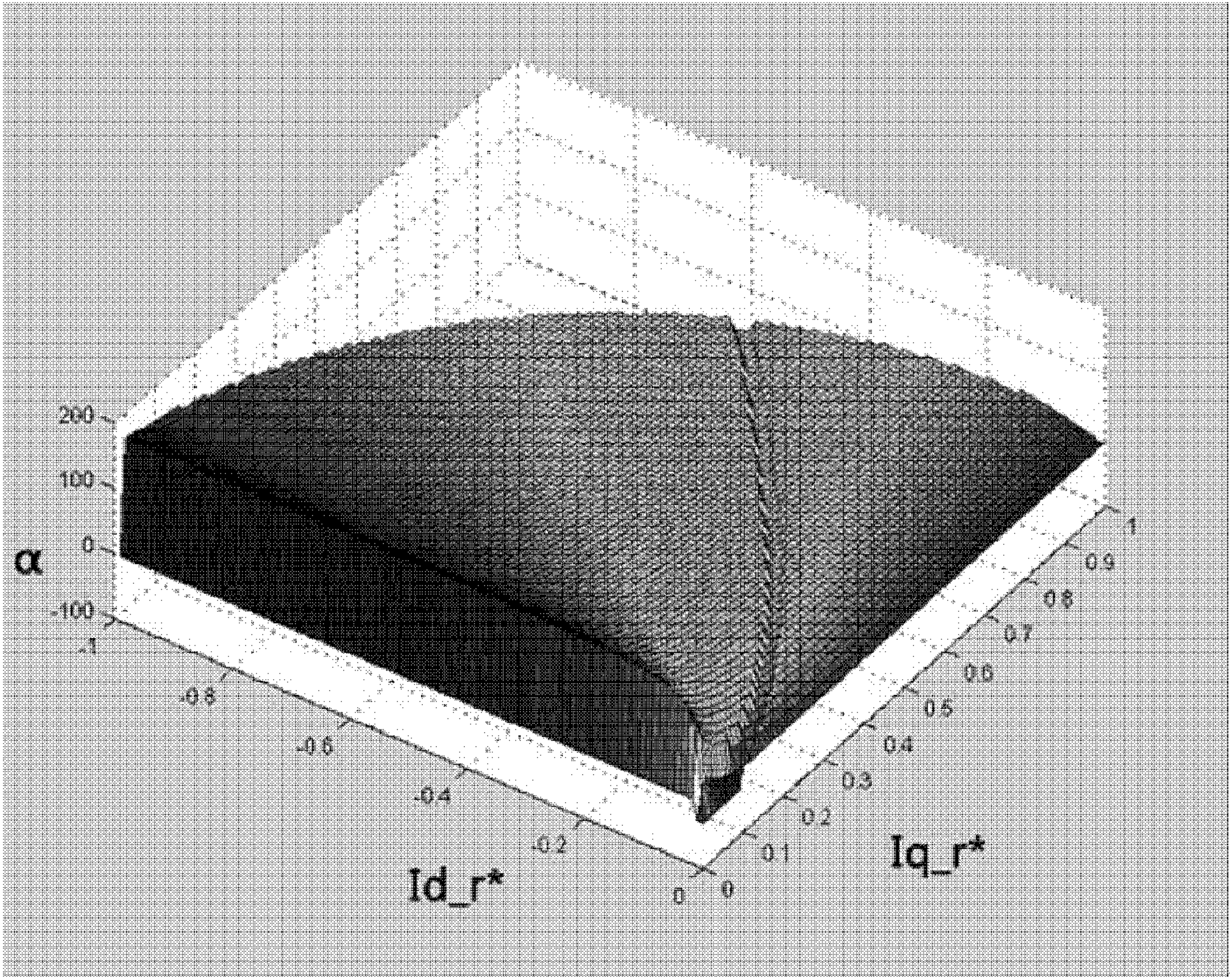


图 17

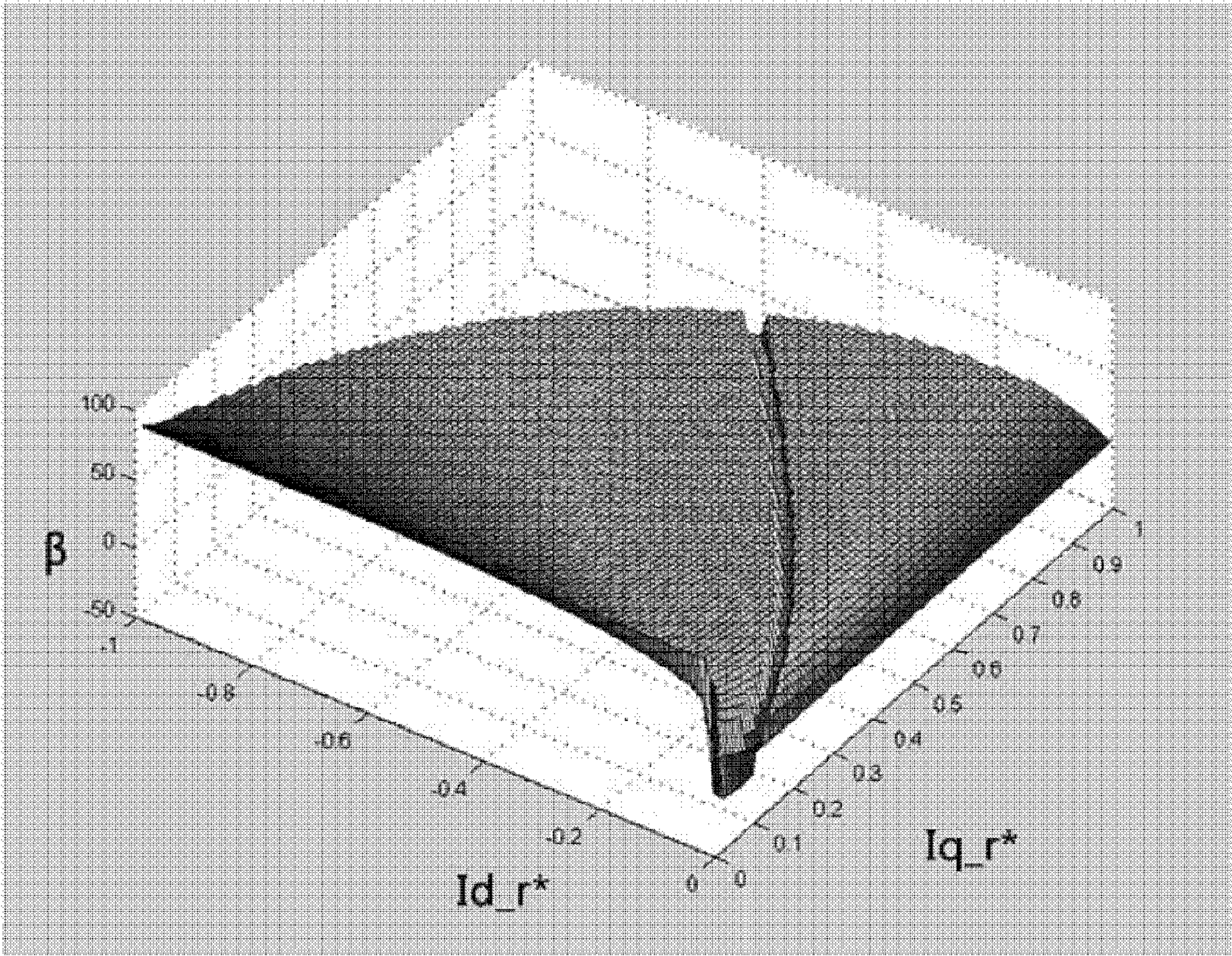


图 18

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2019/114919

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H02P 21/26(2016.01)i; H02P 21/24(2016.01)i; H02P 25/024(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) WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 无位置传感, 永磁同步电机, 电流控制, 速度控制, 转速控制, MTPA, 最大转矩电流比, 最大转矩每安培, 最大力矩电流比, 最大力矩每安培, 坐标系, 表, 角, sensorless, permanent magnet synchronous motor, PMSM, current control, coordinate, maximum torque per ampere, table, angle				
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT				
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.		
A	CN 102594250 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 18 July 2012 (2012-07-18) description paragraphs 0055-0106, figures 1-4	1-10		
A	CN 109889117 A (HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 14 June 2019 (2019-06-14) entire document	1-10		
A	CN 110071674 A (TIANJIN UNIVERSITY) 30 July 2019 (2019-07-30) entire document	1-10		
A	CN 103929109 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 16 July 2014 (2014-07-16) entire document	1-10		
A	CN 103607155 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 26 February 2014 (2014-02-26) entire document	1-10		
A	EP 2544362 A2 (LSIS CO., LTD.) 09 January 2013 (2013-01-09) entire document	1-10		
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.				
<table><tr><td>* 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</td><td>“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</td></tr></table>			* 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
* 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 17 July 2020		Date of mailing of the international search report 24 July 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/CN2019/114919

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	102594250	A	18 July 2012	CN	102594250	B	16 April 2014
CN	109889117	A	14 June 2019	None			
CN	110071674	A	30 July 2019	None			
CN	103929109	A	16 July 2014	CN	103929109	B	29 June 2016
CN	103607155	A	26 February 2014	CN	103607155	B	20 January 2016
EP	2544362	A2	09 January 2013	KR	101562418	B1	22 October 2015
				CN	102868348	A	09 January 2013
				JP	2013017383	A	24 January 2013
				US	2013009574	A1	10 January 2013
				CN	102868348	B	15 April 2015
				US	8723461	B2	13 May 2014
				KR	20130005187	A	15 January 2013
				JP	5540040	B2	02 July 2014
				EP	2544362	A3	01 November 2017

国际检索报告		国际申请号 PCT/CN2019/114919
A. 主题的分类 H02P 21/26(2016.01)i; H02P 21/24(2016.01)i; H02P 25/024(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)) WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 无位置传感, 永磁同步电机, 电流控制, 速度控制, 转速控制, MTPA, 最大转矩电流比, 最大转矩每安培, 最大力矩电流比, 最大力矩每安培, 坐标系, 表, 角, sensorless, permanent magnet synchronous motor, PMSM, current control, coordinate, maximum torque per ampere, table, angle		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 102594250 A (哈尔滨工业大学) 2012年 7月 18日 (2012 - 07 - 18) 说明书第0055-0106段, 附图1-4	1-10
A	CN 109889117 A (合肥工业大学) 2019年 6月 14日 (2019 - 06 - 14) 全文	1-10
A	CN 110071674 A (天津大学) 2019年 7月 30日 (2019 - 07 - 30) 全文	1-10
A	CN 103929109 A (哈尔滨工业大学) 2014年 7月 16日 (2014 - 07 - 16) 全文	1-10
A	CN 103607155 A (浙江大学) 2014年 2月 26日 (2014 - 02 - 26) 全文	1-10
A	EP 2544362 A2 (LSIS CO., LTD.) 2013年 1月 9日 (2013 - 01 - 09) 全文	1-10
☐ 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 2020年 7月 17日	国际检索报告邮寄日期 2020年 7月 24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	受权官员 韦晓娟 电话号码 010-53961237	

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2019/114919

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	102594250	A	2012年 7月 18日	CN 102594250 B	2014年 4月 16日
CN	109889117	A	2019年 6月 14日	无	
CN	110071674	A	2019年 7月 30日	无	
CN	103929109	A	2014年 7月 16日	CN 103929109 B	2016年 6月 29日
CN	103607155	A	2014年 2月 26日	CN 103607155 B	2016年 1月 20日
EP	2544362	A2	2013年 1月 9日	KR 101562418 B1	2015年 10月 22日
				CN 102868348 A	2013年 1月 9日
				JP 2013017383 A	2013年 1月 24日
				US 2013009574 A1	2013年 1月 10日
				CN 102868348 B	2015年 4月 15日
				US 8723461 B2	2014年 5月 13日
				KR 20130005187 A	2013年 1月 15日
				JP 5540040 B2	2014年 7月 2日
				EP 2544362 A3	2017年 11月 1日