



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106849805 A

(43)申请公布日 2017.06.13

(21)申请号 201710070989.7

H02P 25/024(2016.01)

(22)申请日 2017.02.09

(71)申请人 澳特卡新能源科技(上海)有限公司

地址 215332 江苏省苏州市花桥绿地大道  
231弄3号楼3楼301-309室

申请人 南京奥特佳新能源科技有限公司

(72)发明人 郝鹏程 张臻 高晓杰 陶冬生  
陈志鹏

(74)专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限  
公司 32224

代理人 董建林

(51)Int. Cl.

H02P 21/22(2016.01)

H02P 21/26(2016.01)

H02P 27/06(2006.01)

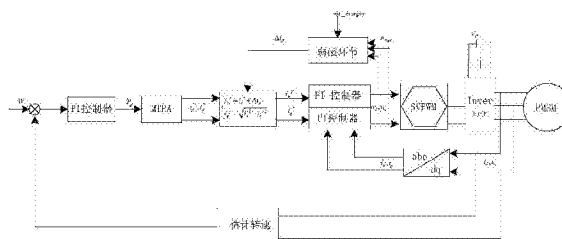
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法,包括根据母线电压 $U_{dc}$ 计算相电压峰值 $U_{max}$ ;根据d轴和q轴电压计算实际相电压 $U_{lim}$ ;计算实际相电压 $U_{lim}$ 与相电压峰值 $U_{max}$ 的差值 $U_{max}-U_{lim}$ ;设定电压裕量,判断差值 $U_{max}-U_{lim}$ 是否小于电压裕量,若小于,则通过控制器校正,得到弱磁电流增量 $\Delta i_d$ ;基于MTPA的公式计算出d轴和q轴的给定电流 $i_d^*$ 和 $i_q^*$ ;根据相电流峰值 $I_s$ 和弱磁电流增量 $\Delta i_d$ 重新分配d轴和q轴电流。本发明使得电压裕量始终维持在设定的电压裕量左右,保证电压不会饱和而导致失控,相较于传统方法,本发明计算节点,适用范围广。



1. 一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法,其特征在于:包括,  
 根据母线电压 $U_{dc}$ 计算相电压峰值 $u_{max}$ ;  
 根据d轴和q轴电压计算实际相电压 $u_{lim}$ ;  
 计算实际相电压 $u_{lim}$ 与相电压峰值 $u_{max}$ 的差值 $u_{max}-u_{lim}$ ;  
 设定电压裕量,判断差值 $u_{max}-u_{lim}$ 是否小于电压裕量,若小于,则通过控制器校正,得到弱磁电流增量 $\Delta i_d$ ;

基于MTPA的公式计算出d轴和q轴的给定电流 $i_d^*$ 和 $i_q^*$ ;

根据相电流峰值 $I_s$ 和弱磁电流增量 $\Delta i_d$ 重新分配d轴和q轴电流。

2. 根据权利要求1所述的一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法,其特征在于:d轴和q轴电压为,

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w\varphi_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + w\varphi_d \end{cases}$$

高速稳态时可得,

$$\begin{cases} u_d = -wL_q i_q \\ u_q = w(\varphi_f + L_d i_d) \end{cases}$$

其中, $u_d$ 和 $u_q$ 分别为d轴和q轴电压, $i_d$ 和 $i_q$ 分别为d轴和q轴电流, $L_d$ 和 $L_q$ 分别为d轴和q轴电感, $R$ 为定子绕组的电阻, $w$ 为电流的电角速度, $\varphi_q$ 和 $\varphi_d$ 分别为d轴和q轴磁链, $\varphi_f$ 为转子磁链。

3. 根据权利要求2所述的一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法,其特征在于:实际相电压 $u_{lim} = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$ 。

4. 根据权利要求2所述的一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法,其特征在于:d轴和q轴的给定电流 $i_d^*$ 和 $i_q^*$ 为

$$\begin{cases} i_d^* = \frac{\varphi_f}{4(L_q - L_d)} - \frac{\sqrt{\varphi_f^2 + 8 * L_q^2 * I_s^2}}{4(L_q - L_d)} \\ i_q^* = \sqrt{I_s^2 - i_d^{*2}} \end{cases}$$

5. 根据权利要求2所述的一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法,其特征在于:重新分配d轴和q轴电流为,

$$\begin{cases} i_d^r = i_d^* + \Delta i_d \\ i_q^r = \sqrt{I_s^2 - i_d^{r2}} \end{cases}$$

其中, $i_d^r$ 和 $i_q^r$ 分别为重新分配d轴和q轴电流。

6. 根据权利要求1所述的一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法,其特征在于:控制器为PI控制器。

## 一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法,属于弱磁控制技术领域。

### 背景技术

[0002] 压缩机的驱动电机早期使用的是异步电机,随着永磁电机技术的发展,由于其启动功率大、高效节能、功率因数高等优点已逐渐地替代异步电机。永磁电机分为直流无刷电机(BLDCM,Brushless DC Motor),和永磁同步电机(PMSM,Permanent Magnetic Synchronous Motor)。直流无刷电机结构简单控制简单,逆变器采用传统120度导通型三相六状态驱动方式。但是直流无刷电机由于内部结构的原因,其反电势为梯形波,存在启动困难,低速时转矩脉动大,高速时噪音大等缺点。而永磁同步电机不存在以上缺点。为了克服直流无刷电机缺点,改善压缩机的驱动性能,许多压缩机厂家正在逐步采用永磁同步电机,或者改变直流无刷电机的转子结构,使其反电势成为正弦波。改变结构的直流无刷电机和永磁同步电机仅定子绕组结构有所不同,永磁同步电机的控制算法均可用于反电势为正弦波的直流无刷电机上。

[0003] 永磁电机控制一般采用 $i_d=0$ 的控制方式, $i_d$ 为d轴电流。该方式虽实现简单,但不能利用磁阻转矩,并不适用于高速工况。以空调系统中驱动压缩机的永磁电机为研究对象,而压缩机控制中转速都较高,有的甚至能达到上万转,当电机转速达到基值后,随着转速的上升反电势越来越接近相电压峰值,实际的逆变器容量都是有限的,无法继续提升电压,最终导致控制器饱和而失控。因此,在高转速时需要进行弱磁处理,以提高电机的转速范围。与电励磁同步电机不同,永磁同步电机的转子磁场是确定的,运行时无法减弱,所以只能利用直轴电流减弱电机的气隙磁场来模拟弱磁控制的效果。

[0004] 现有的弱磁技术包括公式计算法、查表法和梯度下降法等。其中公式计算法依赖电机参数,而电机实际运行过程中参数会发生变化,因此此类方法仅具有理论意义,无法应用到实际工程中。查表法需要大量实验数据,得出的数据也仅仅适用于一类电机,耗时耗力效率不高。梯度下降法,计算复杂,需要各种偏导数,并不适用于要求计算速度的实时系统。

### 发明内容

[0005] 为了解决上述技术问题,本发明提供了一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法。

[0006] 为了达到上述目的,本发明所采用的技术方案是:

[0007] 一种电动压缩机驱动电机的弱磁控制方法,包括,

[0008] 根据母线电压 $U_{dc}$ 计算相电压峰值 $U_{max}$ ;

[0009] 根据d轴和q轴电压计算实际相电压 $u_{lim}$ ;

[0010] 计算实际相电压 $u_{lim}$ 与相电压峰值 $U_{max}$ 的差值 $U_{max}-u_{lim}$ ;

[0011] 设定电压裕量,判断差值 $U_{max}-u_{lim}$ 是否小于电压裕量,若小于,则通过控制器校正,

得到弱磁电流增量  $\Delta i_d$ ;

[0012] 基于MTPA的公式计算出d轴和q轴的给定电流  $i_d^*$  和  $i_q^*$ ;

[0013] 根据相电流峰值  $I_s$  和弱磁电流增量  $\Delta i_d$  重新分配d轴和q轴电流。

[0014] d轴和q轴电压为,

$$[0015] \begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w\varphi_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + w\varphi_d \end{cases}$$

[0016] 高速稳态时可得,

$$[0017] \begin{cases} u_d = -wL_q i_q \\ u_q = w(\varphi_f + L_d i_d) \end{cases}$$

[0018] 其中,  $u_d$  和  $u_q$  分别为d轴和q轴电压,  $i_d$  和  $i_q$  分别为d轴和q轴电流,  $L_d$  和  $L_q$  分别为d轴和q轴电感,  $R$  为定子绕组的电阻,  $w$  为电流的电角速度,  $\varphi_q$  和  $\varphi_d$  分别为d轴和q轴磁链,  $\varphi_f$  为转子磁链。

[0019] 实际相电压  $u_{lim} = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$ 。

$$[0020] \text{d轴和q轴的给定电流 } i_d^* \text{ 和 } i_q^* \text{ 为 } \begin{cases} i_d^* = \frac{\varphi_f}{4(L_q - L_d)} - \frac{\sqrt{\varphi_f^2 + 8 * L_q^2 * I_s^2}}{4(L_q - L_d)} \\ i_q^* = \sqrt{I_s^2 - i_d^{*2}} \end{cases}。$$

[0021] 重新分配d轴和q轴电流为,

$$[0022] \begin{cases} i_d^r = i_d^* + \Delta i_d \\ i_q^r = \sqrt{I_s^2 - i_d^{r2}} \end{cases}$$

[0023] 其中,  $i_d^r$  和  $i_q^r$  分别为重新分配d轴和q轴电流。

[0024] 控制器为PI控制器。

[0025] 本发明所达到的有益效果: 本发明的方法, 在转速上升至一定值时, 如果实际相电压  $u_{lim}$  与相电压峰值  $u_{max}$  的差值  $u_{max} - u_{lim}$ , 小于设定电压裕量, 系统会自动重新分配d轴和q轴的电流, 使得电压裕量始终维持在设定的电压裕量左右, 保证电压不会饱和而导致失控, 相较于传统方法, 本发明计算节点, 适用范围广。

## 附图说明

[0026] 图1为MTPA算法的电压椭圆和电流极限圆示意图;

[0027] 图2为弱磁控制算法的原理框图;

[0028] 图3为弱磁控制算法的整体流程图;

[0029] 图4为电机调速系统的整体框图;

[0030] 图5为实施例中实测d轴和q轴电流;

[0031] 图6为实施例中实测转速;

[0032] 图7为实施例中实测d轴和q轴电压;

[0033] 图8为实施例中实测电压裕量。

### 具体实施方式

[0034] 下面结合附图对本发明作进一步描述。以下实施例仅用于更加清楚地说明本发明的技术方案,而不能以此来限制本发明的保护范围。

[0035] 结合现有技术,对电动压缩机驱动电机,即永磁同步电机和反电势为正弦波的直流无刷电机,做如下分析:

[0036] d轴和q轴电压表达式可描述为:

$$[0037] \begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w\varphi_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + w\varphi_d \end{cases}$$

[0038] 其中, $u_d$ 和 $u_q$ 分别为d轴和q轴电压, $i_d$ 和 $i_q$ 分别为d轴和q轴电流, $L_d$ 和 $L_q$ 分别为d轴和q轴电感, $R$ 为定子绕组的电阻, $w$ 为电流的电角速度, $\varphi_q$ 和 $\varphi_d$ 分别为d轴和q轴磁链,可进一步分解为

$$\begin{cases} \varphi_d = \varphi_f + L_d i_d \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases}。$$

[0039] 电机在高速稳态时忽略电阻,微分项为零,可得:

$$[0040] \begin{cases} u_d = -wL_q i_q \\ u_q = w(\varphi_f + L_d i_d) \end{cases}$$

[0041] 其中, $\varphi_f$ 为转子磁链。

[0042] 电磁转矩表达式可以描述为:

$$[0043] T_e = \frac{3}{2} n_p [\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

[0044] 其中, $T_e$ 为电磁转矩, $n_p$ 为极对数。

[0045] 由于逆变器容量限制,所能产生的峰值相电压是一定的,而且受逆变器器件发热等因素影响,定子电流的峰值也是有限制的。上述限制可以用以下公式表示,

$$[0046] \begin{cases} \sqrt{u_d^2 + u_q^2} = w \sqrt{(L_q i_q)^2 + (\varphi_f + L_d i_d)^2} = u_{lim} \leq U_{dc} / \sqrt{3} \\ i_d^2 + i_q^2 \leq I_{lim} \end{cases}$$

[0047] 其中, $u_{lim}$ 为实际相电压, $U_{dc}$ 为母线电压, $I_{lim}$ 表示器件能承受的最大相电流。

[0048] 从上述限制公式可以看出,若采用 $i_d=0$ 的控制策略,则电机能达到的理论最高转速为 $w_{lim} = \frac{u_{max}}{\varphi_f}$ ,其中 $u_{max} = U_{dc} / \sqrt{3}$ 。这是理论空载条件下得出的最高转速,实际中电机总

会有负载,所以实际转速会比该值要小。此时想要提高转速,只能负方向增加直轴电流,即使得 $i_d < 0$ 。负方向增加直轴电流的一般规则是按照MTPA (Maximum Torque Per Ampere) 曲线,也就是最大转矩电流曲线给定,该方法的好处是单位电流产生的扭矩是最大的。电流运行曲线如图1所示。

[0049] 从图中可以看出,当转速比较小时电压椭圆完全包含电流圆,此时的电流可以取

极限内的任意值。当转速上升至 $w_1$ 时，MTPA曲线，电流圆和电压椭圆出现了交点A。此时受到电流圆和电压椭圆的限制，若转速要再上升，无法再按照MTPA曲线给定电流，而是按照AB曲线给定。

[0050] 设定子电流与直轴夹角为 $\theta$ ，相电流峰值 $I_s$ ，则 $i_d$ 和 $i_q$ 可以表示为，

$$[0051] \begin{cases} i_d = I_s * \cos(\theta) \\ i_q = I_s * \sin(\theta) \end{cases}$$

[0052] 带入电磁转矩表达式，求偏导数，令其为0，即可求得 $I_s$ 一定时，如何分配 $i_d$ 和 $i_q$ ，得到最大转矩。反之，得知转矩时可计算出d轴和q轴的给定电流 $i_d^*$ 和 $i_q^*$ ，如下，

$$[0053] \begin{cases} i_d^* = \frac{\phi_f}{4(L_q - L_d)} - \frac{\sqrt{\phi_f^2 + 8 * L_q^2 * I_s^2}}{4(L_q - L_d)} \\ i_q^* = \sqrt{I_s^2 - i_d^{*2}} \end{cases}$$

[0054] 当电机转速较高时若再按照MTPA曲线给定电流会超出电压椭圆范围，使得电压饱和并最终失控。此时，在考虑电压裕量的基础上在直轴上负方向增加一部分电流，之后再根据电流极限重新分配d轴和q轴电流，原理框图如图2所示。

[0055] 电流的重新分配按下述公式计算

$$[0056] \begin{cases} i_d^r = i_d^* + \Delta i_d \\ i_q^r = \sqrt{I_s^2 - i_d^{r2}} \end{cases}$$

[0057] 其中， $i_d^r$ 和 $i_q^r$ 分别为重新分配d轴和q轴电流， $\Delta i_d$ 为弱磁电流增量。图2中，根据给定的转矩，按照MTPA的计算公式计算出 $i_d^*$ 和 $i_q^*$ ，并制成表存放在芯片内，这样就减轻了CPU的工作量节省了计算时间，按照d轴和q轴电压，计算实际相电压 $u_{lim}$ ，并与相电压峰值 $u_{max}$ 比较，若差值超过设定电压裕量(voltage margin)，则不需考虑弱磁，若小于设定电压裕量(voltage margin)，则表明电流调节器有饱和的风险，需要弱磁。G(s)为PI控制器，整个弱磁环节正是通过这个控制器进行调节，保证稳定。

[0058] 如图3和4，具体步骤如下：

[0059] 步骤1，根据母线电压 $U_{dc}$ 计算相电压峰值 $u_{max}$ 。

[0060] 步骤2，根据d轴和q轴电压计算实际相电压 $u_{lim}$ 。

[0061] 步骤3，计算实际相电压 $u_{lim}$ 与相电压峰值 $u_{max}$ 的差值 $u_{max} - u_{lim}$ 。

[0062] 步骤4，设定电压裕量(voltage margin)，判断差值 $u_{max} - u_{lim}$ 是否小于电压裕量(voltage margin)，若小于，则通过PI控制器校正，得到弱磁电流增量 $\Delta i_d$ 。

[0063] 步骤5，基于MTPA的公式计算出d轴和q轴的给定电流 $i_d^*$ 和 $i_q^*$ 。

[0064] 步骤6，根据相电流峰值 $I_s$ 和弱磁电流增量 $\Delta i_d$ 重新分配d轴和q轴电流。

[0065] 如图5~图8所示，为了进一步说明上述方法，设定母线电压 $U_{dc}$ 为295V，根据步骤1可以计算出 $u_{max} = 170.3V$ ，转速由6000RPM升至8000RPM时，根据步骤2可以计算实际的相电压峰值 $u_{lim}$ ，根据步骤3和4对 $u_{max} - u_{lim}$ 差值进行计算，并设定电压裕量(voltage margin)为15V。系统会自动根据步骤5和步骤6进行计算和重新分配d轴和q轴的电流，使得电压裕量始终维持在15V左右。保证电压不会饱和而导致失控。

[0066] 上述方法使得电压裕量始终维持在设定的电压裕量左右,保证电压不会饱和而导致失控,相较于传统方法,本发明计算节点,适用范围广。

[0067] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明技术原理的前提下,还可以做出若干改进和变形,这些改进和变形也应视为本发明的保护范围。

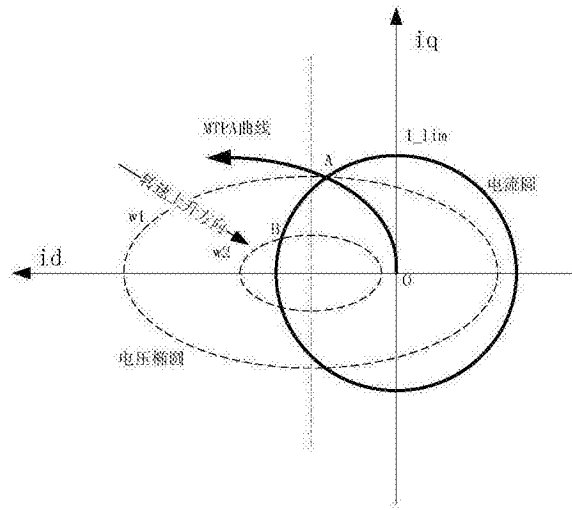


图1

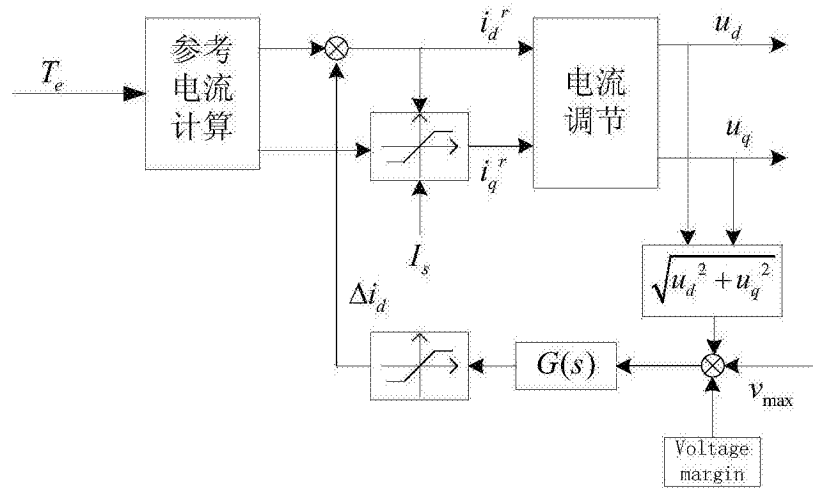


图2



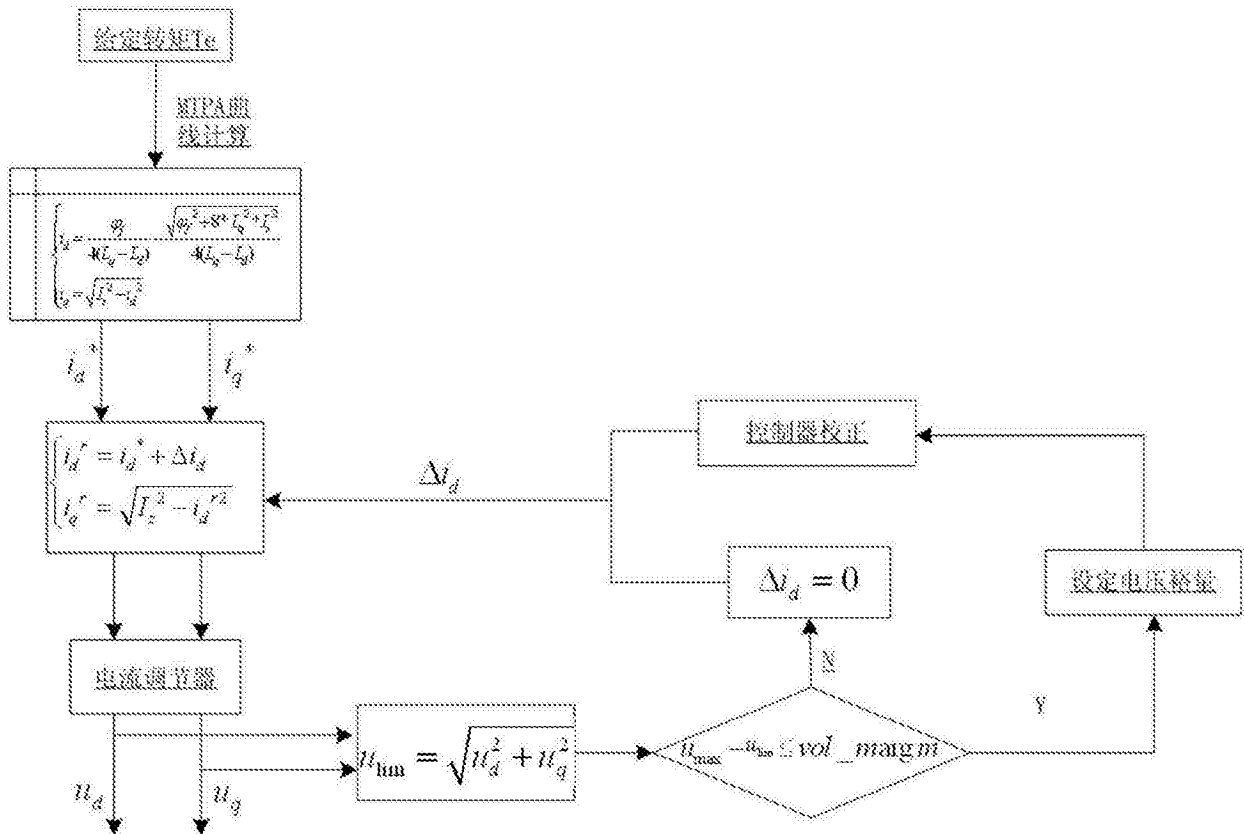


图3

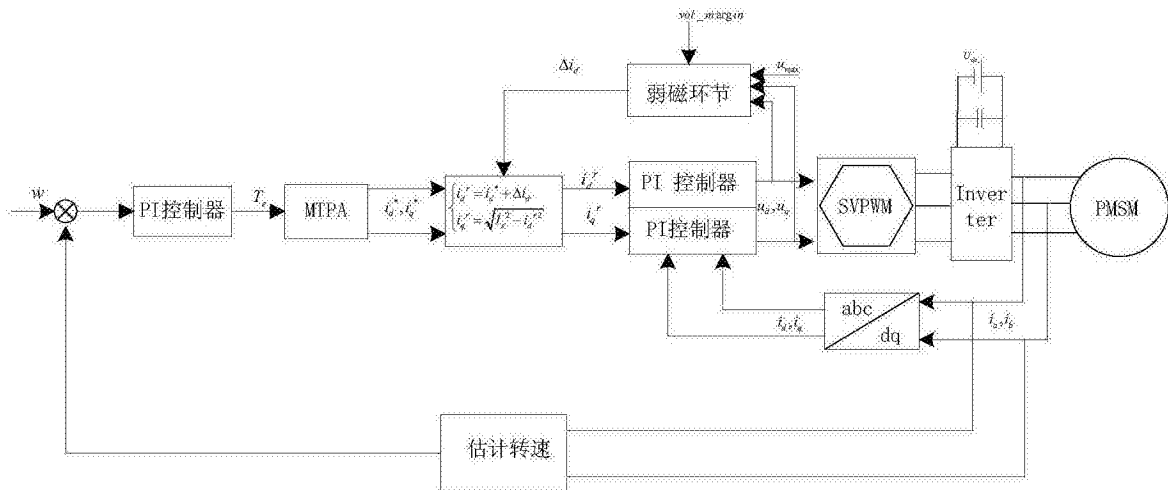


图4

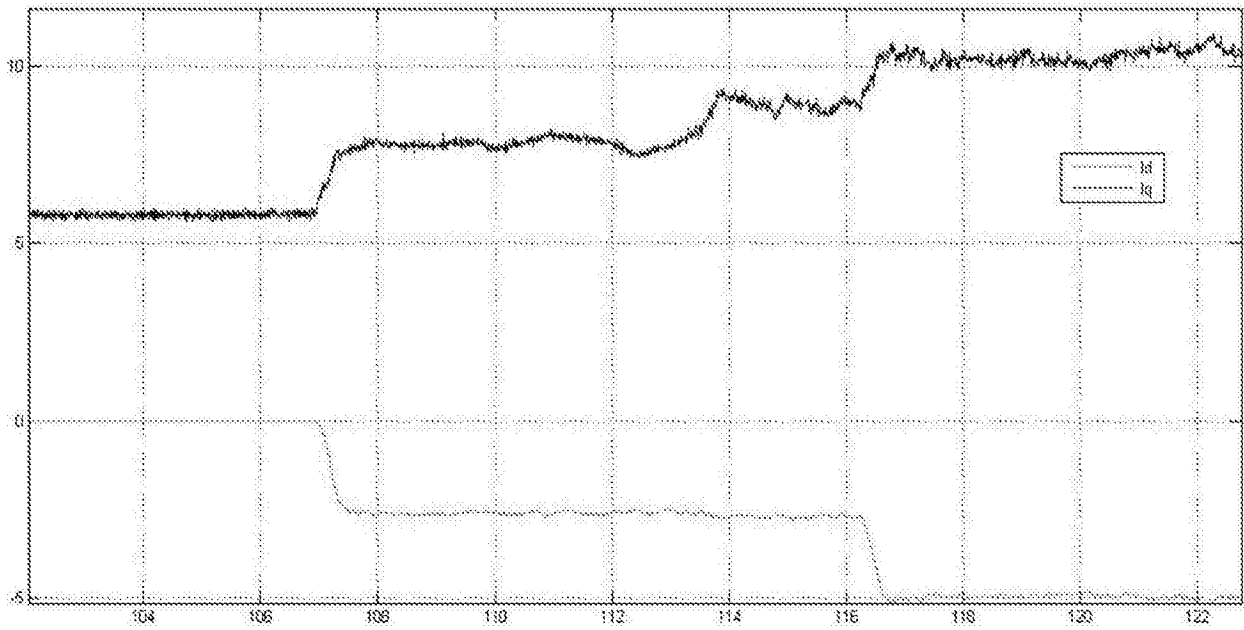


图5

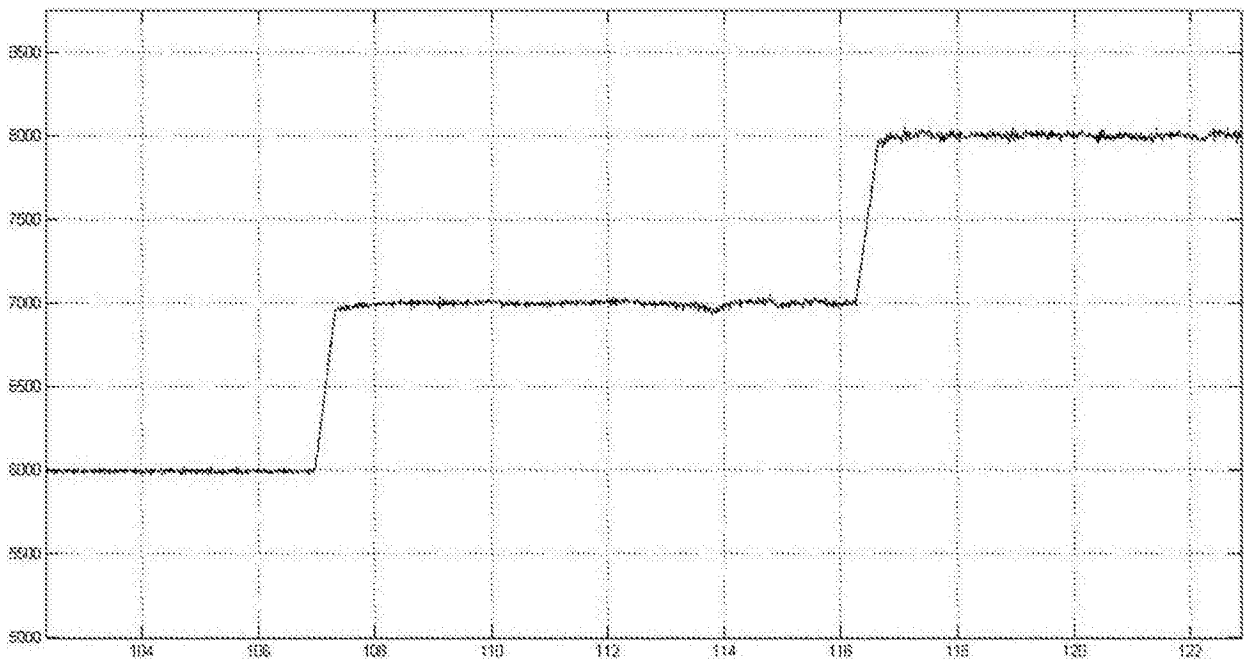


图6

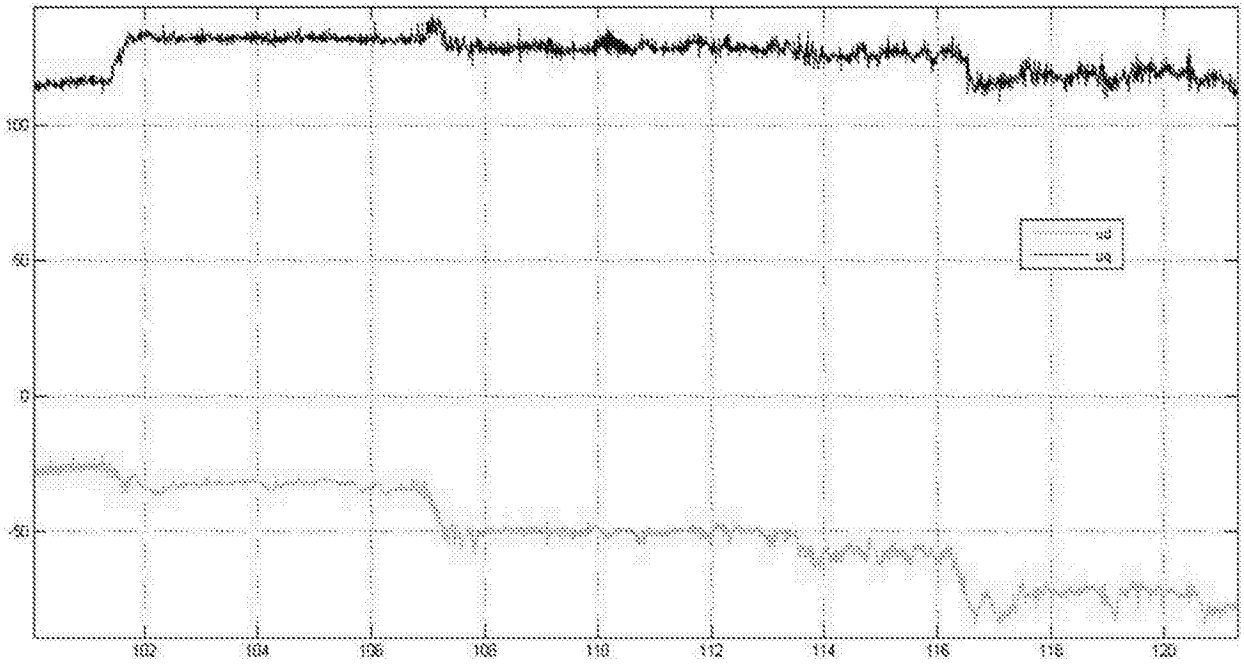


图7

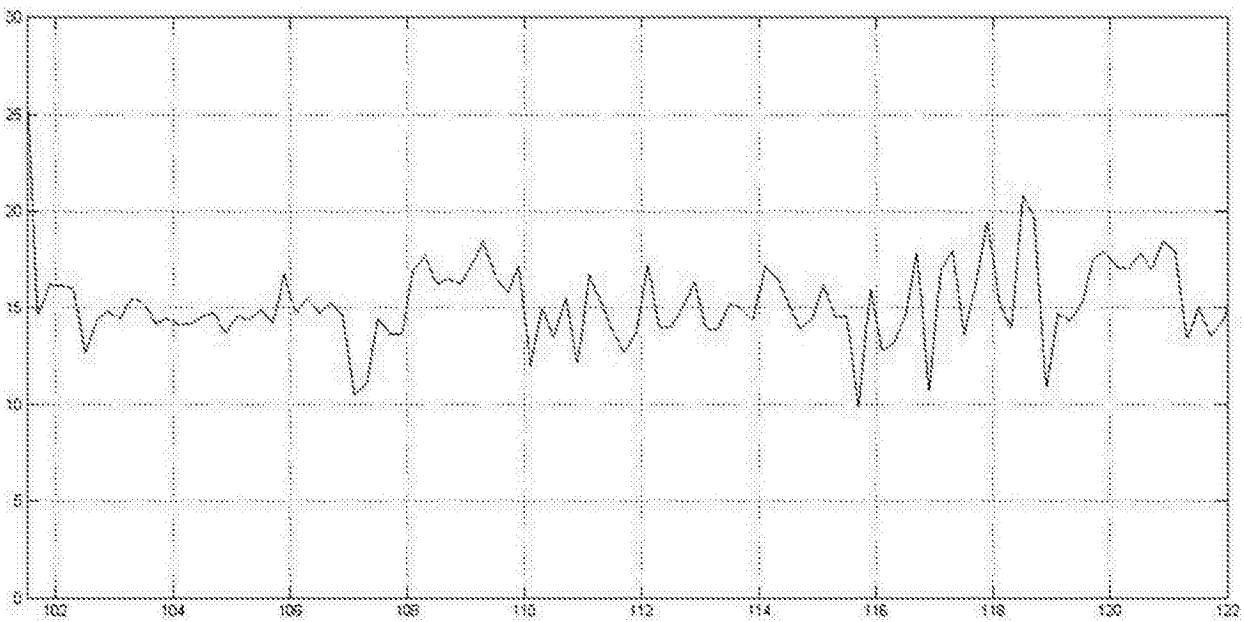


图8