



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105450121 A

(43) 申请公布日 2016.03.30

(21) 申请号 201511026014.1

(22) 申请日 2015.12.30

(71) 申请人 南京埃斯顿自动控制技术有限公司

**地址** 211100 江苏省南京市江宁开发区将军大道 155 号

(72)发明人 吴超 张燚华 孙园园 齐丹丹  
吴波

(74) 专利代理机构 南京天翼专利代理有限责任  
公司 32112

代理人 奚铭

(51) Int. Cl.

H02P 21/00(2016.01)

H02P 21/22(2016.01)

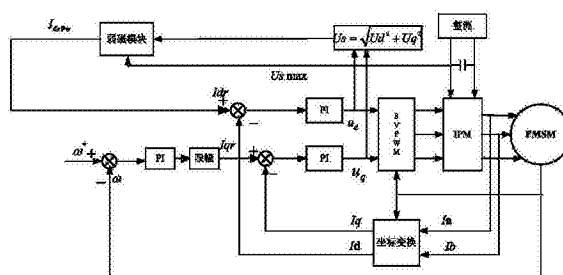
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

# 一种电机弱磁控制方法

(57) 摘要

一种电机弱磁控制方法,为一种基于前馈控制的电压反馈补偿法,首先根据永磁同步电机的直流母线电压确定弱磁极限电压  $U_{smax}$ ,并通过 d、q 轴电压计算得到端电压  $U_s$ ;然后根据弱磁极限电压  $U_{smax}$  和端电压  $U_s$  设计 PI 调节器,得到弱磁调节电流  $I_{dr1}$ ;再考虑电感和永磁体磁链的参数摄动,基于理论公式计算得到弱磁前馈电流  $I_{dr2}$ ;最后将弱磁调节电流  $I_{dr1}$  和弱磁前馈电流  $I_{dr2}$  叠加,得到弱磁算法的直轴补偿电流  $I_{drFW}$ 。本发明能够有效提升永磁同步电机的弱磁控制性能,有效改善现有技术存在的参数难调整、动态性能不理想的问题。



1. 一种电机弱磁控制方法,其特征是为一种基于前馈控制的电压反馈补偿法,具体包括以下步骤:

步骤一:根据永磁同步电机的直流母线电压确定弱磁极限电压 $U_{smax}$ ;

步骤二:通过d、q轴电压计算得到端电压 $U_s$ ;

步骤三:根据弱磁极限电压 $U_{smax}$ 和端电压 $U_s$ 设计PI调节器,得到弱磁调节电流 $I_{dr1}$ ;

步骤四:考虑电感和永磁体磁链的参数摄动,基于理论公式计算得到弱磁前馈电流 $I_{dr2}$ ;

步骤五:将弱磁调节电流 $I_{dr1}$ 和弱磁前馈电流 $I_{dr2}$ 叠加,得到弱磁算法的直轴补偿电流 $I_{drFW}$ 。

2. 根据权利要求1所述的一种电机弱磁控制方法,其特征是所述步骤一具体为:弱磁极限电压 $U_{smax}$ 的理论值为永磁同步电机的控制主电路逆变器能够输出的最大电压幅值,该幅值与直流母线电压大小 $U_{dc}$ 有关,弱磁极限电压 $U_{smax}$ 为 $U_{smax}=U_{dc}/\sqrt{3}$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种电机弱磁控制方法,其特征是所述步骤二具体为:端电压 $U_s$ 为永磁同步电机d轴电压 $U_d$ 和q轴电压 $U_q$ 的平方和的开平方值,即 $U_s=\sqrt{U_d^2+U_q^2}$ 。

4. 根据权利要求1所述的一种电机弱磁控制方法,其特征是所述步骤三具体为:根据步骤一得到的 $U_{smax}$ 和步骤二得到的 $U_s$ ,求得偏差 $e=U_{smax}-U_s$ ,对 $e$ 设计模糊PI调节器,得到弱磁调节电流 $I_{dr1}$ ,模糊PI调节器的构建方法如下:

1) 计算偏差 $e=U_{smax}-U_s$ ,偏差的微分 $e_c=de/dt$ ;

2) 将输入和输出变量的模糊子集表示为7个模糊集的集合 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ ,论域均设定为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ;

3) 确定量化因子 $K_e$ 、 $K_{ec}$ 及比例因子 $K_{KP}$ 、 $K_{KI}$ ,  $K_e=1/e_m$ ,  $K_{ec}=3/e_{cm}$ ,  $K_{KP}=P_m/3$ ,  $K_{KI}=I_m/3$ , 其中 $e_m$ 为 $e$ 的幅值,  $e_{cm}$ 为 $e_c$ 的幅值,  $P_m$ 为输出变量 $\Delta K_P$ 的最大值,  $I_m$ 为输出变量 $\Delta K_I$ 的最大值;

4) 采用三角形隶属度函数,将精确的输入变量模糊化,以确定 $x$ 点在模糊子集中的隶属度;

5) 把在 $[-3, 3]$ 之间变化的连续量分为7档,每档对应一个模糊集,实现模糊化过程;

6) 解模糊,得到最后的 $\Delta K_P$ 和 $\Delta K_I$ 的模糊控制。

5. 根据权利要求1所述的一种电机弱磁控制方法,其特征是所述步骤四具体为:

永磁同步电机的电压方程为:

$$\begin{cases} U_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ U_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

在稳态情况下,有:

$$\begin{cases} U_d = Ri_d - \omega_r L_q i_q \\ U_q = Ri_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (2)$$

在弱磁控制时,  $\sqrt{U_d^2 + U_q^2}$  保持为 $U_{smax}$ 不变,有:

$$U_{s\max}^2 = U_d^2 + U_q^2 = (Ri_d - \omega_r L_q i_q)^2 + (Ri_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f)^2 \quad (3)$$

电机的电阻R很小,忽略 $Ri_d$ 和 $Ri_q$ 项,有:

$$U_{s\max}^2 = U_d^2 + U_q^2 = (\omega_r L_q i_q)^2 + (\omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f)^2 \quad (4)$$

由式(4),得到弱磁前馈电流 $I_{dr2}$ 的计算公式为:

$$I_{dr2} = \frac{\sqrt{U_{s\max}^2 - (\omega_r L_q i_q)^2}}{\omega_r L_d} - \frac{\psi_f}{L_d} \quad (5)$$

式(1)~(5)中, $U_{s\max}$ 为弱磁极限电压; $\omega_r$ 为电机的电角速度; $L_d$ 为电机的d轴电感; $L_q$ 为电机的q轴电感; $i_d$ 为电机的d轴电流, $i_q$ 为电机的q轴电流, $U_d$ 为d轴电压, $U_q$ 为q轴电压; $\psi_f$ 为永磁体磁链。

## 一种电机弱磁控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于自动化控制技术领域,为一种基于前馈控制的电压反馈补偿法,具体为一种电机弱磁控制方法。

### 背景技术

[0002] 永磁同步电机(permanent magnet synchronous machine,PMSM)由于其高功率密度、高可靠性和高效率的优点,在机械加工设备、机器人、电动汽车等要求较高的调速系统中得到了广泛的应用。由于采用永磁体励磁,无法通过励磁绕组调节励磁磁场,永磁同步电机必须采用弱磁技术以满足宽调速范围的调速需求。采用高性能的弱磁技术能够不断扩大电机恒功率运行的转速范围,保持较高的工作效率。

[0003] 目前,本技术领域内现有的弱磁控制技术主要有查表法、公式计算法、梯度下降法和电压反馈补偿法。查表法需要通过实验测定电机在不同转速下需要的直轴电流,因此需要大量的实验数据,实现起来较为复杂。公式计算法对电机参数的依赖很大,只具有一定的理论意义,但不能直接满足工程应用。梯度下降法的计算量较大,实现较为复杂。电压反馈补偿法是通过构建一个电压闭环进行补偿,电压补偿法具有鲁棒性好、计算量小、运行可靠等优点,适用于工程应用。

[0004] 专利申请1,CN200910041656.7《一种基于永磁同步电机的弱磁控制系统及其控制方法》使用了电压反馈法,基于电压闭环采用矢量控制的参考电压作为反馈来实现弱磁。该方法鲁棒性较好,但是存在着动态性能不佳的问题,有待改进。

[0005] 专利申请2,CN201410108255.X《一种增强型永磁同步电机的弱磁控制方法》首先根据电压误差进行PI调节,得到励磁电流分量,然后设计了弱磁前馈算法,具体是将电压误差乘以一个系数作为前馈定向角度,系数通过试凑得到。该方法通过前馈在一定程度上改善了动态响应,但前馈项中的系数试凑缺乏明确的准则,具有一定的盲目性。此外,随着电机运行过程中电感、磁链等参数发生摄动,该方法的精度会受到影响。

### 发明内容

[0006] 本发明要解决的问题是:永磁同步电机现有弱磁控制技术存在的参数难调整、动态性能不理想的问题,提出一种基于前馈控制的电压反馈补偿法,改善永磁同步电机弱磁控制的动态响应性能。

[0007] 本发明的技术方案为:一种电机弱磁控制方法,为一种基于前馈控制的电压反馈补偿法,具体包括以下步骤:

[0008] 步骤一:根据永磁同步电机的直流母线电压确定弱磁极限电压 $U_{smax}$ ;

[0009] 步骤二:通过d、q轴电压计算得到端电压 $U_s$ ;

[0010] 步骤三:根据弱磁极限电压 $U_{smax}$ 和端电压 $U_s$ 设计PI调节器,得到弱磁调节电流 $I_{dr1}$ ;

[0011] 步骤四:考虑电感和永磁体磁链的参数摄动,基于理论公式计算得到弱磁前馈电流 $I_{dr2}$ ;

[0012] 步骤五:将弱磁调节电流 $I_{dr1}$ 和弱磁前馈电流 $I_{dr2}$ 叠加,得到弱磁算法的直轴补偿电流 $I_{drFW}$ 。

[0013] 本发明的显著特征在于弱磁前馈部分,应用于弱磁模块的PI调节器可以为传统PI调节器,也可以为模糊PI调节器,或其它形式的PI调节器。用于不同形式的PI调节器,原理上相同的是输入都是偏差 $e$ ,输出都是弱磁调节电流 $I_{dr1}$ ,区别是PI的具体算法有所不同。传统PI调节器是现有技术,不再详述,本发明详细进一步介绍了模糊PI调节器的设置。

[0014] 本发明与背景技术的两份专利文献的相同之处是,都使用了电压反馈法。

[0015] 本发明和专利申请1的区别是:发明专利一没有弱磁前馈,而本发明增加了弱磁前馈。

[0016] 本发明和专利申请2的区别是:前馈的构造方式不一样,专利申请2使用电压误差乘以一个系数作为前馈,本发明是基于电机模型计算弱磁前馈电流,且在使用前馈时考虑电感和永磁体磁链的参数摄动。

[0017] 本发明使用了弱磁前馈,现有技术中,使用这一技术特征的有以下两份文献:

[0018] 文献一《内置式永磁同步电动机弱磁控制实验研究》(王莹,唐任远,曹先庆,朱建光,《微电机》2008年第11期),以内置式永磁同步电动机为研究对象,根据电机运行时的转矩和定子磁链给定值,通过查表得出电机的交、直轴电流参考值;同时为了解决电机高速运行时的参数漂移问题,在前馈控制的基础上叠加了基于输出电压的闭环控制策略,有效地提高了系统的鲁棒性。

[0019] 文献二《Feedforward Flux-Weakening Control of Surface-Mounted Permanent-Magnet Synchronous Motors Accounting for Resistive Voltage Drop》(Marco Tursini, Enzo Chiricozzi, and Roberto Petrella, IEEE Transactions on Industrial Electronics (Impact Factor: 6.5). 02/2010; 57(1): 440-448.)以表贴式永磁同步电机为研究对象,分别针对浅弱磁区和深弱磁区,基于反馈转速和前一时刻的定子电流设计了弱磁前馈,使得电机可以可靠地工作在大范围弱磁区域。

[0020] 本发明和文献一的区别是:前馈的获取方式不同,文献一使用查表的方法来获得弱磁前馈值,本发明是基于电机模型、采用理论公式计算弱磁前馈电流。由于文献一采用的方法是查表法,具有算法精度较低、测试工作量大的缺点,本发明的算法基于模型本身,具有精度较高、使用方便的优点。

[0021] 本发明和文献二的区别是文献二只用了前馈的方法,具有鲁棒性差的缺点;而本发明在前馈的基础上结合了电压反馈法,提升了弱磁控制的鲁棒性。

[0022] 本发明能够有效提升永磁同步电机的弱磁控制性能,有效改善现有技术存在的参数难调整、动态性能不理想的问题,具体表现为:

[0023] 1)现有技术使用电压误差乘以一个系数作为弱磁前馈,前馈项中的系数要用试凑法来确定。本发明基于电机模型计算弱磁前馈电流,计算公式中所有参数都是已知的,不需要通过试凑的方法得到,避免了调节过程中的盲目性。而且本发明中的弱磁前馈电流计算公式还考虑了电感和永磁体磁链的参数摄动,避免了电机运行状态的变化而导致参数漂移的影响,提高了系统的控制精度。

[0024] 2)图5~7的实验结果充分说明了本发明的优点。其中从图5所示转速跟踪的结果中可以看出:给定转速4000rpm,现有技术的超调是60rpm,本发明的超调是20rpm。从图6所

示现有技术直轴电流跟踪的波形中可以看出:现有技术存在直轴电流局部过冲的特点,动态过程的波形较陡峭。从图7所示本发明直轴电流跟踪的波形中可以看出:本发明不存在直轴电流局部过冲的问题,动态过程的波形相对较平缓。综上所述,相比现有技术,本发明具有转速超调小,直轴电流无局部过冲,电流跟踪过渡过程平缓,动态性能优越。

## 附图说明

[0025] 图1是本发明应用于电机时的总体方案控制原理图,图中 $I_{qr}$ 为直轴给定电流, $I_{qr}$ 为交轴给定电流。

[0026] 图2是本发明的弱磁控制原理图。

[0027] 图3是在本发明中模糊PI的控制原理图。

[0028] 图4是本发明中模糊PI控制的隶属度函数波形图。

[0029] 图5是永磁同步电机给定阶跃转速4000rpm的情况下,现有技术和本发明的转速实验结果对比图。

[0030] 图6是现有技术的d轴电流跟踪实验结果,图中 $I_d$ 定义为直轴反馈电流。

[0031] 图7是本发明的d轴电流跟踪实验结果。

## 具体实施方式

[0032] 本发明为一种基于前馈控制的电压反馈补偿法,图1是本发明用于电机中的控制原理图,图2对应图1中的弱磁模块,为本发明的弱磁控制原理图,图3对应于图2中的模糊PI部分,为具体的模糊PI控制原理图。

[0033] 下面结合附图对本发明的实施例作详细设计步骤说明。

[0034] 步骤一:根据直流母线电压确定弱磁极限电压 $U_{smax}$ 。

[0035] 弱磁极限电压 $U_{smax}$ 的理论值为永磁同步电机的控制主电路逆变器能够输出的最大电压幅值,该幅值与直流母线电压大小 $U_{dc}$ 有关,关系式为 $U_{smax}=U_{dc}/\sqrt{3}$ 。

[0036] 步骤二:通过d、q轴电压计算得到端电压 $U_s$ 。

[0037] 端电压定义为永磁同步电机d轴电压 $U_d$ 和q轴电压 $U_q$ 的平方和的开平方值,即

$$U_s = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}。$$

[0038] 步骤三:根据 $U_{smax}$ 和 $U_s$ 设计模糊PI调节器,得到弱磁调节电流 $I_{dr1}$ 。

[0039] 根据步骤一得到的 $U_{smax}$ 和步骤二得到的 $U_s$ ,求得误差值 $e = U_{smax} - U_s$ 。对 $e$ 设计模糊PI调节器,得到弱磁调节电流 $I_{dr1}$ 。模糊PI的构建方法如下:

[0040] 1)计算偏差 $e = U_{smax} - U_s$ ,偏差的微分 $e_c = de/dt$ ;

[0041] 2)将输入和输出变量的模糊子集表示为7个模糊集的集合{NB,NM,NS,ZE,PS,PM,PB},论域均设定为{-3,-2,-1,0,1,2,3};模糊子集可由7个语言变量值描述,分别为:负大NB,负中NM,负小NS,零ZE,正小PS,正中PM和正大PB,对应7个模糊集;

[0042] 3)确定量化因子 $K_e$ 、 $K_{ec}$ 及比例因子 $K_{KP}$ 、 $K_{KI}$ 。 $K_e = 1/e_m$ , $K_{ec} = 3/e_{cm}$ , $K_{KP} = P_m/3$ , $K_{KI} = I_m/3$ ,其中 $e_m$ 为 $e$ 的幅值, $e_{cm}$ 为 $e_c$ 的幅值, $P_m$ 为输出变量 $\Delta K_P$ 的最大值, $I_m$ 为输出变量 $\Delta K_I$ 的最大值;

[0043] 4)采用图4所示的三角形隶属度函数,将精确的输入变量模糊化,以确定 $x$ 点在模

糊子集中的隶属度；

[0044] 5)把在 $[-3, 3]$ 之间变化的连续量分为7档,每档对应一个模糊集,实现模糊化过程。如表1所示；

[0045] 表1模糊化处理

[0046]

x范围	$(-\infty, -2.5)$	$[-2.5, -1.5)$	$[-1.5, -0.3]$	$(-0.3, 0.3)$	$[0.3, 1.5]$	$(1.5, 2.5]$	$(2.5, \infty)$
模糊集	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB

[0047] 6)解模糊,得到最后的模糊控制如表2和表3所示。

[0048] 表2  $\Delta K_P$ 的模糊控制

[0049]

$e$	$e_c$						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	2	2	1	1	0
-2	3	2	2	2	1	0	1
-1	2	2	2	1	0	1	2
0	2	2	1	0	1	2	3
1	2	1	0	1	2	3	3
2	1	0	1	2	3	3	3
3	0	1	2	3	3	3	3

[0050] 表3  $\Delta K_I$ 的模糊控制

[0051]

$e$	$e_c$						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-2	-1	-1	0	0	1	1
-2	-1	-1	0	0	1	1	2
-1	-1	-1	0	0	1	2	3
0	0	0	1	1	2	3	3
1	0	1	1	2	3	3	3
2	1	1	2	3	3	3	3
3	1	2	3	3	3	3	3

[0052] 步骤四:考虑电感和永磁体磁链的参数摄动,计算得到弱磁前馈电流 $I_{dr2}$ 。

[0053] 永磁同步电机的电压方程为:

$$[0054] \quad \begin{cases} U_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ U_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases}, \quad (1)$$

[0055] 在稳态情况下,有:

$$[0056] \quad \begin{cases} U_d = Ri_d - \omega_r L_q i_q \\ U_q = Ri_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases}, \quad (2)$$

[0057] 在弱磁控制时,  $\sqrt{U_d^2 + U_q^2}$  是保持为  $U_{smax}$  不变的, 有:

$$[0058] \quad U_{smax}^2 = U_d^2 + U_q^2 = (Ri_d - \omega_r L_q i_q)^2 + (Ri_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f)^2, \quad (3)$$

[0059] 电机的电阻  $R$  一般很小, 忽略  $Ri_d$  和  $Ri_q$  项, 有:

$$[0060] \quad U_{smax}^2 = U_d^2 + U_q^2 = (\omega_r L_q i_q)^2 + (\omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f)^2, \quad (4)$$

[0061] 由式(4), 得到弱磁前馈电流  $I_{dr2}$  的理论计算公式为

$$[0062] \quad I_{dr2} = \frac{\sqrt{U_{smax}^2 - (\omega_r L_q i_q)^2}}{\omega_r L_d} - \frac{\psi_f}{L_d}. \quad (5)$$

[0063] 式(1)~(5)中,  $U_{smax}$  为弱磁极限电压;  $\omega_r$  为电机的电角速度;  $L_d$  为电机的  $d$  轴电感;  $L_q$  为电机的  $q$  轴电感;  $i_d$  为电机的  $d$  轴电流,  $i_q$  为电机的  $q$  轴电流,  $U_d$  为  $d$  轴电压,  $U_q$  为  $q$  轴电压;  $\psi_f$  为永磁体磁链。式(5)中的  $L_d$ 、 $L_q$ 、 $\psi_f$  会随着电机的运行状态而改变, 需要在使用  $L_d$ 、 $L_q$ 、 $\psi_f$  之前进行离线测量。

[0064]  $L_d$ 、 $L_q$  几乎不随转速的变化而变化, 但随电机电流的增大而减小, 通过测试电机处于不同电流条件下对应的电感, 获取电感-电流曲线。测试方法为: 使电机处于额定转速条件下运行, 给定不同的  $i_d$  和  $i_q$ , 测量得出在各个  $i_d$  和  $i_q$  下的  $L_d$ 、 $L_q$ , 对测量得出的数据进行曲线拟合, 从而获得电感-电流曲线, 即  $L_d = f1(i_d, i_q)$  曲线和  $L_q = f2(i_d, i_q)$  曲线。

[0065]  $\psi_f$  随温度  $T$  的升高而变小, 通过测试电机处于不同温度条件下对应的  $\psi_f$  得到永磁体磁链-温度表格。测试方法为: 使电机处于额定转速下连续运行, 电机温度随着运行时间的加长而升高, 测量得出在各个温度  $T$  下的永磁体磁链  $\psi_f$ , 从而获得永磁体磁链-温度表格, 即  $\psi_f$ - $T$  表格,  $\psi_f$  查此表格用两点插值法得到。

[0066] 将离线实验得到的变化值  $L_d$ 、 $L_q$ 、 $\psi_f$  和  $U_{smax}$ 、 $\omega_r$ 、 $i_q$  代入到式(5)中, 得到  $I_{dr2}$ 。

[0067] 步骤五: 将弱磁调节电流  $I_{dr1}$  和弱磁前馈电流  $I_{dr2}$  叠加, 得到弱磁算法的直轴补偿电流  $I_{drFW}$ 。弱磁算法的直轴补偿电流为  $I_{drFW} = I_{dr1} + I_{dr2}$ 。以上计算得到的  $I_{drFW}$  用作直轴给定电流  $I_{dr}$ , 即  $I_{dr} = I_{drFW}$ 。

[0068] 图5-7为本发明的实施结果, 可见本发明方法下, 电机转速超调小, 直轴电流无局部过冲, 电流跟踪过渡过程平缓, 动态性能优越。

[0069] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。上述实施例不以任何方式限制本发明, 凡是采用等同替换或等效变换的方式获得的技术方案均落在本发明的保护范围内。本发明重点保护弱磁前馈部分, 应用于弱磁模块的PI调节器无论使用何种形式, 均落在本发明的保护范围内。





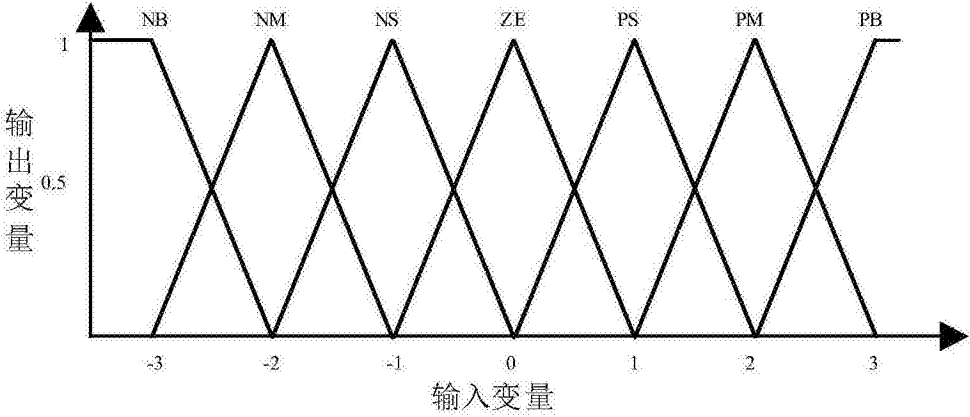


图4

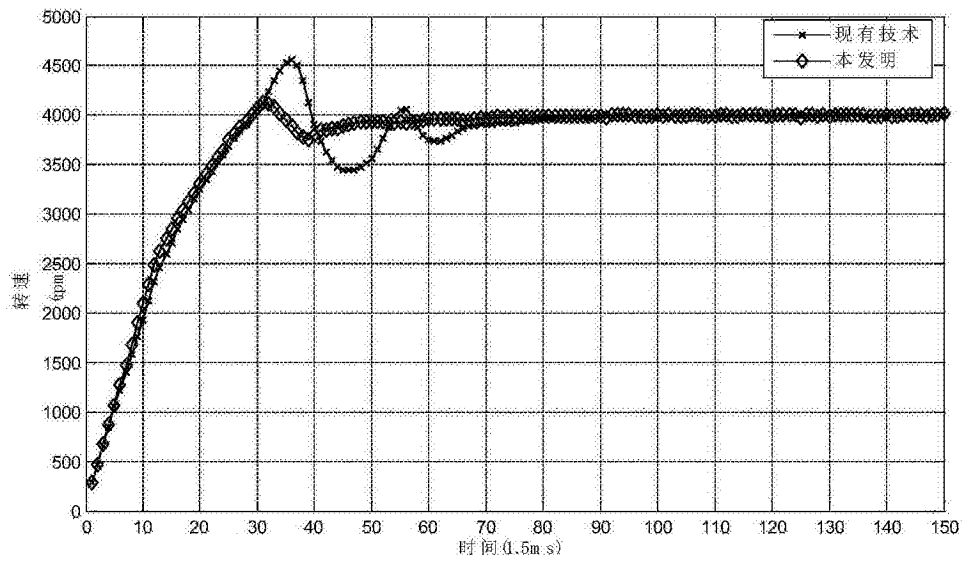


图5

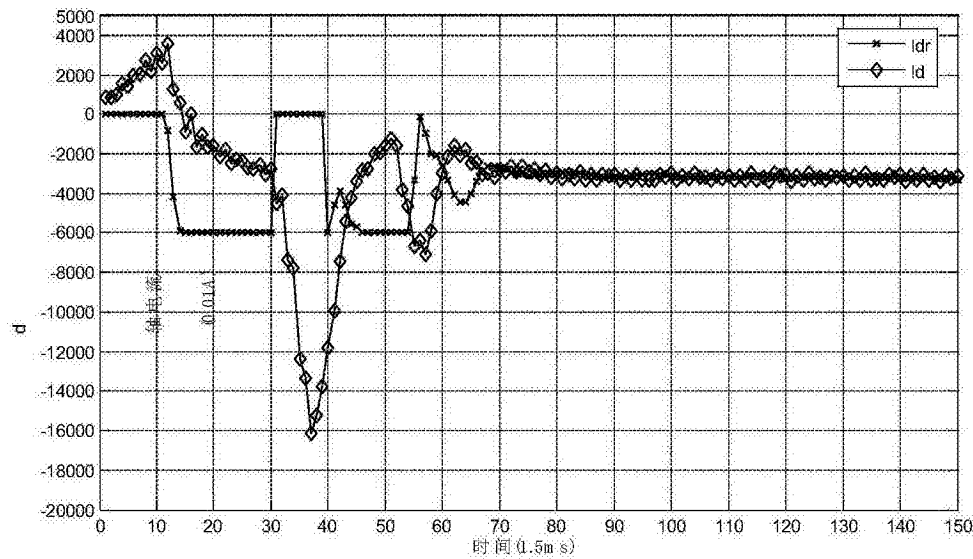


图6

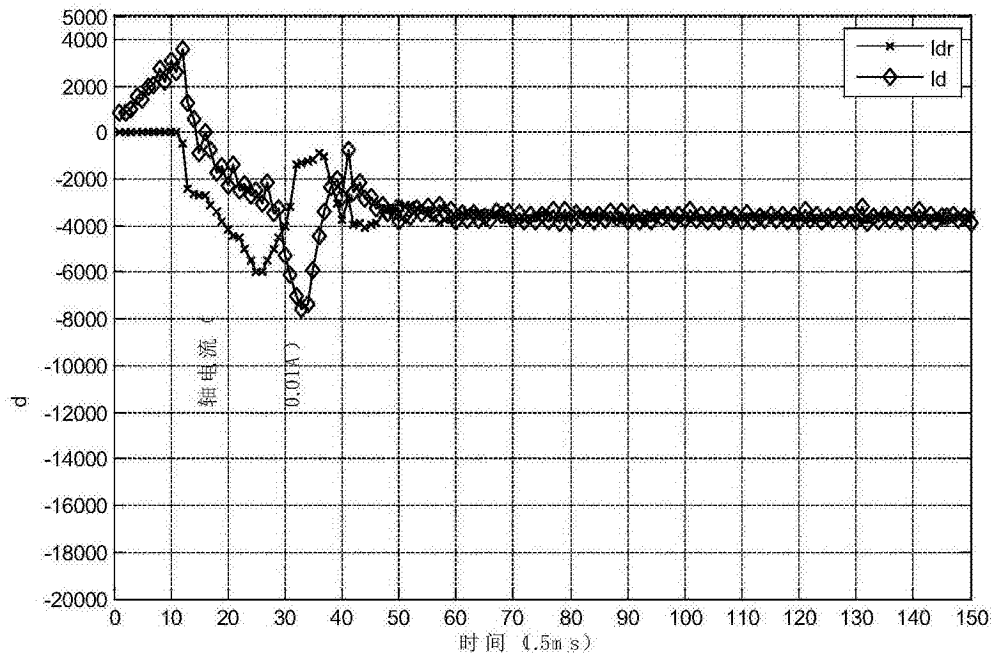


图7