

定子永磁型双凸极非稀土永磁电机谐波电流抑制*

潘绪前, 朱孝勇, 左月飞, 张超, 全力
(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 定子永磁型双凸极非稀土永磁电机(NRE-DSPM)采用剩磁较高的铝镍钴(AlNiCo)永磁代替传统的稀土永磁,降低电机制作成本的同时也可配合磁化绕组对电机气隙磁场进行调节,使电机获得较好的性能。但受电机本体参数影响,NRE-DSPM在运行时相电流中含有大量的谐波,严重影响电机的效率和稳定性。为解决此问题,采用了一种PI控制器并联谐振调节器的电流环控制方法。该方法结构简单,易于实现,且无需增加硬件成本,可对电流谐波进行有效抑制。一台1.25 kW的NRE-DSPM样机在试验平台上进行了试验,试验结果验证了所用方法的有效性。

关键词: 非稀土类电机; 定子永磁型双凸极电机; 谐振调节器; 谐波电流抑制

中图分类号: TM **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)11-0072-07

The Current Suppression of Doubly Salient Permanent Magnet Motor with Non-Rare-Earth*

PAN Xuqian, ZHU Xiaoyong, ZUO Yuefei, ZHANG Chao, QUAN Li

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: AlNiCo permanent magnet was used in doubly salient permanent magnet motor with non-rare-earth (NRE-DSPM) to replace traditional rare earth permanent magnet, which could reduce the production cost of the motor, and the air-gap magnetic field of NRE-DSPM could be adjusted by the magnetizing windings to improve the performance of the motor. However, due to the influence of the motor parameters, a large number of harmonics existed in the phase current of NRE-DSPM motor, which seriously affected the efficiency and stability of the motor. To solve this problem, a current loop control method based on PI controller parallel resonant regulator was adopted. The method was simple and easy to implement, and does not need to increase the hardware circuit cost, could effectively suppress the current harmonics. Experiments were finished on a 1.25 kW NRE-DSPM experimental platform, and the effectiveness of the method was verified by the experimental results.

Key words: non-rare-earth motor; doubly salient permanent magnet motor; resonant regulator; harmonic current suppression

0 引言

稀土永磁电机因其结构简单、转矩密度高、性能好等优点而被广泛应用于工业传动领域。但随着稀土价格的上升,稀土永磁电机的成本也变得十分昂贵,因此越来越多的学者把目光聚集在非稀土类电机上。非稀土类电机使用非稀土永磁代

替传统的稀土永磁来进行励磁,虽然降低了电机的制作成本,但其性能远弱于稀土永磁电机。为解决此问题,学者们通常采用转矩密度较大的电机结构来提高非稀土类电机的电磁转矩。

定子永磁型双凸极电机是一种较为新颖的结构,将定子永磁型电机结构简单的特点与双凸极电机转矩密度较大的优点充分结合起来,使电机

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51477069); 国家自然科学基金项目(51377073)

作者简介: 潘绪前(1991—),男,硕士研究生,研究方向为非稀土永磁电机及其驱动系统。

朱孝勇(1975—),男,博士生导师,教授,研究方向为永磁电机设计、分析与驱动控制等。

具有较大的转矩输出能力^[1]。本文所研究的定子永磁型双凸极非稀土永磁电机 (Doubly Salient Permanent Magnet Motor with Non-Rare - Earth, NRE-DSPM) 就是以定子永磁型双凸极结构为基础, 在转子上使用 AlNiCo 永磁材料代替传统的稀土永磁材料, 使电机获得较好的转矩性能。同时由于 AlNiCo 剩磁很高, 短时间内磁性不会发生变化, 因此配合磁化绕组还可对 NRE-DSPM 进行在线或者离线充磁, 增强电机反电动势, 提高电机性能。但在 NRE-DSPM 实际运行中, 受电机本体参数及控制系统的影响, 电流中出现了大量的谐波, 长时间运行会引起电机发热, 大大影响电机运行时的效率和安全性。产生谐波电流的主要原因有:

(1) 电机反电动势中含有较多的谐波反电动势, 并最终影响相电流。

(2) 逆变器非线性也会引起相电流中 5、7 次谐波增大^[2]。

(3) 在进行各种优化的情况下, NRE-DSPM 正负半周的磁路仍呈现出不对称的状况, 引起交直流电感波动较大, 最终导致 NRE-DSPM 相电流中出现了大量偶次谐波。

抑制谐波电流可从电机本体或驱动两个方向实现。电机本体方面主要是通过优化电机本体相关的结构参数^[3-4], 改善气隙磁场正弦度为主。受电机结构和生产加工成本等因素的影响, 此类方法存在一定的局限性。因此, 大多数研究都集中在如何从控制方法上实现电流谐波的抑制。

为抑制由逆变器非线性引起的谐波电流, 文献[5]从优化 PWM 波入手, 利用 SVPWM 算法的调制特点, 通过计算重新组合开关状态实现对特定谐波的消去, 并取得了理想的效果, 但其算法无法消除反电动势谐波带来的影响。为实现对各种因素所引起的谐波电流的抑制, 文献[6]利用谐波注入的原理, 来抵消 dq 轴中的特定频率波动, 可减小谐波电流的含量, 但此算法需要增加多个 PI 调节器及低通滤波器, 很难取得理想的效果。文献[7]采用重复控制对 dq 轴上的 6、12 次谐波进行抑制, 但重复控制算法比较复杂, 需要较大的存储空间, 当频率变化时, 控制器的参数要重新计算, 实现起来比较困难。

由于谐振调节器结构简单, 易于实现, 对交流信号的调节能力较强, 因此近年来也被应用到

PMSM 电机调速系统中, 对谐波电流进行抑制, 并取得了很好的效果^[8-10]。故本文在电流环采用了谐振调节器与 PI 控制器并联的控制结构, 形成比例积分谐振器 (Proportional Integral Resonator, PIR), 对 dq 轴的特定次正弦扰动进行抑制, 并在一台 NRE-DSPM 样机上验证了此算法的有效性。

1 NRE-DSPM 介绍

1.1 电机结构

本文研究的 12/8 型 NRE-DSPM 结构图如图 1 所示。为验证电机的实际性能, 搭建了基于 dSPACE 系统的 1.25 kW NRE-DSPM 试验平台, 如图 2 所示。

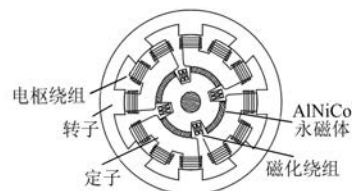


图 1 NRE-DSPM 结构图

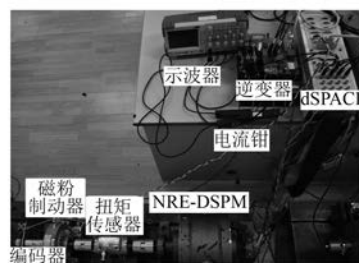


图 2 NRE-DSPM 试验平台

该电机继承了传统的双凸极永磁电机结构的优点, 转子上不放置任何绕组和永磁体, 简单可靠。由于增加了磁化绕组, 因此将定子设计为两层, 外层定子为传统的凸极式结构并绕有集中式电枢绕组, 内层定子嵌有 4 块径向充磁的 AlNiCo 永磁并绕有磁化绕组。此外, 在双层定子结构中, 因为永磁体和电枢绕组分别置于内外两层, 可以大大减小电枢反应对 AlNiCo 永磁体工作点的影响^[11]。

由于 AlNiCo 永磁材料的剩磁较高, 在短暂时间内磁性不会改变, 因此在 AlNiCo 永磁体上增加一套磁化绕组并设计独立的励磁电路对其进行充去磁。通过单独对绕组磁化电流的控制, 不仅可以在离线的情况下增强 NRE-DSPM 的气隙磁场,

也可以在线对电机磁场进行调节,使电机能够适应大功率运行。

1.2 NRE-DSPM 反电动势特性

由于 NRE-DSPM 具有磁通在线可调的特点,故其磁链方程也跟传统永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)的磁链方程有所区别,设电机满磁化状态下的磁链为 ψ_{pm_max} , 可得 NRE-DSPM 在任意磁化状态下的磁链表达式:

$$\psi_{pm} = k(i_{plus})\psi_{pm_max} \quad (1)$$

则 NRE-DSPM 反电动势的表达式为

$$E_{pm} = k(i_{plus})E_{pm_max} \quad (2)$$

式中: k ——磁场调节系数 ($0 \leq k \leq 1$), 是关于变量 i_{plus} 的函数;

i_{plus} ——磁化绕组中的电流脉冲;

E_{pm_max} ——满磁化状态下的反电动势幅值。

根据式(2)可以看出,与传统的 PMSM 相比, NRE-DSPM 反电动势方程中增加了特有的磁场调节系数 k 。

为研究电机反电势特性,在 150 r/min 转速下测试了不同磁化状态下的 NRE-DSPM 电机反电势,如图 3 所示。

由实测反电势可看出,由于 AlNiCo 永磁材料有多重磁化状态,导致 NRE-DSPM 不同的反电

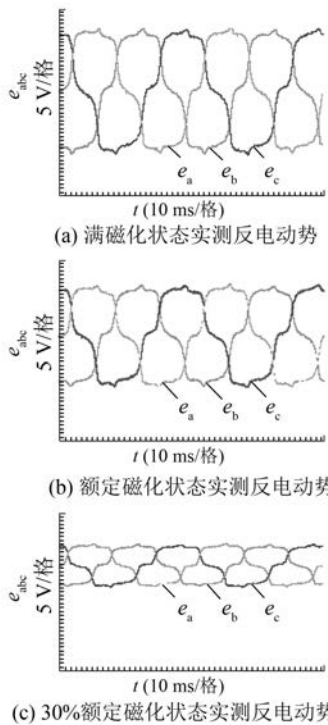


图3 不同磁化状态下实测反电势

动势,体现了电机的灵活性。但不论何种磁化状态,电机反电动势畸变均比较严重。对三种状态下的反电动势进行 FFT 对比分析,结果如图 4 所示。由图 4 可看出,各种磁化状态下的反电动势 THD 基本相同,说明通过控制磁化电流只会改变气隙磁场的强度,而不会改变反电动势谐波的比例,故只需选择一种磁化状态进行分析即可。

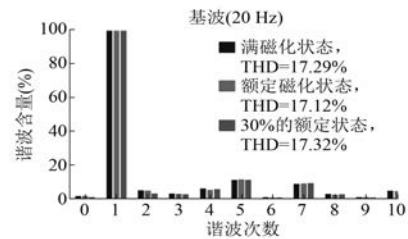


图4 不同磁化状态反电动势 FFT 对比

1.3 电感特性

NRE-DSPM 受转子结构和永磁体排列方式等因素的影响,磁路出现了不对称,导致每相自感在一个电流周期内不再是正负半周对称,并引起交直流电感波动。NRE-DSPM 电感波形如图 5 所示,一个电流周期为 37.5 ms,取两个周期的数据。由图 5 可明显看出,一个电流周期内,正负半周的电感不再对称,交直流电感的波动主要以 3 倍频为主。电感是电机的重要参数,当交直流电感波动较大时,必然会影响电机运行。

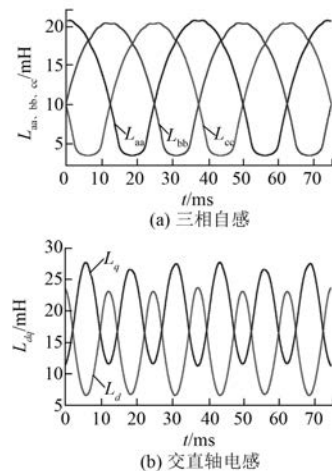


图5 NRE-DSPM 电感波形

2 NRE-DSPM 电流谐波分析

2.1 NRE-DSPM 数学模型

由传统 PMSM 数学模型,可将 NRE-DSPM 在

dq 轴坐标系下的数学模型改写成:

$$\begin{cases} u_d = L_d \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = L_q \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega_e [\psi_{pmf} + L_d i_d] \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_d 、 u_q 、 L_d 、 L_q 、 i_d 、 i_q —— dq 轴上的等效电压、等效电感和等效电流;

R ——定子电阻,在 dq 轴的等效值相同;

ω_e ——电机角速度;

ψ_{pmf} ——旋转坐标系下 NRE-DSPM 的永磁体磁链,则 $\omega_e \psi_{pmf}$ 为 NRE-DSPM 在旋转坐标系下的反电动势,理想状态下为直流量。

根据式(1)和式(2),可将式(3)改写为

$$\begin{cases} u_d = L_d \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = L_q \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega_e L_d i_d + k(i_{plus}) E_{pmf_max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_{pmf_max} ——NRE-DSPM 电机满磁化状态下的反电动势。

当 NRE-DSPM 反电动势畸变较大和电感不对称时会导致 L_d 、 L_q 、 E_{pmf_max} 产生波动,则最终引起 dq 轴电压、电流波动。式(4)也说明了反电动势畸变和磁路不对称是 NRE-DSPM 产生谐波电流的主要原因。

鉴于空间电压矢量控制方法具有结构简单、直流电压利用率高、电流谐波小等优点,本文依旧采用空间电压矢量控制策略对 NRE-DSPM 的性能进行分析。基于空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 的 NRE-DSPM 控制系统框图如图 6 所示。其中,转速环 PI 设计采用文献[12]中的复合 PI 控制器设计方法。电流环 PI 采用反电动势补偿 PI 控制器,参数设计采用零极点对消的方式来选取。

2.2 开环电流分析

为说明电机气隙磁场和电感等参数对电机相电流的影响,给 NRE-DSPM 通入幅值为 12 V、频率为 20 Hz、相位相差 120°的理想三相正弦电压,即电流开环试验,得到此时的 A 相空载电流及 dq 轴电流,如图 7(a)所示。由图 7(a)可以看出,在

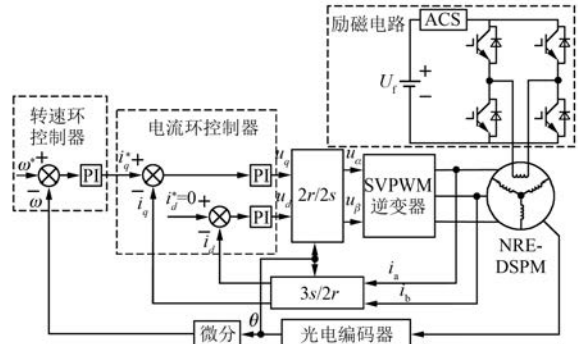


图 6 基于 SVPWM 的 NRE-DSPM 控制系统

理想正弦电压作用下 NRE-DSPM 产生的相电流畸变比较大,受磁路不对称的影响,相电流也出现了上下不对称的情况。根据傅里叶分解原理可知,当电流正负半周不对称时,就会出现偶次谐波。对图 7(a)所示的相电流进行 FFT 分析,结果如图 7(b)所示。

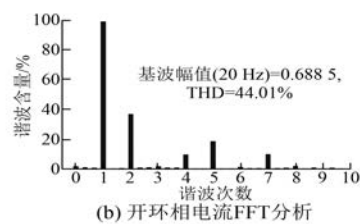
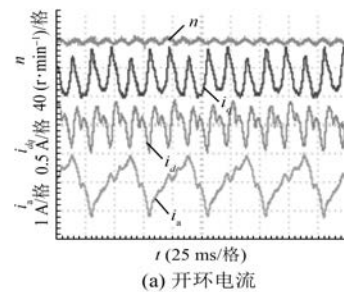


图 7 开环实测电流

对于三相负载来说,偶次谐波电流的危害远大于奇次谐波电流,不仅会给电机带来更多的损耗,还会导致电机温升过快,严重威胁电机的安全和寿命。图 7 说明,NRE-DSPM 参数不理想时会给相电流带来大量的谐波。

2.3 dq 轴电流谐波分析

在传统的电机调速系统中,由各种因素造成的相电流谐波在 $3s/2r$ 作用下最终变为 dq 轴电流的波动。由于本文所研究电机的相电流中含有非常规的偶次谐波电流,故为方便分析,重新推导了

dq 轴电流的表达式。由图 7 分析结果可知, NRE-DSPM 相电流中以 2、4、5、7 次谐波为主, 忽略其他次谐波影响, 定子相电流可写成如下形式:

$$\left\{ \begin{aligned} i_a &= I_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1) + I_{m2} \cos(2\omega t + \varphi_2) + \\ & I_{m4} \cos(4\omega t + \varphi_4) + I_{m5} \cos(5\omega t + \varphi_5) + \\ & I_{m7} \cos(7\omega t + \varphi_7) + \dots \\ i_b &= I_{m1} \cos(\omega t - 2\pi/3 + \varphi_1) + \\ & I_{m2} \cos(2\omega t + 2\pi/3 + \varphi_2) + \\ & I_{m4} \cos(4\omega t - 2\pi/3 + \varphi_4) + \\ & I_{m5} \cos(5\omega t + 2\pi/3 + \varphi_5) + \\ & I_{m7} \cos(7\omega t - 2\pi/3 + \varphi_7) + \dots \\ i_c &= I_{m1} \cos(\omega t + 2\pi/3 + \varphi_1) + \\ & I_{m2} \cos(2\omega t - 2\pi/3 + \varphi_2) + \\ & I_{m4} \cos(4\omega t + 2\pi/3 + \varphi_4) + \\ & I_{m5} \cos(5\omega t - 2\pi/3 + \varphi_5) + \\ & I_{m7} \cos(7\omega t + 2\pi/3 + \varphi_7) + \dots \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中: ω ——电流基波角频率;

φ ——各次谐波电流的初始相位, 在 NRE-DSPM 控制系统中 ω 与 ω_e 是同一概念。

将式(5)表示的三相电流由静止坐标系等幅值变换到旋转坐标系, 可得 dq 轴电流的表达式:

$$\left\{ \begin{aligned} i_d &= I_{d1} + I_{m2} \cos(-3\omega t + \varphi_2) + \\ & I_{m4} \cos(3\omega t + \varphi_4) + \\ & I_{m5} \cos(-6\omega t + \varphi_5) + \\ & I_{m7} \cos(6\omega t + \varphi_7) + \dots \\ i_q &= I_{q1} + I_{m2} \sin(-3\omega t + \varphi_2) + \\ & I_{m4} \sin(3\omega t + \varphi_4) + \\ & I_{m5} \sin(-6\omega t + \varphi_5) + \\ & I_{m7} \sin(6\omega t + \varphi_7) + \dots \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中: i_{d1} 、 i_{q1} ——基波电流在基次同步旋转坐标系下的 d 轴和 q 轴分量。

由式(6)可看出, dq 轴电流中主要谐波是 3、6 次谐波电流, 其中, 相电流中的 2、4 谐波电流共同作用生成了 dq 轴 3 次谐波电流, 相电流中的 5、7 次谐波共同作用生成了 dq 轴 6 次谐波电流。

2.4 闭环电流分析

对电流进行闭环控制, 加入 PI 控制器, 给定 $i_q = 1 \text{ A}$, $i_d = 0 \text{ A}$, 角频率为 20 Hz, 得到实测闭环电流, 如图 8(a) 所示, 其 FFT 分析结果如图 8(b)

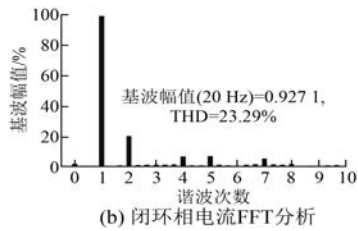
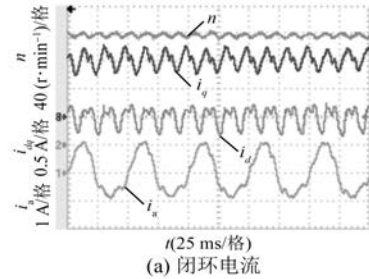


图 8 闭环实测电流

所示。

结合图 8 和图 7 的试验和分析结果可以看出, 通过电流环 PI 控制器能够在一定程度上减小 dq 轴电流的扰动和相电流的畸变程度, 但效果并不是很好。这也说明了 PI 控制器对交流量的调节能力有限^[13], 虽然调大 PI 控制器的参数可以取得更好的效果, 但同时会增大系统的噪声。因此, 为更好地实现电机稳定高效运行, 本文结合了结构比较简单的谐振调节器来对谐波电流进行抑制。

3 谐波电流抑制方法

3.1 谐振调节器

谐振调节器由内模控制推导而来^[14]。内模控制可根据外部扰动的性质在控制器中加入相应的扰动信号模型, 便可抵消外部扰动信号的作用。加入正弦信号模型的内模控制器就是谐振调节器, 理想谐振控制器的模型为:

$$G(s) = \frac{2k\omega_r s}{s^2 + \omega_r^2} \quad (7)$$

式中: $2k\omega_r$ ——谐振系数;

ω_r ——谐振频率。

由式(7)可知, 谐振调节器在谐振频率点处的增益无穷大, 能够实现对特定频率正弦信号的无静差跟踪, 而当正弦信号作为外部扰动时, 也可对其进行抑制。谐振调节器广泛用于有源滤波器及 PWM 整流器和逆变器中^[15-16], 能够有效抑制交流侧的谐波电流和电压。在电机控制系统中,

dq 轴电流扰动的频率与转速基波频率为整数倍关系,故 dq 轴电流谐波次数可由角频率 ω_e 来估算。根据这个特点,谐振调节器也完全适用于 PMSM 的控制系统,谐振频率 ω_r 与电机角频率 ω_e 有关^[17]。

3.2 电流环 PIR 控制器

由于矢量控制是在同步旋转坐标系下对 dq 轴电流进行控制,在抑制 dq 轴电流扰动的同时还需兼顾直流量的调节。故谐振调节器用在 PMSM 控制系统中时一般采用 PI 并联谐振调节器的控制结构,形成比例-积分-谐振环节,简称比例积分谐振器 (PIR),由比例-积分环节实现直流量的无静差跟踪,由谐振环节抑制特定频率的电流扰动,便可实现对直流量和交流量的共同调节。

为较好地抑制 dq 轴电流的波动,本文采用了文献[18]所用的 PIR 控制器结构,以 q 轴为例,基于 PIR 的 NRE-DSPM 电流谐波抑制结构框图如图 9 所示。其中 $D(\omega t)$ 是 dq 轴扰动。由 NRE-DSPM 的实际 dq 轴扰动电流主要是 3、6 次谐波,故在电流环上采用 3 次和 6 次 PIR 控制器。

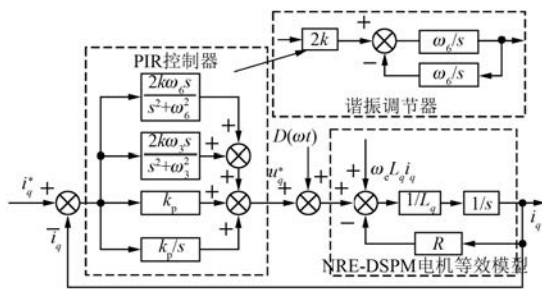


图 9 基于 PIR 的电流谐波抑制结构框图

4 试验验证

为验证 PIR 控制器的有效性,本文在 NRE-DSPM 试验平台上进行了算法验证试验。

使 NRE-DSPM 运行在完全磁化状态,设置转速为恒定 150 r/min,由磁粉制动器施加 1.5 N·m 负载,电流环采用 PI 控制器,得到稳态时的相电流如图 10(a) 所示。然后将图 9 所示的 PIR 控制器加到电流环,稳态时的相电流如图 10(b) 所示,并将试验结果作 FFT 对比分析,如图 11 所示。

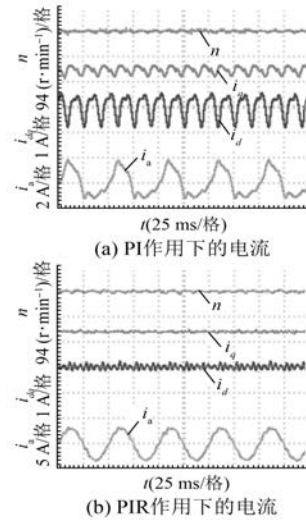


图 10 不同控制器作用下的电流

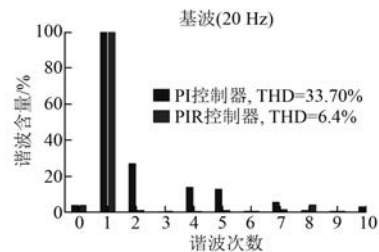


图 11 不同控制器作用下的相电流 FFT 对比

结合图 10 和图 11 可知,在 PIR 控制器的作用下, dq 轴中 3、6 次电流扰动基本被抑制,相电流 THD 大大降低,电流基本为正弦。由于此时电机的效率提高,故在相同的试验条件下,相电流幅值相应有所降低,充分验证了 PIR 算法的有效性。图 12 是 PIR 算法切换前后的电流波形。由图 12 可以看出,从 PI 控制器切换到 PIR 控制器需要约 0.5 s。这也说明 PIR 控制器在实际应用时也具有良好的动态特性,适用于电机控制系统。

5 结语

NRE-DSPM 具有带载能力强、转矩密度高及

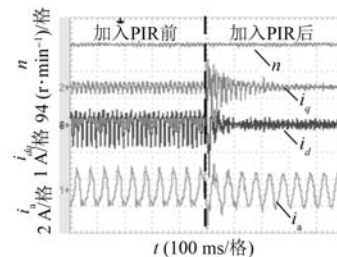


图 12 加入 PIR 瞬间电流

磁场在线可调等优点,但实际运行时相电流中出现的 2、4、5、7 次谐波电流严重影响了电机的效率。因此,本文在分析了谐波电流成因的基础上,采用由 PI 控制器并联谐振调节器组成的 PIR 控制器作为电流环控制器,实现了对各种因素所引起的谐波电流的抑制。最后在基于 dSPACE 控制系统的 NRE-DSPM 样机试验平台上对 PIR 控制器进行了验证,并取得了满意的效果。试验结果表明:PIR 控制器能有效地抑制各次谐波电流,实现电机稳定高效运行。

【参考文献】

- [1] 赵纪龙,林明耀,付兴贺,等.混合励磁同步电机及其控制技术综述和新进展[J].中国电机工程学报,2014,34(33): 5876-5887.
- [2] 吴茂刚,赵荣祥,汤新舟.正弦和空间矢量 PWM 逆变器死区效应分析与补偿[J].中国电机工程学报,2006,26(12): 101-105.
- [3] HAN S H, THOMAS M J, ZHU Z Q. Analysis of rotor core eddycurrent losses in interior permanent magnet synchronous machines[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2010,46(1): 196-205.
- [4] 王秀和,杨玉波,丁婷婷,等.基于极弧系数选择的实心转子永磁同步电动机齿槽转矩削弱方法研究[J].中国电机工程学报,2005,25(15): 146-149.
- [5] 廖勇,甄帅,刘刃,等.用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J].中国电机工程学报,2011,31(21): 119-127.
- [6] 周熙炜,刘卫国.空间电压矢量合成的新型选择谐波消去技术[J].中国电机工程学报,2009,29(30): 35-41.
- [7] KIM J S, DOKI S, ISHIDA M. Suppression of harmonic current in vector control for IPMSM by utilizing repetitive control[C]// Processing of IEEE Conference on Industrial Technology, Bangkok, Thailand;IEEE,2002: 264-267.
- [8] YEPES A G, FREIJEDO F D, FERNANDEZ C P. Torque ripple minimization in surface-mounted PM drives by means of PI + multi-resonant controller in synchronous reference frame [C] // 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, USA,2010: 1017-1022.
- [9] 李毅拓,陆海峰,瞿文龙,等.基于谐振调节器的永磁同步电机电流谐波抑制方法[J].中国电机工程学报,2014,34(3): 423-430.
- [10] 王恩德,黄声华.表贴式永磁同步电机伺服系统电流环设计[J].中国电机工程学报,2012,32(25): 82-88.
- [11] 朱孝勇,程明.定子永磁型混合励磁双凸极电机设计、分析与控制[J].中国科学:技术科学,2010(9): 1061-1073.
- [12] 左月飞,刘闯,张捷,等.永磁同步电动机转速伺服系统 PI 控制器的一种新设计方法[J].电工技术学报,2016,31(13): 180-188.
- [13] HU J B, HE Y K, XU L, et al. Improved control of DFIG systems during network unbalance using PI-R current regulators[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(2): 439-451.
- [14] FUKUDA S, YODA T. A novel current-tracking method for active filters based on a sinusoidal internal model [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001,37(3): 888-895.
- [15] ZMOOD N D, HOLMES G D. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003,18(3): 814-822.
- [16] 周娟,张勇,耿乙文,等.四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的改进 PR 控制[J].中国电机工程学报,2012,32(6): 113-120.
- [17] ESCOBAR G, HERNANDEZ B G P, MARTINEZ R P. A repetitive-based controller for the compensation of $6l \pm 1$ harmonic components[J].IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 3150-3158.
- [18] 王贺超,夏长亮,阎彦,等.基于谐振控制的表贴式永磁同步电机弱磁区电流谐波抑制[J].电工技术学报,2014,29(9): 83-91.

收稿日期: 2017 -03 -13

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

反映行业最新动态