

无电解电容逆变器永磁同步电机 驱动系统控制研究

尹泉, 吴根平, 罗慧, 陈凯, 刘缘

(华中科技大学 自动化学院 多谱信息处理技术国家级重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:在单相交流输入逆变器永磁同步电机驱动系统中, 母线侧通常采用大电解电容使母线电压稳定。然而大电解电容体积大、寿命有限, 而且为了改善网侧电流质量, 还需要增加功率因数校正(PFC)电路。为了解决这些问题, 分析了母线无电解电容的电机驱动系统的特性, 提出了一种基于“平均电压裕度”的网侧高功率因数的 dq 轴电流分配策略。仿真实验结果验证了所提出的控制方法的正确性和可行性。

关键词:单相输入; 无电解电容; 永磁同步电机; 高功率因数; 平均电压裕度

中图分类号:TP273

文献标识码:A

Control of Inverter Without Electrolytic Capacitor for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive

YIN Quan, WU Gen-ping, LUO Hui, CHEN Kai, LIU Yuan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Multispectral Information Processing,

School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: A large DC-link electrolytic capacitor is usually used to provide stable DC-link voltage in a single-phase input inverter for interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) drive. However, the large electrolytic capacitor occupies a large volume and its lifetime limits the lifetime of the converter in many cases. Power factor correction (PFC) circuits are added to correct the grid current quality. In order to deal with these issues aforementioned, a new motor drive system without DC-link electrolytic capacitors was proposed and a new d - and q -axis current distribution strategy based on the concept of “average voltage margin” for the high grid power factor was presented. The simulation results illustrate the validity of the proposed method.

Key words: single phase input; without electrolytic capacitor; permanent magnet synchronous motor (PMSM); high power factor; average voltage margin

家用空调的变频器前级为单相工频交流输入的不可控整流器, 母线用大电解电容稳定母线电压。然而, 大电解电容体积大、寿命有限, 这极大地限制了系统的小型化、使用寿命。而且, 我国的3C认证明确规定, 对每相电流小于16 A的家用空调系统, 各次电流谐波限值必须满足IEC61000-3-2的A类标准^[1]。因此, 为改善网侧电流质量, 大电解电容的空调系统需要增加功率因数校正(PFC)电路, 这又增加了系统的损耗和成本。

为了解决上述问题, 国外学者提出了一种新的拓扑结构, 并应用到交流调速系统中, 成为了研究热点^[2-6]。

针对母线无电解电容的电机驱动系统, 本文提出了一种高网侧功率因数、网侧各次电流谐波满足标准的控制策略。首先, 本文分析了无电解电容电机驱动系统的特性。其次, 基于“平均电压裕度”的概念, 提出了一种通过状态反馈控制的 d 轴电流给定策略。这种方法增强了系统对电机参数误差的鲁棒性。为获得网侧高功率因数,

基金项目:国家自然科学基金(61374049); 中央高校基本科研业务费(2014QN169)

作者简介:尹泉(1968-), 男, 博士, 副教授, Email: yinquan@163.com

器均为PI控制器。电流分配策略的功能为根据系统运行状况实时生成dq轴电流的给定值。

2.1 d轴电流策略

对于电机驱动系统而言,调速是一个基本要求。电机高速运行时,在母线电压谷值的部分区间,电机线电压可能会高于母线电压,出现能量回馈,导致母线电压的泵升,降低网侧功率因数。为避免这一问题,控制逆变器输出电压给定 $|u_s^*|$ 小于等于逆变器输出电压限,如下式:

$$|u_s^*| = \sqrt{(u_d^*)^2 + (u_q^*)^2} \leq u_{\lim} \approx \frac{|U_g \sin(\omega_g t)|}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

式中: u_d^*, u_q^* 分别为逆变器输出的d轴和q轴电压给定。

因式(11)右边电压量以2倍工频波动,难以保证式(11)一直都成立,即难以保证一直具有足够的电压裕度。为了解决该问题,本文提出了一种基于状态反馈的保证“平均电压裕度”的d轴电流给定策略。所谓保证“平均电压裕度”,并不保证每个时刻的电压裕度,只保证在一个母线电压周期内的平均电压裕度。

对式(11)两边定积分,并整理得

$$u_{mg_av} = \int_0^{T_g/2} [u_{\lim} - \sqrt{(u_d^*)^2 + (u_q^*)^2}] dt \geq 0 \quad (12)$$

式中: T_g 为网侧电压周期。

保证式(12)成立,即是保证在一个母线电压周期内的平均电压裕度 u_{mg_av} 大于等于0。 i_q^* 主要决定 u_d^*, i_d^* 主要决定 u_q^* 。由式(12)知,可通过状态反馈 u_d^*, u_q^* 来自自动调节d轴电流给定,保证平均电压裕度。

图3为通过状态反馈 u_d^*, u_q^* 生成d轴电流给定的结构图。逆变器输出电压限 $u_{\lim}$ 与逆变器输出电压给定 u_s^* 的差值经过一阶低通滤波器(LPF)输入到PI控制器。该低通滤波器的功能是获得电压裕度 u_{mg} 的平均值 u_{mg_av} 。因电压裕度 u_{mg} 以2倍工频100 Hz波动,滤波器截止频率应足够低,能滤除100 Hz谐波。d轴电流的给定值通过限幅器限制在无弱磁电流与最大去磁电流之间,即

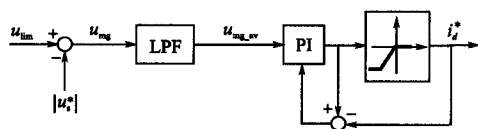


图3 d轴电流给定的结构图

Fig.3 Diagram of the d-axis current reference

$$-\Psi_f / L_d \leq i_d^* \leq 0.$$

2.2 q轴电流策略

在同步旋转dq坐标系下,结合式(3)、式(7)及式(10),可得到下式:

$$\begin{aligned} P_g \sin^2(\omega_g t) = & 1.5\omega_r i_q [\Psi_f + (L_d - L_q) i_d] + \\ & 1.5R_s(i_d^2 + i_q^2) + 1.5(L_d i_d \frac{di_d}{dt} + \\ & L_q i_q \frac{di_q}{dt}) \end{aligned} \quad (13)$$

忽略定子电阻损耗功率 P_{loss} 和电感功率 P_{ind} ,式(13)可简化为

$$P_g \sin^2(\omega_g t) = 1.5\omega_r i_q [\Psi_f + (L_d - L_q) i_d] \quad (14)$$

因 $P_g \sin^2(\omega_g t) = 2\omega_r T_e^* \sin^2(\omega_g t)$,可得到q轴电流给定为

$$i_q^* = 2i_{q_sc}^* \sin^2(\omega_g t) \quad (15)$$

式中: $i_{q_sc}^*$ 为速度控制器的输出。

3 仿真实验研究

为了验证本文所提控制方法的有效性,建立了基于该方法的单相输入的无电解电容逆变器控制的永磁同步电机驱动系统的仿真模型。仿真中所使用的参数为:电网输入电压有效值为220 V,电网频率为50 Hz,网侧输入电阻与电感分别为0.5 Ω 和0.2 mH。母线电容采用5 μF 薄膜电容,逆变器开关频率设为10 kHz。逆变器控制1台1 kW,额定转速5 400 r/min,额定转矩1.8 N·m,2对极的三相内埋式永磁同步电机,其电机参数为: $R_s = 0.4775 \Omega$, $L_d = 6.11 \text{ mH}$, $L_q = 8.17 \text{ mH}$ 。

图4为额定工况下dq轴电流稳态波形。可以看出,稳态时d轴电流约为-3 A,d轴电流的稳态性能很好,近似无稳态误差;稳态时q轴电流跟踪性能较好,以100 Hz频率约在-2 A至13 A之间波动。

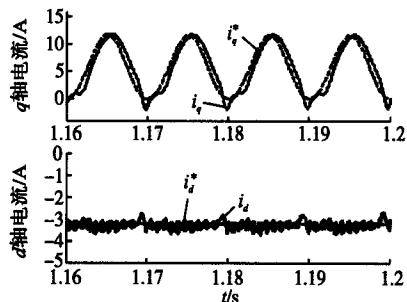


图4 dq轴电流稳态波形

Fig.4 The d-q axis current waveforms in steady state

为了验证所提出的 d 轴电流给定方法的有效性,进行了转速突升的仿真实验。图5为额定负载情况下转速突升时电机转速及 dq 轴电流响应。在1.2 s时,转速给定从额定转速阶跃升高为1.1倍额定转速。由图5可知,转速给定阶跃升高后, d 轴电流下降,弱磁增加,保证平均电压裕度; q 轴电流上升,转矩增加,电机转速上升。大约0.1 s后,系统在新的转速达到稳态。此时, d 轴电流约为-5 A; q 轴电流幅值稍微减小了,这是因为电机是凸极式的,负 d 轴电流会产生正磁阻转矩,增大输出电磁转矩。

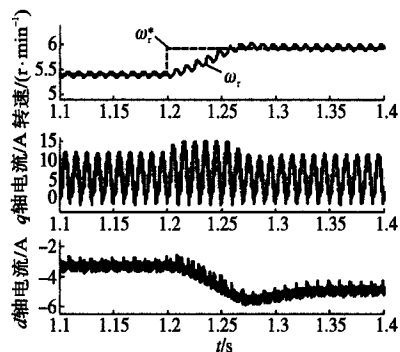


图5 速度突升时电机转速及 dq 轴电流响应

Fig.5 Responses of the motor speed and the d - q axis current as the speed reference increases

图6为额定工况下稳态时的网侧电压与网侧电流的波形。从图6中可以看出,网侧电流存在着不导通区间,这是因为该区域的母线电压高于网侧电压,不可控整流器的二极管都不导通。该不导通区间导致网侧电流畸变,降低了网侧功率因数,产生了电流谐波。然而,网侧输入功率因数依然很高,达到了97.8%。

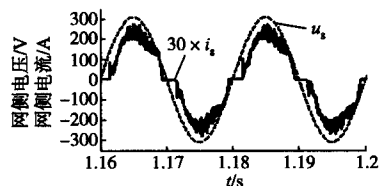


图6 额定状况下稳态网侧电压与网侧电流

Fig.6 The grid voltage and grid current in steady state at rated operation

图7给出了网侧电流的各次谐波幅值及其标准限值。从图7可以看出,虽然网侧电流含有谐波,但是其各次谐波幅值均满足我国要求的IEC61000-3-2标准。

因为母线的小薄膜电容不能稳定母线电压,母线电压剧烈波动,平均母线电压下降到大电解

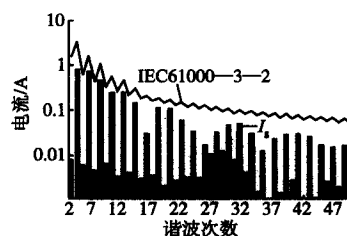


图7 网侧电流各次谐波及其限值

Fig.7 The grid current harmonics and the limits

电容时母线电压的0.707倍。母线电压的波动降低了电机驱动系统的驱动能力。而且,波动的 q 轴电流会导致电机电流有效值更大,电磁转矩纹波更多。

4 结论

本文提出了一种基于无电解电容逆变器控制的永磁同步电机驱动系统的高网侧功率因数的控制方法。提出了一种基于保证“平均电压裕度”的通过状态反馈生成 d 轴电流给定的方法。通过仿真实验,证实了所提出的高功率因数控制方法的有效性。

参考文献

- [1] IEC61000-3-2. Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A Per Phase)[S]. IEC Electrotechnical Standard, 2009.
- [2] Jung H S, Chee S J, Sul S K, et al. Control of Three Phase Inverter for AC Motor Drive with Small DC-link Capacitor Fed by Single Phase AC Source[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2014, 50(2): 1071-1081.
- [3] Inazuma K, Utsugi H, Ohishi K, et al. High Power Factor Single-phase Diode Rectifier Driven by Repetitive Controlled IPM Motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013, 60(10): 4427-4437.
- [4] Kang S W, Kim S I, Kim R Y, et al. High Power Factor Control of an Inverter-controlled Synchronous Motor System with Small DC-link Capacitor[C]/IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2013: 7769-7774.
- [5] Son Y, Ha J I. Grid Current Shaping of Single Phase Diode Rectifier with Small DC-link Capacitor for Three Phase Motor Drive[C]/IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014: 2253-2258.
- [6] 周玉斐, 黄文新, 赵健伍. 单相交流输入的无电解电容抽头电感单级升压逆变器在交流调速系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1836-1843.

收稿日期: 2014-09-25

修改稿日期: 2014-12-05