

永磁同步电机矢量运行控制研究

盛昌钰

贵州电网有限责任公司遵义习水供电局

摘要: 本文在Matlab/Simulink环境下,建立了永磁同步电机系统的仿真模型。系统采用双闭环控制策略,对电流进行矢量解耦,实现转速、电流双闭环的矢量控制算法。论文详细分析了永磁同步电机稳态/动态性能、转速调节特性,在此基础上提出了一种储能系统协调优化与集成控制策略。仿真结果证明了永磁同步电机的高效性和可行性。

关键词: PMSM; 建模仿真; PI控制; 矢量控制

引言

永磁同步电机体积小,重量轻,转子无发热问题,具有损耗低、电气时间常数小、响应快等特点,因此在高控制精度与高可靠性等方面显示出优越的性能^[1-4]。因此,永磁同步电动机调速系统正在成为近代交流调速领域中的热点,研究永磁同步电机在压缩空气储能系统中的应用是一件很有意义的工作。

一、永磁同步电机运行控制算法

(一) 永磁同步电机数学模型^[5-8]

永磁同步电机是一个非线性系统,具有多变量、强耦合的特点。我们对其分析的时候有以下假设:

忽略铁芯饱和,不计涡流和磁滞损耗

忽略换相过程中的电枢反应

转子上无阻尼绕组,永磁体无阻尼作用

永磁体产生的磁场和三相绕组产生的感应磁场呈正弦分布
定子绕组电流在气隙中只产生正弦分布的磁势,无高次谐波在此理想条件下:

(1) 永磁同步电机在三相静止坐标系下定子电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中Rs为电枢电阻, ψ_a ψ_b ψ_c 分别为abc三相磁链, i_a i_b i_c 分别为其 abc三相的相电流。

(2) 三相静止坐标系下磁链方程

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \psi_f \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中Laa、Lbb、Lcc为各相绕组自感,且Laa=Lbb=Lcc,式中Mab等为绕组之间互感且均相等。 ψ_f 是永磁体磁链, θ 为转子N极和a相轴线之间的夹角。

经过CLARK和PARK左边变换后,得到其在dq坐标系下的数学模型:

(3) dq坐标系下电压方程

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中ud、uq为dq轴电压, id、iq为dq轴电流, ψ_d 、 ψ_q 为dq轴磁链, Ld、Lq为dq轴电感, we为转速。

(4) dq坐标系下磁链方程

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(5) 转矩方程

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} n_p (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (5)$$

从上1.5中转矩方程可以看出,电磁转矩由两个部分组成,第一项是永磁体和定子绕组磁链之间相互作用产生,第二项则是由磁阻变化而产生的。

(6) dq轴运动方程:

$$T_e = T_L + \frac{J}{n_p} \times \frac{d\omega_g}{dt} \quad (6)$$

(二) 永磁同步电机数控制原理

分析上述方程,设id=0,那么电压方程就可简化为:

$$u_q = R i_q + L \frac{di_q}{dt} + \psi_f \omega_e \quad (7)$$

$$u_d = -\omega_e L i_d \quad (8)$$

转矩方程为:

$$T_e = n_p \psi_f \times i_q \quad (8)$$

运动方程为:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_t}{J} i_q - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{1}{J} T_L \quad (9)$$

以上式中: ψ_f 是永磁体磁链, R和L是定子绕组的电阻电感, we是电机角速度, ω_m 是电机的机械角速度, p为极对数, Kt是转矩常数, J为转动惯量, B为摩擦系数, TL是负载转矩。

二、仿真结果

(一) 空载输出特性

(1) 永磁同步电机空载时的转速波形如图1所示。

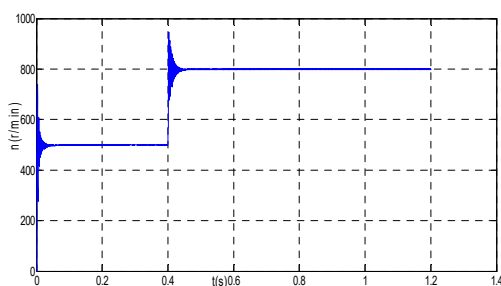


图1 PMSM转速波形

由图1可知,永磁同步电机空载运行情况下,在0.03s左右转速升到400r/min左右,系统具有快速响应性。在转速突然增加时,系统会出现短暂的振荡,在到达给定转速后很快稳定下来,当系统稳定后,无明显的超调。系统的转速准确跟随速度给定值变化。

(2) 永磁同步电机定子三相电流波形如图2所示。

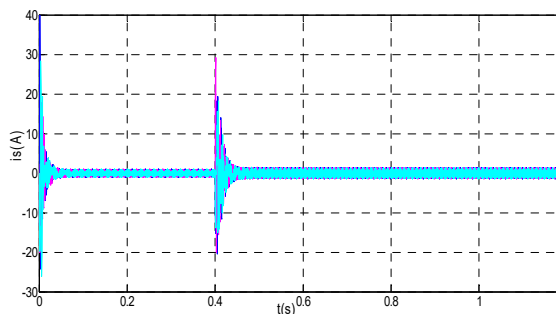


图2 定子三相电流

由图2可知，三相定子电流波动性较小，在到达给定转速后，定子电流迅速降低，在0-0.8附近波动。

(3) 永磁同步电机转矩波形如图3所示。

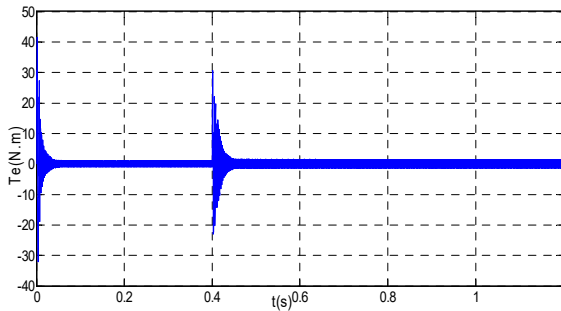


图3 PMSM电磁转矩

电机转矩波形稳定在额定转矩附近，在电机到达给定转速后迅速降低，进行维持稳定转速的微调。

(二) 带载输出特性

(1) 永磁同步电机起始时负载转矩为5N·m，0.8s时加载到10 N·m，带载时的转速波形如图4所示。

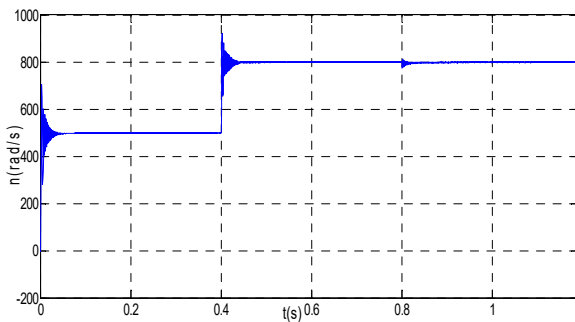


图4 永磁同步电机带载转速特性

由图4可知，永磁同步电机负载从0.4s时的5N·m加载到0.8s时的10 N·m，转速基本无明显降落。放大后速降在0.02s，很快就恢复到给定值。

(2) PMSM带载时三相定子电流波形如图5所示。

由图5可知，三相定子电流正弦特性完好，且在给定负载后，电流迅速达到额定电流，并保持稳定。

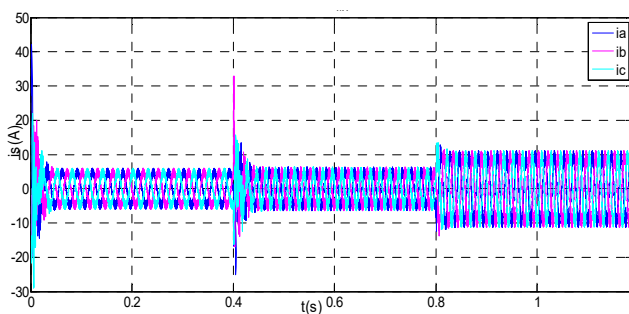


图5 永磁同步电机三相输出电流

(3) PMSM带载时转矩波形如图6所示。

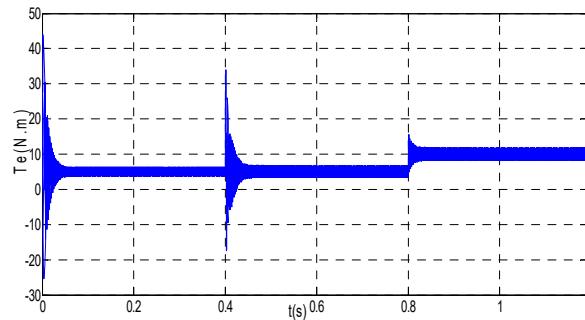


图6 永磁同步电机转矩特性

由图6可知，PMSM转矩波形稳定，在到达给定后迅速降低，突加载后迅速上升，性能优良。

三、仿真结果分析

通过永磁同步电机在空载和带载情况下的转速、电流、电压、转矩波形进行分析，可以发现，系统整体来说，无论是空载还是带载情况，系统响应迅速，电机启动时，经很短的时间就可以达到稳定状态。在转速发生变化后，系统输出特性会有轻微波动，在负载突变时，系统能很快跟随负载进行调节，系统有较好的抗干扰性。

四、结束语

本文采取永磁同步电机作为压缩空气储能系统的储能机组，通过在Matlab/Siulink中搭建仿真模型，验证了永磁同步电机的控制性能，对永磁同步电机的转速调节特性和功率调节特性进行了仿真，验证了永磁同步电机用于压缩空气储能机组的高效性和可行性，针对系统提出的对永磁同步电机的四象限控制需求，在Matlab/Simulink平台上搭建了基于id=0的永磁同步电机矢量控制仿真模型，验证电机四象限运行的可行性，对永磁同步电机的运行特性进行了仿真验证。揭示了基于永磁同步电机的先进压缩空气储能机组的转速调节特性、功率调节特性。

参考文献

[1] 齐亮. 基于滑模变结构方法的永磁同步电机控制问题研究及应用[D]. 华东理工大学, 2013.
 [2] 王子辉. 永磁同步电机全速度范围无位置传感器控制策略研究[D]. 浙江大学, 2012.
 [3] 王松. 永磁同步电机的参数辨识及控制策略研究[D]. 北京交通大学, 2011.
 [4] 杨建飞. 永磁同步电机直接转矩控制系统若干关键问题研究[D]. 南京航空航天大学, 2011.
 [5] 王春民, 嵇艳鞠, 栾卉, 张智恩. MATLAB/SIMULINK永磁同步电机矢量控制系统仿真[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2009, 27(01): 17-22.
 [6] 陈瑶. 直驱型风力发电系统全功率并网变流技术的研究[D]. 北京交通大学, 2008.
 [7] 李永东, 张猛. 高性能交流永磁同步电机伺服系统现状[J]. 伺服控制, 2008(01): 34-37.
 [8] 齐放, 邓智泉, 仇志坚, 王晓琳. 一种永磁同步电机无速度传感器的矢量控制[J]. 电工技术学报, 2007(10): 30-34+41.

作者简介:

盛钰昌, 男, 助理工程师, 主要从事电气工程及自动化相关工作。