

永磁同步电机直接转矩系统下的弱磁控制仿真研究

余雨婷¹ 褚衍廷² 黄杰¹

(1. 湖南铁道职业技术学院, 湖南 株洲 412000;

2. 湖南铁路科技职业技术学院, 湖南 株洲 412000)

摘要: 直接转矩系统下的永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 在弱磁控制时, 电机会采取一定的方式减弱电机磁场继而使得转速急速上升, 超过额定转速, 此时转速的上升可以看成是速度上的扰动。直接转矩控制系统自身在电机控制过程中容易产生转矩脉动。针对这些扰动, 采用 MATLAB 仿真软件搭建控制系统, 对直接转矩下的永磁同步电机弱磁控制系统产生的不稳定性进行了定性分析, 为后续研究者改善永磁同步电机弱磁系统提供了借鉴与参考。

关键词: 永磁同步电机; 弱磁控制; 仿真; 研究

永磁同步电机体积小、效率高、功率密度大、结构简单, 使用更为节省能源, 因此 PMSM 被广泛用于工业、交通、军事等重要领域。在采用电压源型逆变器的电机驱动系统中, 弱磁控制的实质是在电机的端电压值不断升高, 且升高到逆变器直流侧电压允许输出的最大值后, 采取一定方式减弱电机磁场继而使转速能够继续升高来满足 PMSM 在宽调速范围内运行。由于对 PMSM 弱磁控制的研究能更好地发挥电机的效率, 因而今日成为研究领域的一个重要课题。

一、电机模型

本文的电机模型建立在 d-q 坐标下, 所采用的仿真模型为面贴式永磁同步电机, 其数学模型如下:

电流方程:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L}(u_d - R_s i_d + pL\omega_r i_q) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L}[u_q - R_s i_q - p\omega_r(Li_d + \psi_f)] \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$|\psi_s| = \sqrt{(L_d i_d + \psi_f)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (3)$$

式中 ψ_d 、 ψ_q 分别表示 dq 轴的磁链分量; R_s 为定子电阻, L_d 、 L_q 分别为 dq 轴自感, 且 $L_d=L_q=L$, ψ_f 为永磁体的磁链大小, i_d 、 i_q 为 dq 轴定子电流的分量。

在 PMSM 直接转矩控制系统中, 电机弱磁控制的实现是通过电机定子磁链的调节来完成的, 使电机超过基速时, 运行在弱磁状态中。当 PMSM 工作在恒转矩区且稳定运行时, 定子电阻 R_s 的大小可以忽略不计, 此时定子电压的峰值可以表示为:

$$\begin{aligned} |u_s| &= \omega_r |\psi_s| \\ &= \omega_r \sqrt{(\psi_f + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

由式 4 可知, 在电机的运行中, 如果 $|\psi_s^*|$ 的值始终保持恒定, 电机定子端电压与转速 ω_r 成正比, 然而极限电压 $|u_{s\max}|$ 的数值大小有约束, 转速 ω_r 的大小有限制, 由此得出电机可以达到的最大转速为 ω_n , 称之为转折速度。此时, 若想得到更宽的速度, 即使得 $\omega_r > \omega_n$, 就应当使定子磁链值 $|\psi_s|$ 减弱, 即对电机采取弱磁控制策略。

当对直接转矩下的电机控制系统进行弱磁控制时, 可令该给定值 $|\psi_s^*|$ 同转速 ω_r 呈反比例减小, 即

$$|\psi_s^*| = k_f \frac{|u_s|_{\max}}{\omega_r} \quad (5)$$

式 5 中应使系数 $k_f \leq 1$ 。如果 $k_f=1$, 表明恰好在转速为转折

速度 ω_n 时开始进行弱磁; 当 $k_f < 1$, 表明实际弱磁会提前开始, 即在电机速度还未达到转折速度 ω_n 之前开始弱磁运行。通常情况下, 应该取 $k_f < 1$ 。

二、电机弱磁控制系统设计

在实现永磁同步电机基于 DTC 的弱磁控制系统中, 我们可以设定电机的额定转速为 ω_{n1} 以及在理想情况下其弱磁扩速所能获得的转速最高为 ω_{n2} 。PMSM 的弱磁特性如图 1 所示。由图 1 可知, 在恒转矩区域电机的转矩输出恒定不变; 但由于其在弱磁区域定子磁链随转速的变化而成反比地减弱, 从而导致了转矩同样也随转速的变化成反比例减小。

电机电磁转矩 T_e 随着定子磁链幅值 $|\psi_s|$ 的增大而增大。当电机工作在恒转矩区域时, DTC 控制系统把电机的输出转矩 T_e 限定为最大转矩, 因而电机定子电流不会出现过电流现象。而当电机工作在弱磁区域时, 定子磁链幅值 $|\psi_s|$ 随着电机转速的增加成反比例地减小。输出转矩不变时, 若磁链幅值 $|\psi_s|$ 减小, 则定子电流必将升高。当磁链的变化处于最大限定电流轨迹上时, 若要减小定子磁链, 给定转矩就应相应减小, 否则, 将会产生过电流现象。因此, 弱磁运行时, 需将电机电磁转矩限制在一定转矩范围之内。

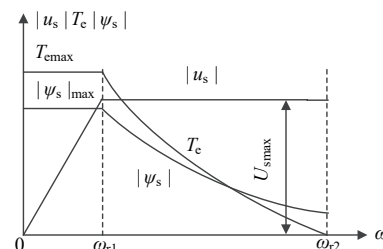


图 1 PMSM 的弱磁控制特性

(一) 恒转矩区采用 MTPA (Maximum Torque Per Ampere, 最大转矩电流比) 控制

恒转矩区若采用 MTPA 控制, 弱磁区与恒转矩区之间无法简单地从电机的转速上进行判别转换。这是由于电机定子磁链幅值随转矩的变化而变化, 在额定转速 ω_{n1} 处电机的端电压 $|u_s|$ 可能没达到最大值 $|u_{s\max}|$ 。显然, 当出现该情况时仍然允许电机转速按 MTPA 控制使之持续升高。当达到最大电机端电压 $|u_{s\max}|$ 之后, 电机才开始弱磁运行。因此, 实现控制系统运行的关键是电机在这两个模式内能平滑地进行切换。

(二) 恒转矩区采用恒磁通控制

在恒转矩区如果采用的方案是恒磁通控制策略, 为使电机的磁性材料得到充分利用, 定子磁链 $|\psi_s|$ 的选取应为额定值 $|\psi_{se}|$ 。当速度升至额定转速 ω_{n1} 时, 其相应绕组的端电压同时也上升到了最大值 $|u_{s\max}|$ 。这样在转速为 ω_{n1} 之后, 弱磁便开始了。在弱磁区域,

为了使端电压保持最大值恒定不变,应控制定子磁链随转速成反比例的变化。所以,在恒转矩区,若采用的方案为恒磁通控制,电机在弱磁区与恒转矩区之间的判别及转换条件为转速是否上升至额定值 ω_{r1} ,将额定转速称之为该电机的基速。因此,对DTC与弱磁控制的复合控制系统,同在恒转矩区采用MTPA的控制相比,该控制方法能在两种模式之间进行平滑地切换。

PMSM 基于直接转矩控制和弱磁控制的复合控制策略的给定框图如图2所示。当电机工作于恒转矩区域时,电机的输出转矩通过含有限幅的PI速度调节器给定,给定一个恒定的定子磁链幅值,使电机工作于恒磁通控制方式;当转速在基速以外时,系统运行于弱磁工作区,磁链幅值的变化与转速呈反比例关系,而转矩的变化也随转速的升高而逐渐减小。

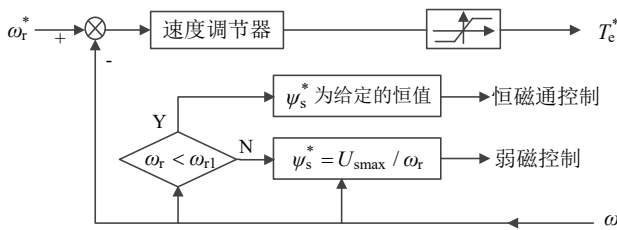


图2 PMSM的复合弱磁控制框图

三、仿真分析

采用 Matlab 进行了仿真研究,验证上述所提设计方法的有效性和正确性,搭建了基于弱磁升速的直接转矩系统下的仿真模型。

所用PMSM电机参数为:定子电阻 $R_s=2.875\Omega$,额定功率 $P_N=1.1kW$,额定转速 $\omega_n=3000r/min$,额定转矩 $T_n=3N\cdot m$,定子等效电感 $L=0.0085H$,永磁体磁势 $\psi_s=0.175Wb$,转动惯量 $J=8\times 10^{-4}kg\cdot m^2$,库仑摩擦转矩 $T_f=0N\cdot m$,黏滞摩擦系数 $B_m=0N\cdot m\cdot s$,极对数 $p=4$ 。

仿真中系统三相交流输入电压为220V、频率为50Hz,采样周期为 $10\mu s$,仿真时间0.2s,启动给定转速为3000r/min,0.05s后速度上升为5000r/min,PMSM空载启动。0.1s后负载由空载变为 $2N\cdot m$,PI速度调节器的参数为 $k_p=0.55$, $k_i=0.4$,负载和转速具体变化见表1所示。

表1 系统负载和转速发生变化时的仿真方案

仿真方案	负载	转速
①系统抗负载变化能力比较	0.1s时,由 $0N\cdot m$ 变 $2N\cdot m$	不变
②系统跟踪给定转速变化的能力比较	不变	0.05s时,由3000r/min突升至5000r/min;

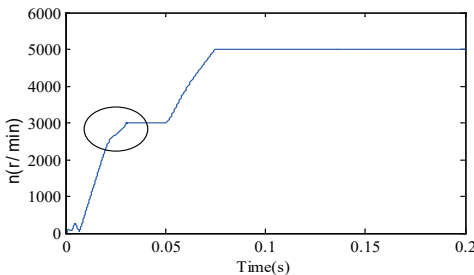


图3 DTC下的弱磁速度响应曲线

直接转矩系统下的PMSM弱磁系统在0~0.05s的速度响应在启动时会产生一定的抖动且在0.05s转速发生变化时速度的响应过程迟缓。

直接转矩系统下的PMSM弱磁系统在速度发生振荡的时间段0~0.05s,其三相电流也处于振荡时期,速度稳定后,PMSM的三相电流也趋于稳定。

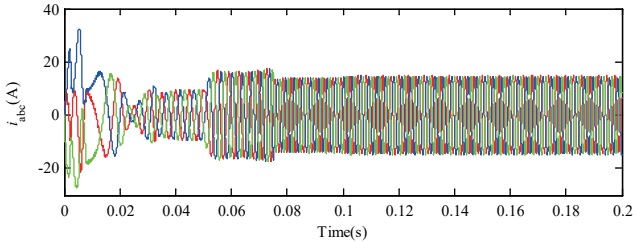


图4 DTC下弱磁三相电流响应曲线

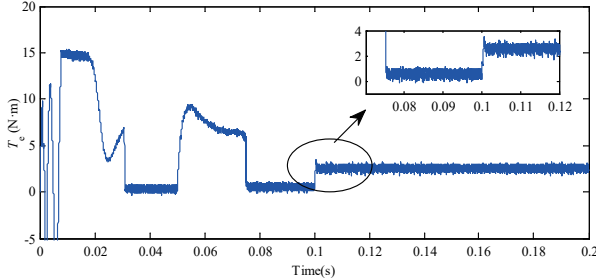


图5 DTC下弱磁转矩响应曲线

可以看出在启动和在0.1s后负载突变的过程中,PMSM弱磁系统的转矩响应也随着启动和负载的突变而产生振荡,且在整个控制过程中,转矩的脉动都较大。

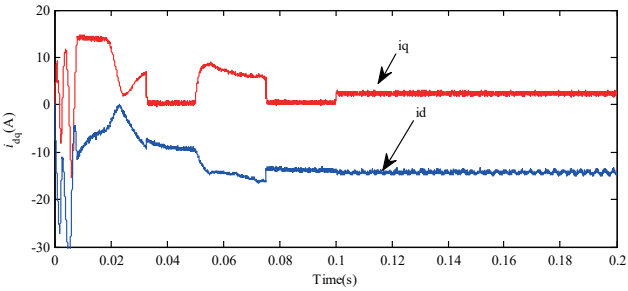


图6 DTC下的弱磁dq轴电流响应曲线

在电机刚启动时,其dq轴的电流响应随着启动的不稳定而产生大振幅波动,0.1s电机负载变化后,PMSM弱磁系统下的dq轴电流响应也发生振荡,电机弱磁升速稳定后,其dq轴电流因为速度超出基速而产生了抖动。

四、结论

通过 MATLAB 仿真分析结果(图3~图6)可知,PMSM在直接转矩下的弱磁控制系统能实现超过基速的运行,但是随着速度和负载的变化,系统的抗扰动能力不强,鲁棒性能一般,后期需要在控制系统上进行改进。

参考文献:

[1] 林程,邢济奎,黄卓然,等.电动汽车永磁同步电机最优弱磁控制策略[J].汽车工程,2018,040(011):1346-1353,1363.
[2] 林立、黄研、王翔、石赛美.车用内置式永磁同步电机电压补偿弱磁控制策略研究[J].电气传动自动化,2020,42(3):3.

本文系湖南省教育厅科学研究项目20C1214《弱磁控制状态下的永磁同步电机模型预测控制系统研究》。