

Calculation and Design of Self-Starting Permanent Magnet Synchronous Motor

Chenxi Guo¹, Ronglan Zhang²

¹School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi

²School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Email: z71rl@126.com

Received: Aug. 11th, 2017; accepted: Aug. 24th, 2017; published: Aug. 30th, 2017

Abstract

Permanent magnet synchronous motor (PMSM) has high power factor, high efficiency, and in many occasions began to gradually replace the most commonly used AC induction motor, which is a promising energy-saving motor. The analysis and calculation of the article include the working principle of PMSM, the performance parameters of permanent magnet material, its characteristics and selection principle, the structure of PMSM, the steady-state performance of permanent magnet synchronous motor, the main parameters of permanent magnet synchronous motor, self-starting PMSM starting process. Finally, the design contents of permanent magnet synchronous motor are expounded: 1) to determine the design task; 2) to select the motor initial design parameters; 3) to check the motor performance indicators; 4) to adjust the motor parameters; 5) to determine the motor design.

Keywords

PMSM, Equivalent Magnetic Circuit Method, Working Characteristic Curve

自启动永磁同步电动机的计算分析与设计

郭晨希¹, 张荣兰²

¹西北工业大学自动化学院, 陕西 西安

²盐城工学院土木工程学院, 江苏 盐城

Email: z71rl@126.com

收稿日期: 2017年8月11日; 录用日期: 2017年8月24日; 发布日期: 2017年8月30日

摘要

永磁同步电动机具有功率因数高、效率高, 在许多场合开始逐步取代最常用的交流异步电机, 是一种很

文章引用: 郭晨希, 张荣兰. 自启动永磁同步电动机的计算分析与设计[J]. 智能电网, 2017, 7(4): 294-305.

DOI: 10.12677/sg.2017.74033

有前途的节能电机。文章分析和计算内容包括永磁同步电动机的工作原理、永磁材料性能参数、其特点及选用原则、永磁同步电动机的结构、永磁同步电动机的稳态性能、自启动永磁同步电动机的主要参数、自启动永磁同步电动机的起动过程。最后阐述了永磁同步电机设计内容: 1) 确定设计任务; 2) 选取电机初始设计参数; 3) 校核电机性能指标; 4) 调整电机有关参数; 5) 确定电机设计方案。

关键词

永磁同步电机, 等效磁路法, 工作特性曲线

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 永磁同步电动机具有自己的特点及应用范围

永磁同步电机具有电机体积小、重量轻、便于维护保养; 结构简单紧凑、噪声低、具有很明显的节能效果; 具有较宽的经济运行范围, 可在其 25%~120% 中有效额定负载范围内具有高功率因数和高效率; 运行效率高, 转子中有永磁体励磁, 无需励磁, 转子无绕组并且定子绕组的损耗较小; 电机性能受到气隙长度的影响要远小于感应电机, 因此气隙要比同功率的感应电动机大的多; 内置式交直轴的磁阻不同, 进而产生的转子磁路不对称, 弱磁性能也好, 表面式的弱磁性能较差; 但具有制造工艺较为复杂[1], 成本也高的特点。应用于纺织化纤工业、陶瓷玻璃工业和年运行时间长的风机、水泵等[2]。此外, 与电励磁同步电动机相比, 永磁同步电动机省去了励磁功率, 提高了效率, 简化了结构, 实现了无刷化。特别是 100~1000 kW 电动机, 还可省去励磁柜, 总成本增加不多, 成为高效永磁同步电动机的又一重要应用场合。钕铁硼永磁电动机目前主要用于高档精密微电机、硬盘驱动器电机、软盘驱动器电机、DVD 主轴电机、打印机电机、传真机电机、复印机电机和工业控制用电机, 并向家电电机、汽车电机发展[1]。在设计、制造和应用永磁电机时, 需要对其磁路结构、永磁同步电动机的稳态性能等进行研究分析。文章在此基础上介绍自启动永磁同步电动机设计内容。

2. 永磁同步电动机工作原理

永磁同步电动机属于异步启动永磁同步电动机, 其磁场系统由一个或多个永磁体组成, 一般在笼型转子的内部, 笼型用铜条或铸铝焊接而成, 永磁体的磁极装镶有所需极数。其定子结构同异步电动机相似。当定子绕组接通电源后, 电动机以异步电动机原理启动, 当其加速转到同步转速时, 定子磁场产生的同步转矩跟转子永磁磁场将转子迁入同步, 电动机进入同步运行。

3. 永磁材料磁性能的主要参数、特点及选用原则

退磁曲线[2]: 在第二象限的磁滞回线称为退磁曲线, 为永磁材料基本特性曲线。磁能积: 退磁曲线上任一点的磁通密度与磁场强度的乘积称为磁能积。退磁曲线的两个极限位置 B_r 、 H_c 和磁能积曲线中间某个位置上磁能积为最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 三者代表永磁材料磁性能重要参数。

如图 1 所示, 退磁曲线上各点的回复线可近似认为是一组平行线, 他们都与退磁曲线上坐标 $(B_r, 0)$ 处切线相平行。利用这一近似特性, 实际工作中求取不同工作温度、不同工作状态的回复线就方便得多。内禀矫顽力 H_{CI} 反映永磁材料抗去磁能力的大小, 是表征稀土永磁抗去磁能力强弱的一个重要参数。居里温度: 随着温度的升高, 磁性能逐步降低, 升至某一温度时, 磁化强度消失, 该温度称为该永磁材料

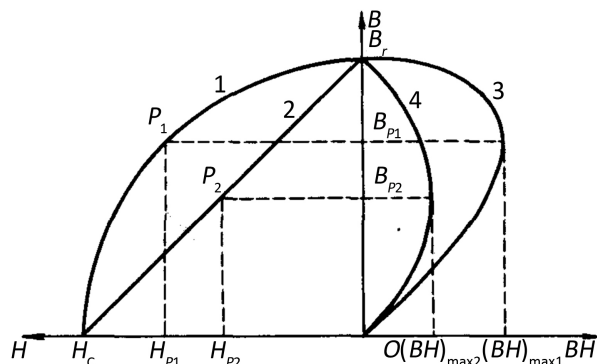


Figure 1. 1,2-demagnetization curve 3,4-energy product curve

图 1. 1,2-退磁曲线 3,4-磁能积曲线

的居里温度 T_c ，又称居里点。一种永磁材料在工作温度时的内禀矫顽力 H_{CT} 越大，内禀退磁曲线的矩形度 H_k 越好，则这种永磁材料的磁稳定性越高，即抗外磁场干扰能力越强。

永磁材料特点：转子中采用永磁体，目前主要以钕铁硼和稀土钴作为永磁材料。两者都是高剩磁、高矫顽力、高磁能积的稀土永磁材料。钕铁硼永磁具有目前磁性能最高的永磁材料、价格便宜的优点；具有居里温度较低、温度系数较高，高温时退磁曲线下半部分弯曲，容易锈蚀的缺点。稀土钴永磁具有剩余磁感应强度 B_r 、磁感应强度矫顽力 H_c 、及最大磁能积 $(BH)_{max}$ 都很高，退磁曲线基本上是一条直线，温度系数小，居里温度高的优点，具有价格贵、硬而脆装配困难的缺点。

永磁材料选择的原则：气隙磁场和性能指标；磁性能的稳定性；机械性能；价格适宜。永磁材料选择注意事项：需对永磁体进行逐块检测；磁场热处理工艺；稳磁处理。

4. 永磁电机磁路计算

等效磁路法[1]是利用场化路的原理，将永磁体等效为磁动势源或磁压降源，根据不同的磁路结构，将磁路分为线性的磁路段，根据磁路的安培环路定则，列写磁动势平衡方程，然后根据各段磁路磁密的要求确定永磁体的具体尺寸及修正电机定子槽的参数，得到电机电磁计算的原始数据，为下一步设计打下基础。

4.1. 永磁体跟成磁通源或磁动势源等效

每极总磁通 Φ_m 来自于永磁体向外磁路提供，虚拟内漏磁通 Φ_0 来自永磁体，外磁路提供的磁动势 F_m 来自于每对极磁路中永磁体两端，虚拟内禀磁通 Φ_r 来自永磁体。永磁体跟一个恒磁动势源 F_c 与一个恒定的内磁导 Λ_0 相串联的磁动势源等效，如图 3 所示。它与图 2 所示的磁通源是等效的，二者可以互换，详公式(1)。在应用时可以根据不同的使用场合，从方便出发进行选择。

$$\Phi_m = \Phi_r - \Phi_0 = \Lambda_0 (F_c - F_m) \quad (1)$$

4.2. 外磁路等效电路

总磁通 Φ_m 来自永磁体向外磁路提供可分为两部分，一部分为主磁通(即每极气隙磁通) Φ_δ ，另一部分为漏磁通 Φ_σ ；相应的磁路分为主磁路与漏磁路，相应的磁导分为主磁导 Λ_δ 与漏磁导 Λ_σ 。空载情况下的等效磁路来自外磁路如图 4 所示，负载情况下等效磁路来自外磁路如图 5(a)所示。主磁路增加电枢磁动势，电枢磁动势 F_a 来自每对极磁路。方便计算分析，根据戴维南定理，用等效磁路图 5(b)换图 5(a)。

4.3. 等效磁路来自永磁电机

将图 5 与图 2 或 3 合并, 得到负载时永磁电机总的等效磁路, 如图 6 所示。令 $F_a = 0$, 即得到空载时的等效磁路。对于不同的永磁电机, 等效磁路的具体构成将有所区别。

主磁导 $\Lambda_\delta = \frac{\mu_0 A_\delta}{2\delta K_\delta K_s} = \frac{\mu_0 \alpha_i \tau L_{ef}}{2\delta K_\delta K_s}$; 漏磁导 Λ_σ 的计算较为繁杂。

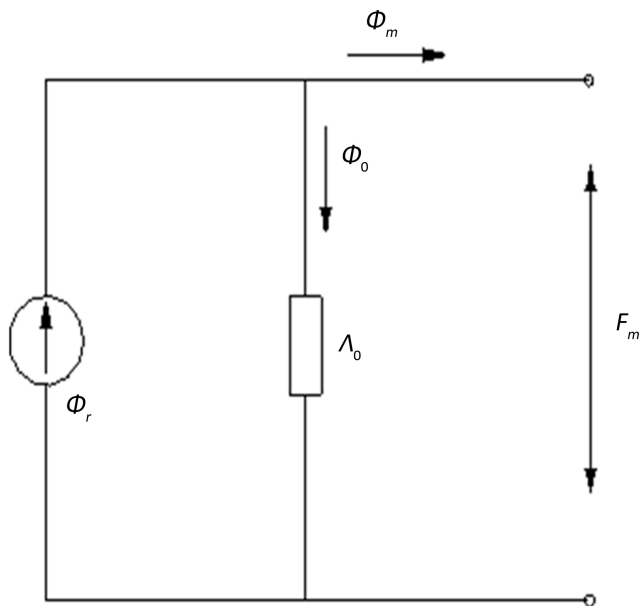


Figure 2. Equivalent magnetic flux source of permanent magnet
图 2. 永磁体跟磁通源等效

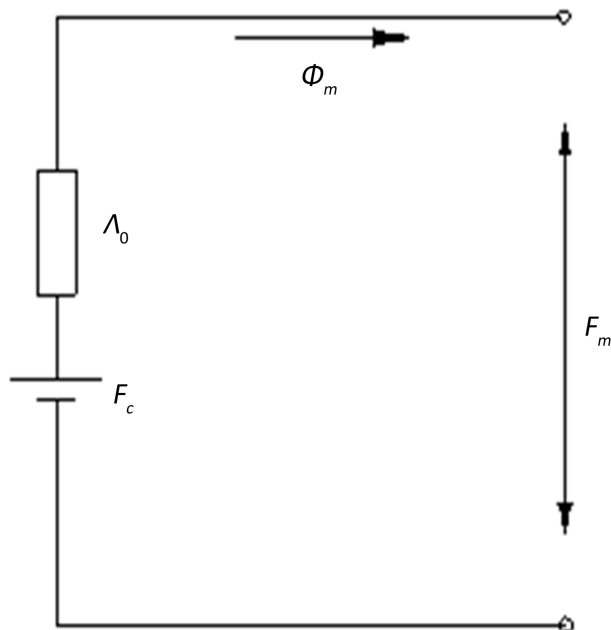


Figure 3. Equivalent magnetomotive force source of permanent magnet
图 3. 永磁体跟磁动势源等效

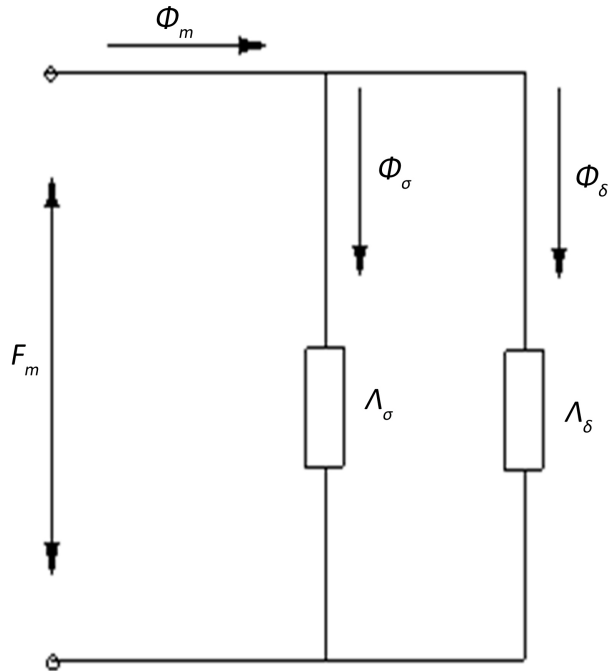


Figure 4. Equivalent magnetic path of external magnetic circuit
图 4. 空载时外磁路的等效磁路

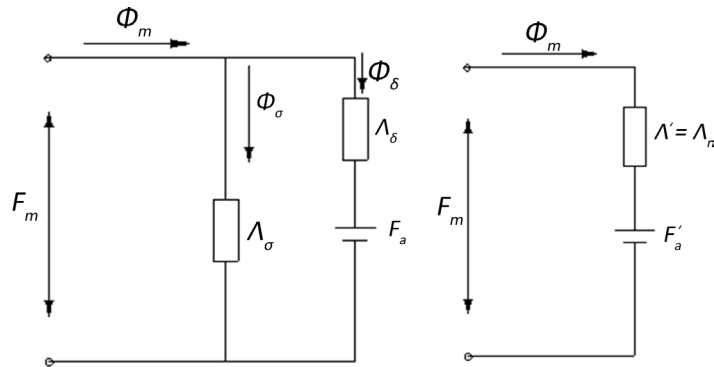


Figure 5. Equivalent magnetic circuit of external magnetic circuit under load
图 5. 负载情况下等效磁路来自外磁路

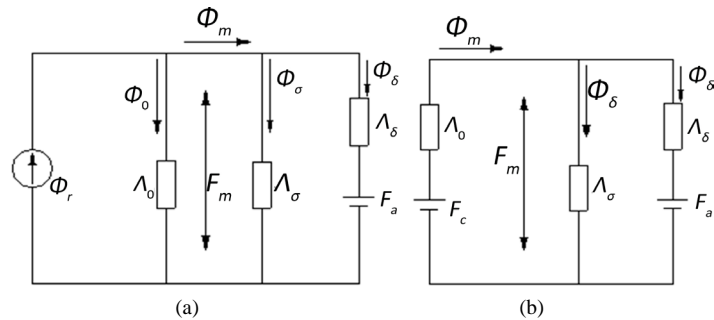


Figure 6. Equivalent magnetic circuit of permanent magnet motor at load; (a) magnetic flux source equivalent magnetic circuit; (b) magnetic potential source equivalent magnetic circuit

图 6. 负载时永磁电机的等效磁路; (a) 磁通源等效磁路; (b) 磁动势源等效磁路

$$\text{漏磁因数 } \sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_\delta} = \frac{\Phi_\delta + \Phi_\sigma}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_\delta}; \quad \text{空载漏磁因数 } \sigma_0 = \frac{\Lambda_\delta + \Lambda_\sigma}{\Lambda_\delta} = 1 + \frac{\Lambda_\sigma}{\Lambda_\delta}.$$

4.4. 等效磁路的解析法

4.4.1. 等效磁路各参数的标么值

$$\text{磁通基值 } \Phi_b = \Phi_r = B_r A_m; \quad \text{磁动势基值 } F_b = F_c = H_c h_{Mp}; \quad \text{磁导基值 } \Lambda_b = \frac{\Phi_b}{F_b} = \Lambda_0.$$

4.4.2. 相应物理量的标么值

$$\varphi_m = \frac{\Phi_m}{\Phi_r} = \frac{B_m}{B_r} = b_m; \quad \varphi_r = \frac{\Phi_r}{\Phi_r} = 1 = b_r; \quad f_m = \frac{F_m}{F_c} = \frac{H_m}{H_c} = h_m; \quad f'_a = \frac{F'_a}{F_c} = h'_a$$

$$f_c = \frac{F_c}{F_c} = 1 = h_c; \quad \lambda_\delta = \frac{\Lambda_\delta}{\Lambda_b}; \quad \lambda_0 = \frac{\Lambda_0}{\Lambda_b} = 1; \quad \lambda_\sigma = \frac{\Lambda_\sigma}{\Lambda_b}$$

用标么值表示时, 直线的回复线(或退磁曲线)表示成:

$$\because \Phi_m = \Phi_r - \Phi_0 = \Phi_r - \Lambda_0 F_m; \quad \therefore \varphi_m = 1 - f_m, \quad b_m = 1 - h_m$$

4.4.3. 等效磁路求解

A) 磁路不饱和, 即 λ_δ 、 λ_σ 和 λ_n 都是常数, 如图 7 所示。

$$\text{a) 空载 } \varphi_{m0} = \frac{\lambda_n}{\lambda_n + 1} = b_{m0}, \quad f_{m0} = \frac{1}{\lambda_n + 1} = h_{m0}$$

求得空载时各部分磁通: 永磁体提供的总磁通 $\Phi_{m0} = \varphi_{m0} \Phi_r = b_{m0} B_r A_m$

$$\text{漏磁通 } \Phi_{\sigma 0} = h_{m0} \lambda_\sigma B_r A_m; \quad \text{每极气隙磁通 } \Phi_{\delta 0} = \frac{b_{m0} B_r A_m}{\sigma_0}$$

$$\text{b) 负载 } \varphi_{mN} = \frac{\lambda_n (1 - f'_a)}{\lambda_n + 1} = b_{mN}, \quad f_{mN} = \frac{1 + \lambda_n f'_a}{\lambda_n + 1} = h_{mN}$$

负载时各部分磁通: 永磁体提供的总磁通 $\Phi_{mN} = \varphi_{mN} \Phi_r = b_{mN} B_r A_m$

$$\text{漏磁通 } \Phi_{\sigma N} = f_{mN} \lambda_\sigma \Phi_r = h_{mN} \lambda_\sigma B_r A_m; \quad \text{每极气隙磁通 } \Phi_{\delta 0} = \frac{b_{m0} B_r A_m}{\sigma_0}$$

B) 磁路是饱和的, λ_n 不是常数

$$1) \text{ 当磁路的饱和程度不高时, 近似计算 } b'_{m0} = \frac{0.95 \sigma_0 h_m}{\sigma_0 h_m + \delta}$$

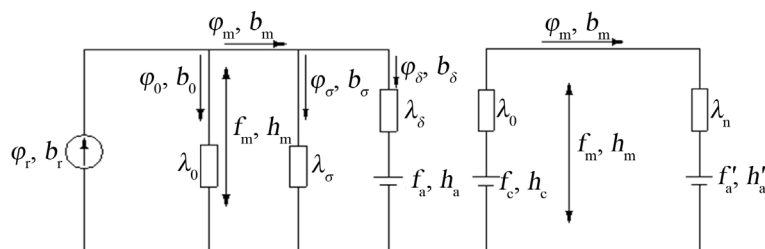
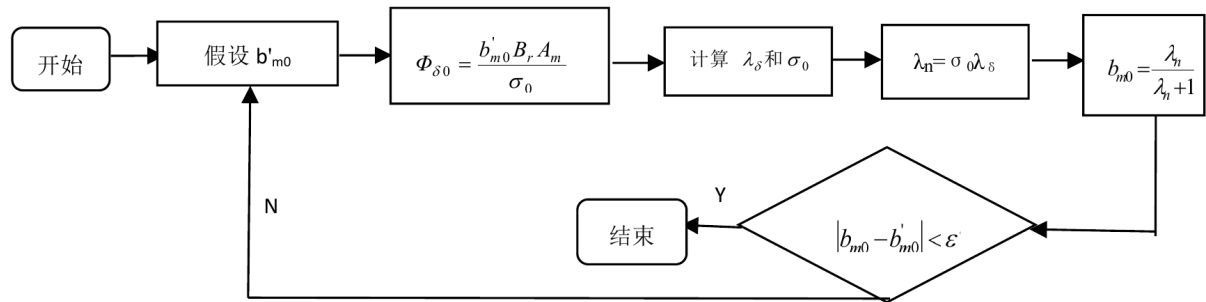


Figure 7. Equivalent magnetic circuit with per unit value; (a) Magnetic flux source equivalent magnetic circuit; (b) Magnetomotive force equivalent magnetic circuit

图 7. 以标么值表示的等效磁路; (a) 磁通源等效磁路; (b) 磁动势源等效磁路

Figure 8. Calculation of b_{m0} block diagram图 8. 计算 b_{m0} 框图

2) 当磁路比较饱和时, 迭代法, 详图 8 所示。

4.4.4. 等效磁路的图解法

图解法求解等效磁路就是求出回复线 $\Phi_m = f(F_m)$ 与合成磁导线 $\Lambda_n = f(\Phi_m)$ 的交点。当永磁材料的退磁曲线有拐点时, 要进行去磁校核计算。

永磁体的最佳工作点

最大磁能的永磁体最佳工作点; $b_D = \varphi_D = 0.5$

最大有效磁能的永磁体最佳工作点 $b_e = \varphi_e = \frac{\sigma}{2}$ 、 $b_e = \varphi_e = \frac{2\lambda_{\sigma} + 1}{2\lambda_{\sigma} + 2}$

永磁体最佳工作点的应用及注意事项:

$$\lambda_n = \frac{\sigma}{2 - \sigma - 2f'_a}, \lambda_n = \sigma_0 \lambda_{\delta} = \frac{\sigma_0 \alpha_i \tau L_{ef}}{2\delta K_{\delta} K_s \mu_r} \frac{h_{Mp}}{A_m}$$

退磁曲线有拐点时, 校核[3]最大去磁工作点(b_{mh} , h_{mh})高于退磁曲线拐点(b_k , h_k), 即 $b_{mh} > b_k$ 或 $h_{mh} < h_k$; 为避免产生不可逆退磁来自于永磁体的, 确需保留足够余地。不失磁时, 尽可能追求有效磁能得大值, 通常不是最大值。

设计电机着重设计最佳电机, 永磁体最佳利用有时可能被放弃。一般取 $b_{mN} = 0.60 \sim 0.85$, 多方案比较确定所需具体要求的电机。

5. 永磁同步电动机的结构

永磁同步电动机总体结构由固定部分、转动部分、辅助部分三部分组成。固定部分包括定子机座、定子铁心、定子绕组、端盖及底板等。转动部分又包含了转轴、转子铁心、转子绕组、风扇等。转子铁心采用实心结构或叠片叠压结构。

5.1. 定子绕组

一般制成多相, 通常为三相绕组。三相绕组沿定子铁心对称分布, 在空间互差 120 度电角度, 通入三相交流电时, 产生旋转磁场。

5.2. 转子

永磁同步电机按永磁体在转子位置不同分为表面式转子磁极结构和内置式转子磁极结构。

表面式转子磁极结构, 具有直轴电感 L_d 和 L_q 相同, 较大气隙, 小弱磁能力, 限制了扩速能力的特点。内置式转子磁极结构, 交直轴电感表示成 $L_q > L_d$, 较小气隙, 弱磁能力较好的特点。

选择转子磁路结构[4]要注意: 较大同步电抗 X_q 和凸极率[4] X_q/X_d 可以提高电动机的牵入同步能力、

磁阻转矩和电动机的过载倍数, 因此设计高过载倍数的电动机时应充分利用大的凸极率所产生的磁阻转矩。

6. 永磁同步电动机的稳态性能

稀土永磁的相对回复磁导率约为 1, 永磁同步电动机转子磁导率(直轴磁路中)很小, 电动机交轴电枢反应电感一般大于直轴电枢反应电感 $X_q > X_d$ 。永磁同步电动机稳态运行性能计算分析。

稳态运行性能来包括失步转矩倍数、输出功率与输入功率、效率、电枢电流、功率因数等四者之间的关系。从他们的电磁基本关系和相量图推导可得出电动机稳态性能。

A) 电磁转矩和矩角特性

$$I_q = \frac{X_d U \sin \theta - R_1 (E_0 - U \cos \theta)}{R_1^2 + X_d X_q}; \quad I_d = \frac{R_1 U \sin \theta + X_q (E_0 - U \cos \theta)}{R_1^2 + X_d X_q}; \quad I_1 = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

$T_{em} = \text{永磁转矩} + \text{磁阻转矩}$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{mpE_0U}{\omega X_d} \sin \theta + \frac{mpU^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \quad (2)$$

图 9 是矩角特性曲线[5]来自永磁同步电动机。图 9 为计算所得的(电磁转矩/额定转矩)—转矩角曲线, 图中, 曲线 1 为式(2)中的基本电磁转矩又叫永磁转矩; 曲线 2 为式(2)中的磁阻转矩; 曲线 3 为曲线 1 和曲线 2 的合成。曲线 3 上 T_{max} 为转矩最大值, 也叫失步转矩, 假设负载转矩大于这个值, 那么电动机的同步转速就不再保持。失步转矩倍数 $T_{p0} = T_{max} / T_N$ 是最大转矩与电动机额定转矩比值。

B) 工作特性曲线[3]

电动机的 E_0 、 X_d 、 X_q 和 R_1 等参数计算出来后, 对于不同的转矩角 θ , 得出相应的定子相电流功率因数、输入功率等, 从而求出电机损耗, 便可得到电动机的输出功率 P_2 和效率 η , 从而得到电动机稳态运行性能(P_1 、 η 、 $\cos \varphi$ 和 I_1 等)与输出功率 P_2 之间的关系曲线, 即电动机的工作特性曲线。图 10 为按以上步骤求出的某台永磁同步电动机的工作特性曲线, 图中曲线 1 为功率因数曲线, 曲线 2 为效率曲线, 曲线 3 为 I_1 / I_N 曲线, 曲线 4 为 P_1 / P_N 曲线。

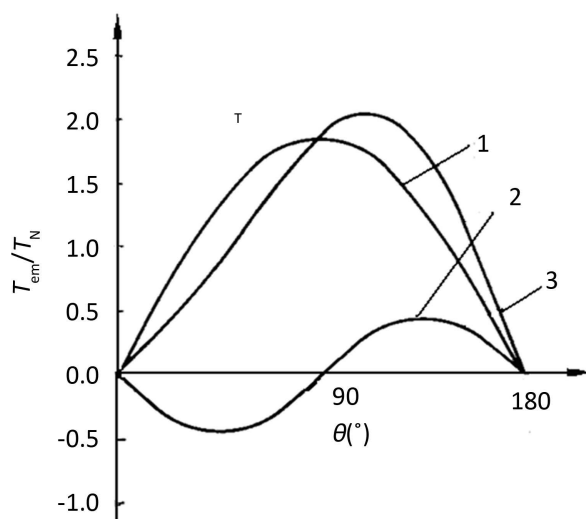


Figure 9. Torque-angle characteristic of PMSM

图 9. 永磁同步电动机的矩角特性

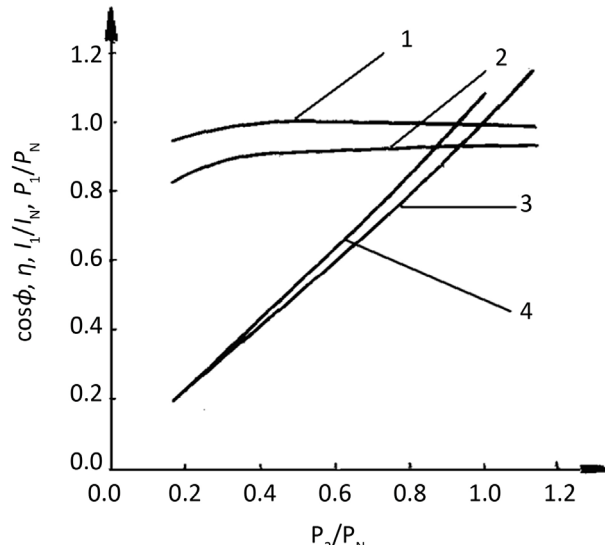


Figure 10. Working characteristic curve
图 10. 工作特性曲线

C) 损耗分析计算

a) 定子绕组电阻损耗 $P_{Cu} = mI_1^2 R_1$;

b) 铁心损耗 $P_{fe} = (k_1 P_{1ld} V_{l1} + k_2 P_{j1d} V_{j1})$

c) 机械损耗: 参考实测值或者其它电机的计算方法。

轴承摩擦损耗

滑动轴承 $p_f = 2.3l_j \frac{50}{\theta} \sqrt{\mu_{50} P_j d_j \left(1 + \frac{d_j}{l_j}\right) v_j^{1.5}} \times 10^{-10}$

滚动轴承 $p_f = 0.15 \frac{F}{d} v \times 10^{-5}$; 通风损耗 $p_w = 1.75q_v v^2$

d) 杂散损耗 $p_s = \left(\frac{I_1}{I_N}\right)^2 p_{sN}$

7. 自启动永磁同步电动机的主要参数

A) 空载反电动势 $E_0 = 4.44 f K_{dp} N K_{\Phi} \frac{b_{m0} B_r A_m}{\sigma_0}$

B) 交、直轴电枢反应电抗

$$E_d = E_0 \pm I_d X_{ad}, E_d = 4.44 f K_{dp} N \Phi_{1N}$$

$$X_{ad} = \frac{4.44 f K_{dp} N |\Phi_{10} - \Phi_{1N}|}{I_d}, \Phi_{1N} = [b_{mN} - (1 - b_{mN}) \lambda_{\sigma}] B_r A_m K_{\Phi}$$

计算过程:

a) 给定某一转矩角 θ ;

b) 假设交轴电流分量 I'_q , 则交轴电枢磁动势 $F_{aq} = \frac{1.35 K_{dp} N K_{aq}}{p} I'_q$;

c) 根据 F_{aq} 由预先算得的 $\Phi_{aq1} - F_{aq}$ 曲线查取相应的 Φ_{aq1} ;

- d) 由 Φ_{aq1} 求出交轴电枢反应电动势 $E_{aq} = 4.44 f K_{dp} N \Phi_{aq1}$;
- e) 计算 $X_q = X_1 + \frac{E_{aq}}{I'_q} = X_1 + X_{aq}$;
- f) 代入式 $I_q = \frac{X_d U \sin \theta - R_1 (E_0 - U \cos \theta)}{R_1^2 + X_d X_q}$ 即可求出交轴电枢电流计算值 I_q ;
- g) 比较 I_q 和 I'_q , 重复(b)~(f)步骤, 反复进行迭代计算, 直至两者之间的误差在容许范围内。

8. 自起动永磁同步电动机的起动过程[6] [7] [8]

异步起动永磁同步电动机跟普通感应电动机一样, 起动中同样要最小转矩倍数、起动电流倍数、起动转矩倍数。同时, 电机牵入同步能力要足够大。转子上装有永磁体的永磁同步电动机起动过程与感应电动机相比过程更复杂; 起动中包括平均转矩和脉动转矩, 且这些转矩的幅值均随电动机转速的改变而变化。

自起动永磁同步电动机可看成将永磁磁极放在鼠笼式感应电动机的转子中。永磁体提供磁通代替电励磁。起动中的驱动转矩由鼠笼导条产生异步转矩, 同时, 永磁转矩为制动性质。稳态运行时, 永磁转矩起主要作用; 转子转速决定鼠笼导条的异步转矩性质, 转子转速大于同步速时, 异步转矩为制动性质, 当转速小于同步速时, 异步转矩为驱动性质, 当转速等于同步速时, 异步转矩为零, 总而言之, 鼠笼导条的作用是让电机运行在同步速。

9. 异步起动永磁同步电动机的设计

9.1. 永磁同步电机设计范围

永磁同步电动机包括如下范围: a) 额定参数和技术要求: 额定功率、相数、额定频率、额定线电压、极对数、额定效率、启动电流倍数、额定功率因数、启动转矩倍数、失步转矩倍数等 10 项数据为电机最基本数据, 后四项是根据实际要求来确定的; b) 主要尺寸: 转子磁路结构、气隙长度、定子外内径、转子外内径、定转子铁心长度、电枢计算长度、定转子槽数、定子每极每相槽数、极距、硅钢片质量; c) 永磁体计算; d) 定转子冲片冲片计算; e) 绕组计算; f) 磁路计算; g) 参数计算: 电阻、转子绕组质量、漏抗系数、漏磁导、漏抗、折算系数等; h) 交轴磁化曲线计算; j) 工作特性计算; k) 启动性能计算。

9.2. 确定设计任务

在设计之前要明确设计任务, 应充分考虑电机环境和使用工况基础上, 确定电机技术指标和设计参数。技术指标包括: 额定功率、相数、额定效率、额定电压、功率因数、额定频率、转速、起动转矩倍数、起动电流倍数等。

选取电机初始设计参数

根据所设计电机规格和电机技术指标, 根据预估公式、设计经验、计算来确定电机初始设计参数; 主要包括定子内径和铁心有效长度、定转子冲片及槽型尺寸、永磁体尺寸的估算、电枢绕组设计等。

A) 主要尺寸比。定子有效长度与极距之比称为主要尺寸比。当电机体积不变时, 主要尺寸比大的电机, 电机细长, 反之则较粗短。主要尺寸比对电机技术经济性能有明显的影。

定子最常用的有四种, 梨形槽、梯形槽、半闭口槽和开口槽。其中梨形槽最常用。由给定的定子冲片即可知道定子冲片内径, 再由电动机的功率和电机常数选择电枢计算长度。定子冲片内径 D_{i1} 和电枢计算长度 L_{ef} , 根据公式(3)确定。根据所选规格, 定子冲片采用 Y2 或 Y 系列。绕组参数预估值和铁心长度也采用 Y2 或 Y 系列。叠压的定子铁心可扭斜一个定子齿距。

$$D_{it}^2 L_{ef} \propto \frac{1}{AB_{\delta}} \quad (3)$$

永磁同步电机设计的难点也是关键点是转子设计。包括预估永磁体尺寸、确定其槽数、确定磁路结构。内置式转子常被自启动永磁同步电机采用。内置式转子磁路结构分为径向式、切向式和混合式三种。其定转子槽数确定虽跟感应电动机同,但槽配合确定不同。槽配合对自启动永磁同步电动机的附加损耗、振动、噪音、起动性能等有很大影响。

B) 选取电磁负荷。线负荷定义 A 为定子内圆周(电枢绕组圆)上单位长度的安培导体数,磁负荷定义 B_{δ} 为气隙(基波)磁通密度的幅值。电机设计电磁负荷依据电机制造和运行经验所积累的数据来选取。

C) 永磁体尺寸的估算。磁化方向长度 h_M 的确定应使电动机的直轴电抗合理 X_{ad} , 不能过薄, 确保永磁体在最佳工作点工作。电动机性能调整, 一般调整宽度 b_M 。永磁体尺寸不但影响电动机运行性能, 而且还影响空载漏磁系数, 永磁体利用率就被决定。一般永磁体尺寸越大, 空载漏磁系数越小。

D) 电枢绕组设计。其绕组跟普通交流电动机同。因永磁同步电动机气隙磁场谐波多, 使电动势谐波也多。为避免电动机绕组中产生环流, 同时削弱电动势谐波, 同步电动机采用 Y 接的双层短距绕组。为减少杂散损耗和改善其波形, 采用双层正弦绕组。限制电动机的槽满率、定子槽形尺寸、电磁负荷来确定永磁同步电动机的线规和绕组匝数。

E) 槽满率核算。导线中有规则排列所占面积与槽有效面积之比值为槽满率, 一般控制在 0.75~0.85 范围。如果槽满率过高或过低, 调整线规, 调整槽尺寸。

9.3. 校核电机性能指标

通过等效磁路法, 采用迭代法, 电机中各部分磁密就可计算出来: 定转子气隙磁密、定转子扼磁密、齿磁密可参考 Y 系列电磁负荷控制值校核; 电机的额定效率、功率因数、运行性能参数等; 起动性能: 起动转矩、起动转矩倍数和起动电流。

9.4. 调整电机有关参数

由电机校核计算得到的参数, 电机起动性能、运行性能、各部分磁密等。判断电机各部分磁密与经验参数取值是否合适; 判断设计技术性能要求与电机起动性能和运行性能比较是否满足设计要求。如果全部或部分不满足要求或不合适, 电机参数就不合适, 那么我们需要重新调整电机参数重新计算。

9.5. 确定电机设计方案

电机性能各方面指标满足要求或合适时, 就完成了自启动永磁电动机设计, 电机设计方案就这样确定了。

10. 结论

文章介绍永磁同步电动机特点及应用, 详细阐述和分析了自启动永磁同步电动机工作原理、设计方法及设计特点等, 最后提出了自启动永磁同步电动机的设计方案、设计步骤。自启动永磁同步电动机具有高效率和高功率因数, 还可自起动等优点, 在能源缺乏大背景下, 具有广阔的市场前景。

参考文献 (References)

- [1] 兰志勇. 内嵌式正弦波永磁同步电机设计及优化[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [2] 黄坚, 等, 编. 实用电机设计计算手册[M]. 上海: 上海科学技术出版, 2010: 155-157.
- [3] 唐任远, 等. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 174,185-187.

-
- [4] 张波. 不同转子结构参数下永磁同步电动机高性能控制策略的研究[J]. 电气传动, 1999(4): 18-21.
- [5] 何伟. 大功率自起动永磁同步电动机设计[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008:18-19.
- [6] 刘秀君, 等. 三相异步起动永磁同步电动机起动特性[J]. 电机与控制, 2006, 10(3): 269-274.
- [7] 林友志. 永磁电机牵入同步的分析[J]. 中小型电机, 1997, 24(3): 57-59.
- [8] Alfio, C. and Angeio, R. (1991) Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors. *IEEE Transaction on Industry Applications*, **27**, 350-354.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org