

永磁同步电动机空载电势最佳取值问题研究

米春亭^① 罗兵^② 季小尹^③ 蒋宗荣^④

摘要 研究了永磁同步电动机空载电势的最佳取值问题, 导出了计算空载电势的公式, 空载电势与功率因数、过载倍数、效率及起动特性的关系。最后给出计算实例, 并结合实验结果进行了分析讨论。

关键词 永磁, 同步电动机, 空载电势

引言

空载电势 E_0 是永磁同步电动机的重要参数, 合理选取 E_0 可提高电机效率、降低永磁材料用量。

永磁式同步电动机的励磁不能调节, 因而不能象电磁式同步电机那样通过调节励磁改变功率因数, 以达到改善电网功率因数的目的[1,2], 因而必须合理选取空载电势 E_0 。

空载电势的取值应满足几方面的要求: ①在较宽范围内获得较高的功率因数和较高的效率; ②满足过载要求; ③满足起动要求; ④节省原材料[3,4]。

1 空载电势的求取

永磁同步电动机的矢量图如图1所示, 由图1可以导出

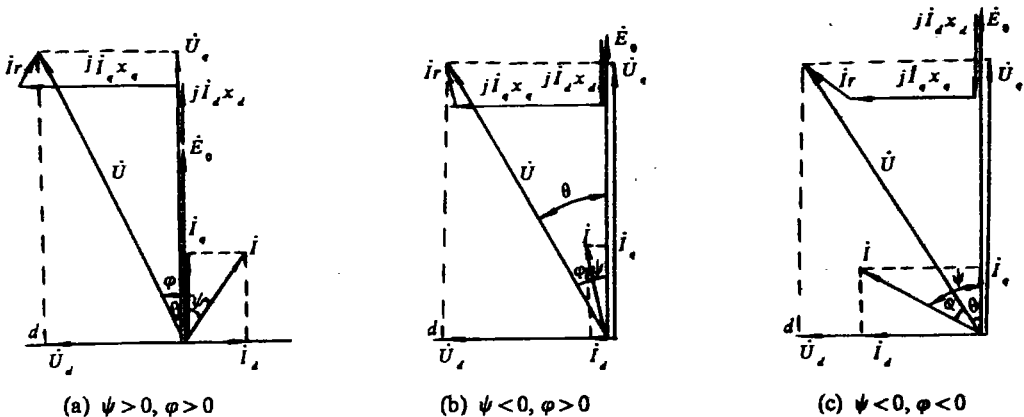


图1 永磁同步电动机的矢量图

① 西北工业大学副教授 ② 西北工业大学助工 ③ 西北工业大学讲师 ④ 西北工业大学教授
 本文收到日期: 1992年5月26日

$$\varphi = \arctg \left[\frac{x_d(E_0 / U - \cos\theta) + r \sin\theta}{-x_q \sin\theta + r(E_0 / U - \cos\theta)} \right] + \theta \tag{1}$$

及
$$E_0 - \left[\cos\theta + \frac{x_d \sin\theta \operatorname{tg}(\theta - \varphi) - r \sin\theta}{x_q + r \operatorname{tg}(\theta - \varphi)} \right] U = 0 \tag{2}$$

式中 φ 为功率因数角; θ 为功角, x_d 、 x_q 为直轴和交轴同步电抗, r 为定子电阻。

通常 $\cos\varphi$ 是按额定指标给出的, 而输入功率 P_1 与 θ 的关系式为

$$P_1 = \frac{m}{r^2 + x_d x_q} \left[x_q E_0 U \sin\theta + \frac{U^2}{2} (x_d - x_q) \sin 2\theta - r E_0 U \cos\theta + r U^2 \right] \tag{3}$$

由式(3)得

$$E_0 (x_q \sin\theta - r \cos\theta) - \frac{U}{2} (x_d - x_q) \sin 2\theta = \frac{P_1}{mU} (r^2 + x_d x_q) - rU \tag{4}$$

联立式(2)和式(4)用计算机或作图法可求出 E_0 和 θ , 如图 2 所示。

2 空载电势与电机性能的关系

2.1 空载电势与功率因数的关系

式(1)给出了 φ 与 E_0 的关系式。利用计算机仿真程序画出的功率因数特性如图 3 所示。由图 3 可见, 增大 E_0 可提高功率因数, 直至电机运行在容性状态。容性的功率因数对电网是有利的, 但过高的 E_0 将给电机本身带来诸多不利影响, 如电流增大, 效率降低, 起动性能变差等。

2.2 空载电势与过载倍数的关系

为求出过载倍数, 可将式(3)对 θ 微分, 然后用计算机求出最大功率对应的 θ_{\max} , 于是过载倍数为

$$K_M = \frac{2\sin\theta_{\max} + K\sin 2\theta_{\max} + 2r(U/E_0 - \cos\theta_{\max})/x_q}{2\sin\theta_N + K\sin 2\theta_N + 2r(U/E_0 - \cos\theta_N)/x_q} \tag{5}$$

式中 $K = \frac{x_d - x_q}{x_q} \cdot \frac{U}{E_0}$

由式(3)可得

$$\begin{aligned} & 2\sin\theta_N + K\sin 2\theta_N + 2r(U/E_0 - \cos\theta_N)/x_q \\ & = 2U(r^2 + x_d^* x_q^*) \cos\varphi_N / E_0 \end{aligned} \tag{6}$$

式中 加上标* 的量是该量的标么值。

如近似认为 $\theta_{\max} = 90^\circ$, 则可进一步导出:

$$K_M = \frac{E_0}{U} \cdot \frac{x_q^*}{r^2 + x_d^* x_q^*} \cdot \frac{1}{\cos\varphi_N} \tag{7}$$

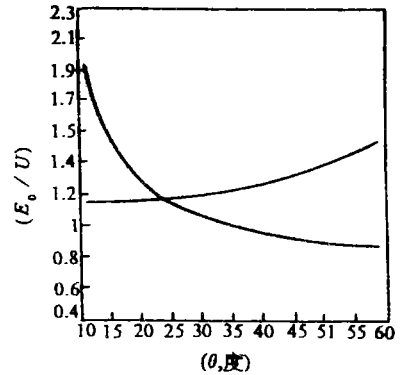
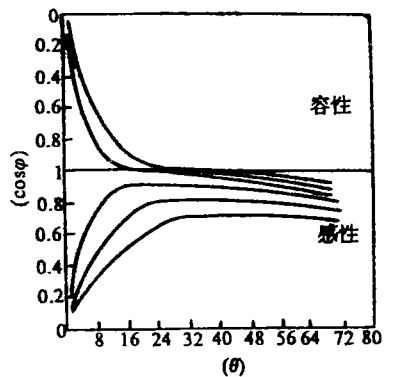


图 2 作图法求 E_0 / U



(由上至下, $E_0 / U = 1.2, 1.1, 1.0, 0.9, 0.8, 0.7$)

图 3 功率因数特性

工程上用式 (7) 计算 K_M 是可行的, 因为用式 (5) 求出的 K_M 是极限过载倍数, 在此功角下电机是不能稳定运行的, 而电机技术指标中给出的 K_M 是电机能短时稳定运行的过载倍数. 实验证明, 永磁同步电机在 $x_d^* / x_q^* = 2.0, \theta = 90^\circ$ 时, 电机也不能稳定运行 [5,6].

2.3 空载电势与效率的关系

电机的效率

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad}}{P_1} \right) \times 100\% \quad (8)$$

式中 $P_{Cu}, P_{Fe}, P_{mec}, P_{ad}$ 分别为定子铜耗、铁耗、机械损耗和附加损耗.

由 $P_{Cu} = mI^2r$ 可见, 减少电流可以降低铜耗, 提高效率. 而铁耗与磁密平方成正比, 可以导出, $P_{Fe} \propto E_0^2$, 因而为降低损耗, 应使 E_0 尽可能小. 此外, 减小 E_0 还有助于减小附加损耗.

2.4 空载电势与起动性能的关系

永磁同步电动机借助转子鼠笼实现异步起动. 起动过程中, 转子永久磁极产生的磁场将在定子中感应电势, 从而产生发电制动转矩 M_A 和脉振转矩 $M_{(a)}$, 可以导出.

$$M_A = - \frac{[r^2 + (1-s)^2 x_d^2](1-s)r}{\Omega_1 [r^2 + (1-s)^2 x_d x_q]^2} E_0^2 \quad (9)$$

式中 Ω_1 —同步角速度.

$$M_{(a)} = \frac{mE_0 U}{\Omega_1 x_d} \quad (10)$$

由式 (9)、(10) 看出, $M_A \propto E_0^2, M_{(a)} \propto E_0$, 因此, 为减少起动过程制动力矩和起动过程的振荡, 均应减小 E_0 的数值.

3 算 例

对一台 0.8 kW 纺织用稀土永磁同步电动机进行分析和实验验证.

该电机额定功率为 0.8 kW, 额定电压 220 V, 额定转速 1000 rpm, $r = 3.8 \Omega, x_d = 68.0 \Omega, x_q = 70.2 \Omega$.

作者设计并制做了两台样机. 1# 样机额定功率因数为 1.0, 联立式 (2)、(4) 求出 $\theta_N = 23.55^\circ$, $E_0 / U = 1.0604$, 即 $E_0 = 233 \text{ V}$. 用式 (1) 得到的 $\cos\phi$ 仿真曲线如图 4 所示, 图中还给出了实测曲线, 对比可见, 仿真值与实测值吻合较好.

2# 样机 $\cos\phi = 0.9$, 于是 $E_0 / U = 0.85$, 即 $E_0 = 187.1 \text{ V}$. 两台样机的实测结果同时列于表 1.

两台样机的起动特性曲线如图 5 所示. 对比看出, 2# 样机在额定电压下的 $M-s$ 曲线相当于 1# 样机

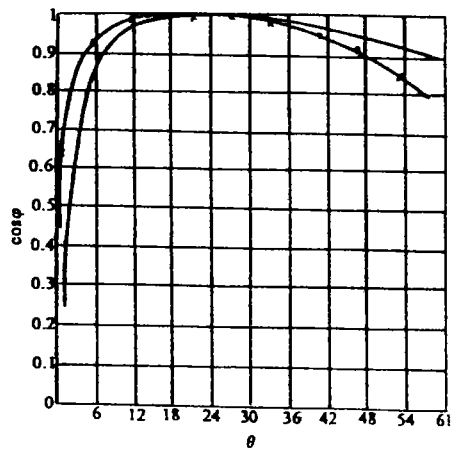


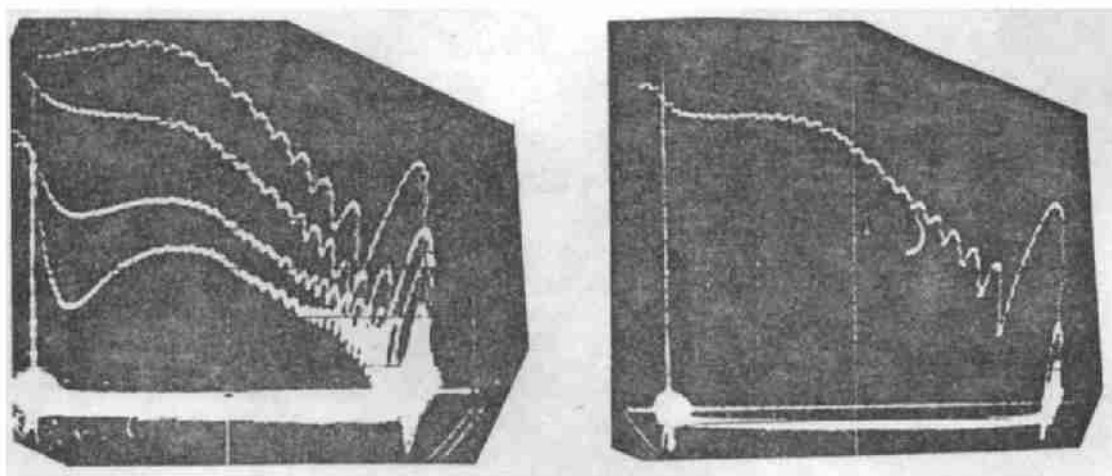
图 4 功率因数仿真与实测曲线

电压升至 230 V 后的 $M-s$ 曲线, 从而说明降低 E_0 后, 改善了电机的起动性能。

表 1 样机仿真与实测结果

		I_N (A)	P_{Out} (W)	P_{In} (W)	η_N (%)	$\cos\varphi_N$	K_M	K_s^*
1#样机 $E_0 = 233\text{V}$	仿真值	1.336	20.3	26.5	91.0	1.0	2.56	0.98
	实测结果	1.36	21.1	24.0	91.5	0.98	2.4	0.93
2#样机 $E_0 = 187.1\text{V}$	仿真值	1.474	24.8	19.7	91.0	0.906	2.13	1.15
	实测结果	1.49	25.4	18.4	91.2	0.89	2.0	1.05

· 注: K_s 指电机带负荷启动时, 能进入同步状态的最大负载转矩与额定转矩之比



(1) 1#样机(由上至下, $U = 240\text{V}, 230\text{V}, 220\text{V}, 205\text{V}$) (2) 2#样机 ($U = 220\text{V}$)

图 5 样机起动特性曲线

由表 1 还看出, 与 1#样机相比, 2#样机虽 $\cos\varphi$ 由 1.0 降至 0.9, 但稀土材料用量减少 20%, 而效率基本不变; 过载倍数有所降低, 牵入转矩相应增大。

4 分析与讨论

功率因数高是永磁同步电动机可贵的特性之一, 因而在空载或轻载起动的场合以及经常性处于轻载运行的场合, 应尽可能将功率因数设计的高一些, 如将额定功率因数设计为 1.0, 则电机轻载时功率因数为容性, 这对电网是有利的。此时, 由式 (2) 及 (4) 可导出 $E_0 / U = 1.0 \sim 1.08$ 。

对起动要求高的场合则不然, 为得到良好的起动性能, E_0 / U 不能过大, 以期得到良好的起动性能。通常取 $\cos\varphi$ 在 0.9 左右, 此时 E_0 / U 为 0.85 左右。此时的功率因数仍比三相异步电机高 10~20%, 而且可减小永磁材料用量, 降低电机成本。

算例的功率因数仿真值与实测值在 $(40 \sim 160\%) P_N$ 范围内基本一致。超出此范围则误差较大。这是因为计算时假设 x_d 、 x_q 恒定, 实际上, 负载小于 40% 或大于 160% 时, x_d 、 x_q 变化较大, 因而仍假定 x_d 、 x_q 不变, 仿真的结果与实测值误差较大。但对特定电机而言, 负载超出 $(40 \sim 160\%) P_N$ 的情况并不常用, 因而本文假设 x_d 、 x_q 不变进行分析是可行的。

此外, 作者还利用本文的有关理论和公式分析了多种型号电机, 都得到比较满意的结果, 从而说明本文的理论与推导是正确的, 且具有普遍意义。

参 考 文 献

- [1] 陈峻峰. 永磁电机. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] 高景德, 张麟征. 电机过渡过程的基本理论及分析方法. 北京: 科学出版社, 1982
- [3] Sebastian T, Slemon G R, Rahman M A. Modelling of Permanent Magnet Synchronous Motors. *IEEE Trans Mag*, 1986, 22(9): 1069~1086
- [4] Consoli Alfio, Raciti Angelo. Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Trans Industry Application*, 1991, 27(2): 350~354
- [5] 蒋宗荣, 米春亭, 窦满锋. 稀土永磁高效节能同步电动机起动问题研究. 北京: 中国航空科技文献, HJL910076, 1991
- [6] Chalmers B J, Hamed S A, Baines G D. Parameters and Performance of a Highfield Permanent Magnet Synchronous Motor for Variable Frequency Operation. *IEE* 1985, 132B(3): 117~124

On Selection of Back emf of Permanent Magnet Synchronous Motor

Mi Chunting Luo Bin Ji Xiaoyin Jiang Zongrong

(Department of Automatic Control
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

The authors have not found papers in the open literature dealing with the selection of back emf of Permanent Magnet (PM) Synchronous Motors (SM). The authors hold the view that this is so because developed countries possess already inverter-fed PM motor drives, which are better than line-start PMSM ones.

The contributions of this paper are:

(1) The authors put forward for the first time equations for computing back emf of PMSM with acceptable accuracy. The software of computing back emf makes use of eqs.(2) and (8).

(2) The relationships between back emf and power factor, overload capacity, efficiency and starting performance are given in eqs.(1), (5), (8) and (9).

The equations have been applied to the design of a 0.8kW rare-earth PMSM. 25,000 such PMSM drives have been put in use by textile manufacturers. Compared with previous PMSM drives, the amount of rare-earth PM material used drops from 0.49 kg to 0.34 kg, while motor efficiency and power factor remain to be 91% and 90% respectively.

Key words permanent magnet, synchronous motor (PMSM), back emf