

永磁同步电动机的起动

姚有光 陈 鸣

摘要 本文讨论了永磁同步电动机起动过程中的转矩,分析了永磁同步电动机设计参数对起动、牵入同步的影响,阐明最磁设计时如可满足起动和牵入同步的要求。

关键词 永磁同步电动机;起动

中图分类号 TM302①

0 引言

自起动永磁同步电动机的起动过程是指从转差率 $s = 1$ 到 $s = 0$ 的异步起动和牵入同步的整个过程。永磁同步电动机设计时要根据负载的性质全面地计及起动和牵入同步的要求,否则电机无法正常运行。

1 稀土永磁同步电动机的起动特性

稀土永磁同步电动机与异步电动机相比较,具有较高的效率、功率因数指标和较宽的高效、高功率因数运行区,是一种较理想的节能电机。但是,由于转子上永磁体的存在和转子电磁的不对称性,以及两者的互相交织,使其起动过程远较鼠笼异步电动机复杂。

在起动过程中,永磁体磁场随转子以 $n = (1 - s)n_1$ 转速旋转,则在定子绕组中感生 $(1 - s)f_1$ 频率的对称三相电势。由于电网频率为 f_1 ,对于频率为 $(1 - s)f_1$ 的定子电势,接至电网就相当于短路,于是定子绕组内将流过一组频率为 $(1 - s)f_1$ 的三相短路电流。所以从叠加原理考虑,永磁同步电动机定子绕组中存在两个不同频率独立的交流激励源,即外加的频率为 f_1 的对称三相电压和转子永磁体感生的频率为 $(1 - s)f_1$ 的对称三相电势。若将起动过程近似地看成是一系列不同转差率下的稳态异步运行(即设转子转速 $n = (1 - s)n_1$ 为常值),当磁路为线性时,永磁同步电动机起动过程可以看成是:转子无永

① 收稿日期:1994-01-26

磁体时,转子不对称鼠笼异步电动机稳态运行和转子上有永磁体励磁、定子三相短路的异步稳态运行的叠加。

1.1 转子上无永磁体时,转子不对称鼠笼异步电动机稳态运行

设永磁同步电动机的定子绕组接到三相对称电源,其相电压为(以下所有表达式均用标么值写出):

$$\left. \begin{aligned} U_A &= \sqrt{2} U \cos t \\ U_B &= \sqrt{2} U \cos(t - 120^\circ) \\ U_C &= \sqrt{2} U \cos(t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

采用 d, q, o 坐标系,则定子电压的直轴和交轴分量为:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= \sqrt{2} U \cos(st - \theta_0) \\ U_q &= \sqrt{2} U \sin(st - \theta_0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 θ_0 为 $t = 0$ 时转子的初相角(d 轴与 A 轴的夹角)。由于 U_d 和 U_q 分别为转差频率的正弦量,根据电路理论,可采用相量法求解电压方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= [r_s + jsX_s(js)]\dot{I}_d + (1-s)X_q(js) \cdot \dot{I}_q \\ j\dot{U} &= -(1-s)X_d(js) \cdot \dot{I}_d + [r_s + js \cdot X_q(js)]\dot{I}_q \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

得到

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_d &= \frac{\frac{r_s}{1-2s} - jX_q(js)}{X_d(js) \cdot X_q(js) + \frac{r_s^2}{1-2s} + j\frac{s \cdot r_s}{1-2s}[X_d(js) + X_q(js)]} \dot{U} \\ \dot{I}_q &= \frac{\frac{r_s}{1-2s} - jX_d(js)}{X_d(js) \cdot X_q(js) + \frac{r_s^2}{1-2s} + j\frac{sr_s}{1-2s}[X_d(js) + X_q(js)]} \dot{U} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

而

$$\psi_d = -X_d(js)\dot{I}_d, \quad \psi_q = -X_q(js)\dot{I}_q \quad (5)$$

式中 $X_d(js)$ 、 $X_q(js)$ 分别为直轴电抗函数和交轴电抗函数。

将 \dot{I}_d 、 \dot{I}_q 、 ψ_d 和 ψ_q 分成实部和虚部,即

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_d &= I_{dn} + jI_{di}, \quad \dot{I}_q = I_{qn} + jI_{qi} \\ \psi_d &= \psi_{dn} + j\psi_{di}, \quad \psi_q = \psi_{qn} + j\psi_{qi} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

可得到直轴和交轴的电流、直轴和交轴的磁链瞬时值为:

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \operatorname{Re}[\sqrt{2} \dot{I}_d e^{jst}] = \sqrt{2} [I_{dn} \cos(st) - I_{di} \sin(st)] \\ i_q &= \operatorname{Re}[\sqrt{2} \dot{I}_q e^{jst}] = \sqrt{2} [I_{qn} \cos(st) - I_{qi} \sin(st)] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= \sqrt{2} [\psi_{dR} \cdot \cos(st) - \psi_{dI} \cdot \sin(st)] \\ \psi_q &= \sqrt{2} [\psi_{qR} \cdot \cos(st) - \psi_{qI} \cdot \sin(st)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

于是得到无永磁体时转子不对称鼠笼异步电动机稳定运行时的电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_{me} &= i_{qs} \cdot \psi_{ds} - i_{ds} \cdot \psi_{qs} \\ &= 2[(I_{qR} \cdot \cos(st) - I_{qI} \cdot \sin(st)) \cdot (\psi_{dR} \cdot \cos(st) - \psi_{dI} \cdot \sin(st)) \\ &\quad - (I_{dR} \cdot \cos(st) - I_{dI} \cdot \sin(st)) \cdot (\psi_{qR} \cdot \cos(st) - \psi_{qI} \cdot \sin(st))] \\ &= (I_{qR} \cdot \psi_{dR} + I_{qI} \cdot \psi_{dI} - I_{qR} \cdot \psi_{qR} - I_{dI} \cdot \psi_{qI}) \\ &\quad + (I_{qR} \cdot \psi_{dR} - I_{qI} \cdot \psi_{dI} - I_{dR} \cdot \psi_{qR} + I_{dI} \cdot \psi_{qI}) \cdot \cos(2st) \\ &\quad + (I_{qI} \cdot \psi_{qR} + I_{dR} \cdot \psi_{qI} - I_{qI} \cdot \psi_{dR} - I_{dR} \cdot \psi_{dI}) \cdot \sin(2st) \\ &= T_{me(av)} + T_{me(2s)} \end{aligned} \quad (9)$$

式中各量下标 U 表示无永磁体时转子不对称鼠笼异步电动机似稳态运行, R, I 表法电流、磁链的实部和虚部。

从式(9)可见, 转子无永磁体时转子不对称鼠笼异步电动机似稳态运行状态, 电磁转矩中包括平均转矩 $T_{me(av)}$ 和频率为 $2sf_1$ 的脉振转矩 $T_{me(2s)}$ 。

此时, 其平均转矩 $T_{me(av)}$ 由两部份组成, 即

$$T_{me(av)} = T_{me(av)+} + T_{me(av)-} \quad (10)$$

定子对称三相绕组接到频率为 f_1 的对称三相电源上, 定子边将产生一个同步旋转磁场; 转子边电磁不对称, 在转子绕组中将感应产生一频率为 sf_1 的转子电流, 其所激励的磁场为椭圆旋转磁场, 该磁场可分解为正转和反转的两个旋转磁场。正转分量与定子边同步旋转磁场彼此相对静止, 相互作用产生与通常异步电动机的电磁转矩一样的异步电磁转矩, 即为 $T_{me(av)+}$, $T_{me(av)+}$ 是由定子边基频 (f_1) 电流所产生。转子边的反转分量对转子的相对转速为 $-sn_1$, 对定子的相对转速为 $n + sn_1 = n_1(1 - s) - sn_1 = n_1(1 - 2s)$, 这将在

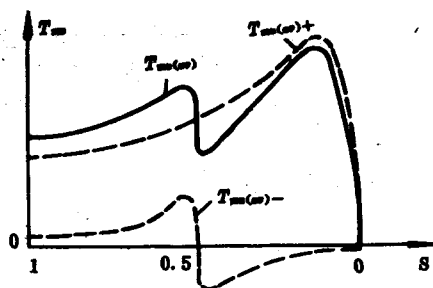


图1 转子不对称时转矩 $T_{me(av)+}$ 、 $T_{me(av)-}$ 和合成转矩 $T_{me(av)}$ 与转差率 s 的关系

定子三相绕组中感应出一个频率为 $(1 - 2s)f_1$ 的定子电流, 由此定子电流产生的旋转磁场与转子磁场的反转分量组成另一对相对静止磁场, 相互作用产生另一个异步电磁转矩, 即为 $T_{me(av)-}$, 称为单轴转矩; 当转子转速 $n = n_1/2$ 时, 转子上反转旋转磁场相对定子转速为零, 此时定子边绕组(二次绕组)中无感应电流, 故 $T_{me(av)-} = 0$ 。 $T_{me(av)+}$ 和 $T_{me(av)-}$ 的 $T-s$ 曲线如图1中虚线所示。由于单轴转矩 $T_{me(av)-}$ 的存在, 使平均转矩 $T_{me(av)}$ 在 $s < 0.5$ 附近出现下凹, 转子愈不对称, 下凹愈深。

除上述恒定转矩外, 还有频率为 $2sf_1$ 的脉振转矩 $T_{me(2s)}$, 这是由于交、直轴参数不对称而引起的。

1.2 转子有永磁体励磁的定子三相短路时的异步稳定运行

此运行状态实质就是同步发电机在某一转速下三相稳定短路情况。对于 d, q, o 坐标

系,三相稳定短路时,其直轴和交轴电流均为恒定直流,磁链 Ψ_d 和 Ψ_q 亦为恒定,所以电压方程为

$$\begin{cases} 0 = r_s i_{ds} - (1-s)\Psi_{qs} \\ 0 = r_s i_{qs} + (1-s)\Psi_{ds} \end{cases} \quad (11)$$

式中 r_s 为定子电阻

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = \Psi_{ms} - X_s i_{ds} = \sqrt{2} E_0 - X_s i_{ds} \\ \Psi_{qs} = -X_s i_{qs} \end{cases} \quad (12)$$

由电压方程式(11)可解得

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{X_r(1-s)^2 \cdot \sqrt{2} E_0}{r_s^2 + (1-s)^2 X_s \cdot X_r} \\ i_{qs} = \frac{-r_s}{1-s} \frac{1}{X_r} i_{ds} = \frac{(1-s)r_s \sqrt{2} E_0}{r_s^2 + (1-s)^2 X_s \cdot X_r} \end{cases} \quad (13)$$

直轴和交轴磁链为

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = \sqrt{2} E_0 - X_s i_{ds} = -\frac{r_s}{1-s} i_{qs} \\ \Psi_{qs} = \frac{r_s}{1-s} i_{ds} \end{cases} \quad (14)$$

相对而言,定子电阻 r_s 很小,所以式(13)和式(14)可近似为

$$\begin{cases} i_{ds} \approx \frac{\sqrt{2} E_0}{X_s}, & i_{qs} \approx 0 \\ \Psi_{ds} \approx 0, & \Psi_{qs} \approx \frac{r_s}{1-s} \frac{\sqrt{2} E_0}{X_s} \end{cases} \quad (15)$$

这样,在转子有永磁体励磁的定子三相短路的异步稳定运行电磁转矩 T_{ms} 应为

$$\begin{aligned} T_{ms} &= \Psi_{ds} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{ds} = -\frac{r_s}{1-s} (i_{qs}^2 + i_{ds}^2) \\ &\approx -\frac{r_s}{1-s} \left(\frac{\sqrt{2} E_0}{X_s} \right)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

T_{ms} 是恒定的负值转矩,即是一个发电机性质的恒定制动转矩,其值等于短路时定子的电磁功率(即定子铜耗)除以转子的角速度 $1-s$ 。其最大值出现在转差率 $s = 0.95$ 附近,如图2所示。

1.3 永磁同步电动机的似稳态起动运行

将无永磁体转子不对称鼠笼异步电动机运行时的直轴和交轴电流与转子有永磁体励磁的定子三相稳定短路异步运行时直轴和交轴电流相加,则得到永磁同步电动机的似稳态起动运行过程时总的直轴电流和交轴电流;同理,也得到总的直轴和交轴磁链。

$$\begin{cases} i_d = i_{ds} + i_{dr}, & i_q = i_{qs} + i_{qr} \\ \Psi_d = \Psi_{ds} + \Psi_{dr}, & \Psi_q = \Psi_{qs} + \Psi_{qr} \end{cases} \quad (17)$$



图2 转子有永磁体励磁、定子三相短路异步稳定运行时的转矩 T_{ms} 与转差率 s 关系

所以,永磁同步电动机定子绕组接到电网后,似稳态异步稳定运行时,总的电磁转矩 T_m 为:

$$\begin{aligned} T_m &= \Psi_{\delta} i_q - \Psi_q i_{\delta} \\ &= (\Psi_{\delta s} + \Psi_{\delta k}) \cdot (i_{qs} + i_{qk}) - (\Psi_{qs} + \Psi_{qk}) \cdot (i_{\delta s} + i_{\delta k}) \\ &= (\Psi_{\delta s} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{\delta s}) + (\Psi_{\delta k} \cdot i_{qk} - \Psi_{qk} \cdot i_{\delta k}) \\ &\quad + (\Psi_{\delta s} \cdot i_{qk} + \Psi_{\delta k} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{\delta k} - \Psi_{qk} \cdot i_{\delta s}) \end{aligned} \quad (18)$$

由(18)式可见,总的电磁转矩分三部份:第一部份 $(\Psi_{\delta s} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{\delta s})$ 是无永磁体转子不对称鼠笼异步电动机稳态运行时的电磁转矩 T_{ms} ,其中包括基频的异步转矩 $(T_{ms(\omega)+})$ 、 $2sf_1$ 频的单轴转矩 $T_{ms(\omega)-}$ 和 $2sf_1$ 频的脉振转矩 $T_{ms(2s)}$;第二部份 $(\Psi_{\delta k} \cdot i_{qk} - \Psi_{qk} \cdot i_{\delta k})$ 是转子有永磁体励磁的定子三相稳定短路稳态异步运行时制动性转矩 T_{mk} ;第三部份是上述两种情况下电流和磁链相互交叉作用而产生的电磁转矩 $T_{m(s)}$;在似稳态起动(即异步运行)时, $T_{m(s)}$ 是个以 sf_1 频率脉振的转矩。所以总的电磁转矩 T_m 为:

$$\begin{aligned} T_m &= T_{ms} + T_{mk} + T_{m(s)} \\ &= T_{ms(\omega)+} + T_{ms(\omega)-} + T_{ms(2s)} + T_{mk} + T_{m(s)} \\ &= T_{m(\omega)} + T_{m(2s)} + T_{m(s)} \end{aligned} \quad (19)$$

其中平均电磁转矩

$$T_{m(\omega)} = T_{ms(\omega)+} + T_{ms(\omega)-} + T_{mk} \quad (20)$$

为无永磁体转子不对称鼠笼异步电动机稳态运行和转子有永磁体励磁、定子三相绕组短路稳态异步运行两种情况下平均电磁转矩的叠加。其 $T_{m(\omega)}-s$ 曲线如图3所示,从图上可见:由于存在制动转矩 T_{mk} 和单轴转矩 $T_{ms(\omega)-}$,使合成平均转矩 $T_{m(\omega)}$ 的 $T-s$ 曲线在 $s = 0.95$ 附近和 $s < 0.5$ 附近下凹。在起动时,其中任一个下凹处对应的最小转矩 T_{min} 若小于负载转矩,电动机只能在低速运转而无法接近同步速。转差频脉振转矩 $T_{m(s)}$ 和二倍转差频脉振转矩 $T_{m(2s)}$ 在起动过程可能产生有害的噪声和振动;永磁同步电动机经平均电磁转矩 $T_{m(\omega)}$ 加速至接近同步速后,还需

经历牵入同步过程,这个过程中,二倍转差频脉振转矩 $T_{m(2s)}$ 中的磁阻转矩分量和转差频脉振转矩 $T_{m(s)}$ 中由永磁体与定子边的基频 f_1 磁场相互作用产生的脉振转矩分量,使电机转速在同步速上下经历一个衰减振荡过程,最后转子被牵入同步速,如图4所示。由图4可见,因脉振转矩存在,起动过程中电机转速波动;图4还说明,增大永磁体工作点的磁势 F_m (对应于图4中的等效励磁电流 I_{fm}) 有利于牵入同步速。如 $I_{fm} = 3.5$ 时,在转差率接近 0.2 时就开始牵入; $I_{fm} = 1.5$ 时, $s = 0.1$ 以后才开始牵入。

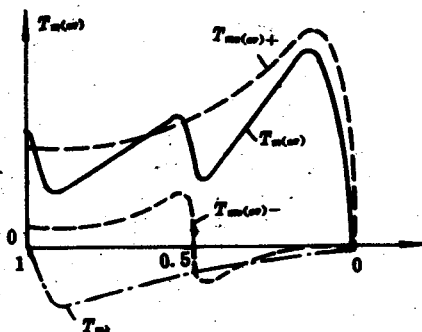


图3 永磁同步电动机起动时平均转矩 $T_{ms(\omega)+}$ 、 $T_{ms(\omega)-}$ 、 T_{mk} 和合成平均转矩 $T_{m(\omega)}$ 与转差率 s 的关系

2 电磁设计时,如何满足永磁同步电动机起动要求

就转矩而言,永磁同步电动机起动性能应以转差率 $S = 1$ 时的起动转矩 T_{st} 、 $T_{m(s)}$ - S 曲线上的最小转矩 T_{min} 和转差率 $S = 0.05$ 时的标称牵入转矩 T_{pi} 来衡量。非特别说明,在电磁设计时都应满足全负荷(额定负荷转矩)起动的要求。

从式(20)可见,总平均电磁转矩 $T_{m(s)}$ 与转差率 S 关系曲线是由三部份组成:

15kW, 4级 $\frac{X_g}{X_d} = 3.198$	E_0/U_N	1.1375	1.0706	1.011	0.9579	0.91	0.8445
	$\eta(\%)$	91.7	92.4	92.7	92.8	93.4	93.0
	$\cos\varphi$	0.94	0.94	0.95	0.94	0.96	0.932
3kW, 2级 $\frac{X_g}{X_d} = 1.7782$	E_0/U_N	1.02456	0.9941	0.9389	0.8895		
	$\eta(\%)$	86.8	85.7	85.88	85.9		
	$\cos\varphi$	0.98	0.975	0.94	0.892		

$T_{m(s)}$ - S 曲线是通常鼠笼异步电动机的 T - S 曲线。从起动和牵入同步考虑,希望这条曲线在 $S = 1$ 时具有较大的转矩,即要求此时的定、转子漏抗要小,转子电阻要大;并希望这条转矩转差率曲线上的发生最大转矩的转差率尽可能趋近 $S = 0$,使其具有较大的标称牵入转矩 T_{pi} ,这就要求电机转速接近同步速时转子边电阻要比较小。为此转子导条截面积需足够大,而选用的槽形能形成较显著的集肤效应,故建议铸铝鼠笼用凸形、刀形或矩形槽,铜条鼠笼用矩形槽,圆形鼠笼槽难以兼顾起动和牵入的要求。

$T_{m(s)}$ - S 曲线是因转子上交、直轴不对称性引起,只有设法减小这种不对称性,如增大交轴磁回路的磁阻。

$T_{m(s)}$ - S 曲线,不仅在 $S = 0.95$ 附近处使合成平均转矩产生下凹,而且也将减小标称牵入转矩。减小 $T_{m(s)}$ - S 曲线的不利作用,以减小永磁体磁通对定子绕组的磁链值 $\Psi_{m(s)}$,即设计成 $E_0 < U_N$ 为妥,下表列出不同 E_0/U_N 比值的15kW,4极和3kW,2极永磁同步电动机效率和功率因数,表中数据说明 E_0/U_N 值在1.1到0.9范围变化,能得到较高的效率和功率因数。设计时,在永磁体用量能向气隙提供足够的磁场储能,以保证电机有足够大的过载能力前提下,适当减少定子绕组每相串联匝数,使比值 $E_0/U_N = 0.90 \sim 1.0$ 范围,对电机起动和牵入都会有利。

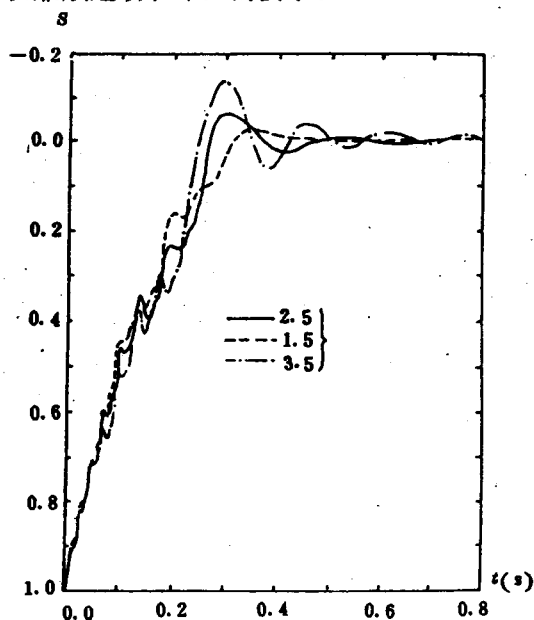


图4 永磁同步电动机的转差率
与等效励磁电流 I_{fm} 的关系

参 考 文 献

- 1 汤蕴缪,史乃,沈文豹编. 电机理论与运行,水利电力出版社,1984
- 2 马志云等. 稀土永磁同步电动机的起动特性研究. 华中理工大学学报,1990(6)
- 3 T A Little, M A Rahman. Effects of High Coercive Force on Starting Performance of Permanent Magnet Motors. Proceedings of The Seventh International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and Their Applications

STARTING OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Yao Youguang Chen Ming

Abstract In this paper, the torque of permanent magnet synchronous motors in the starting process is discussed, and the influences of the design parameters for permanent magnet synchronous motors on starting and pulling into synchronism performance are analyzed, and in electromagnetic design, how to meet the requirements for starting and pulling into synchronism is also clarified

Key Words permanent magnet synchronous motor, starting



姓名 姚有光 出生于 1936 年 11 月 1960 年
毕业于 合肥工业大学电机系(专业)
学位 本科 职称(务) 副教授 邮政编码 230009
通讯地址 合肥工业大学电气工程系
主要研究方向 电机 CAD 及电机磁场数值计算
主要成果及获奖情况 曾主持研制纺织用高效节能三相异步电动机和纺织用高效节能稀土永磁三相同步电动机;获一九九三年安徽省科学技术进步三等奖一项

(本文责任编辑 涂捷)