

# 永磁同步电机电枢反应电抗计算方法的研究

Computation of Armature Reactance of Permanent Magnet Synchronous Machines

朱春亭 薄保中 江秀斌 杨新海

西安石油学院电子工程及自动化系·西安·710061

**摘要** 电枢反应电抗是同步电机的一组重要参数,有饱和值与不饱和值之分.本文从其定义出发,导出了永磁同步电机电枢反应电抗的表达式,进而研究不饱和值的计算方法以及饱和值的磁钢工作图法和数值方法,给出了计算实例与实测结果.

**主题词**/[自由词] 电机,电磁感应,阻抗,计算方法/[永磁 同步电机 电枢反应电抗]

**中国图书资料分类号** TM351

**第一作者简介** 朱春亭,男,副教授,1965年生,政府特殊津贴获得者.1988年毕业于西北工业大学,获航空电气工程专业硕士学位.主要从事稀土永磁电机及其控制技术的研究.现任石油天然气总公司“八五”重点科技项目“抽油机用稀土永磁高效节能电机”项目负责人之一.

## 引言

电枢反应电抗是分析同步电机的一组重要参数,有饱和值与不饱和值之分.电励磁式同步电机电枢反应电抗的计算方法比较成熟<sup>[1,2,3]</sup>,永磁同步电机电枢反应电抗的计算多沿用电励磁式同步电机的计算方法<sup>[4,5]</sup>,往往造成计算结果误差较大.

同步电机中,电枢反应磁场在定子绕组感应电势,可以表示成电抗压降的形式<sup>[6]</sup>.

$$\begin{cases} E_{ad} = -jI_d x_{ad} \\ E_{aq} = -jI_q x_{aq} \end{cases} \quad (1)$$

因此,电枢反应电抗可定义为:

$$\begin{cases} x_{ad} = \frac{E_{ad}}{I_d} \\ x_{aq} = \frac{E_{aq}}{I_q} \end{cases} \quad (2)$$

设直轴与交轴电枢反应磁势产生磁通的基波幅值分别为 $\Phi_{ad1}$ 、 $\Phi_{aq1}$ ,于是

$$\begin{cases} E_{ad} = \sqrt{2} \pi f W K_{w1} \Phi_{ad1} \\ E_{aq} = \sqrt{2} \pi f W K_{w1} \Phi_{aq1} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得:

$$x_{ad} = \frac{\sqrt{2} \pi f W K_{w1}}{I_d} \Phi_{ad1} \quad (4)$$

$$x_{aq} = \frac{\sqrt{2} \pi f W K_{w1}}{I_q} \Phi_{aq1} \quad (5)$$

式(1)~(5)中各物理量的意义如下: $x_{ad}$ 、 $x_{aq}$ 为直轴和交轴电枢反应电抗, $I_d$ 、 $I_q$ 分别为直轴和交轴电流, $\Phi_{ad1}$ 、 $E_{ad}$ 为直轴电流产生的基波磁通幅值及其在定子绕组感应的电势, $\Phi_{aq1}$ 、 $E_{aq}$ 为交轴相应量, $f$ 为定子电流频率, $W$ 为定子绕组匝数, $K_{w1}$ 为定子绕组系数

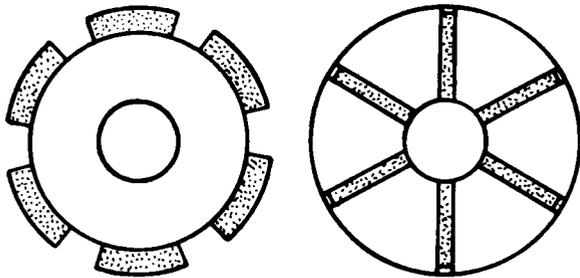
由式(4)和式(5)可以看出,电枢反应电抗的求取实际上可归结为交直轴电枢反应磁通的求取.

## 1 等值磁路法

永磁同步电机的结构型式多种多样,但归纳起来可以分为两类:即面极式和埋入式.面极式结构通常用于小型发电机,无刷电机中;埋入式则多用于自启动永磁同步电机及带阻尼条的同步发电机中.图1给出了两种典型的永磁同步电机转子结构图.

图1的两种结构可以使用统一的等值磁路,如图2所示.图中, $G_M$ 为磁钢磁导, $F_{M0}$ 为磁钢剩磁势, $G'_s$ 为主磁路等值磁导,若不计主磁路铁芯磁导,则 $G'_s$ 等于气隙磁导 $G_s$ ;  $G_r$ 为转子端部及阻尼条等的漏磁导; $G_f$ 为转子磁桥中漏磁导,对图1(a)的结构, $G_f$ 等于零, $F_{ad}$ 为直轴电枢反应磁势,去磁时 $F_{ad} > 0$ ,助磁时 $F_{ad}$

< 0.



(a) 面极式 (b) 埋入式  
图1 永磁同步电机转子结构图

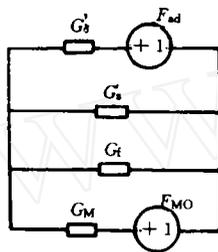


图2 等值磁路图

### 1.1 不饱和直轴电枢反应电抗的计算

求取  $x_{ad}$  的不饱和值时,即不考虑  $F_{M0}$  对直轴电枢反应的影响.图2中,令  $F_{M0}$  等于零,即得:

$$\Phi_{ad} = \frac{G_s F_{ad}}{G_o + G_M} (G_s + G_f + G_M) \quad (6)$$

式中,  $G_o = G_s + G_f + G_s$

设相数  $m$ ,极对数  $p$ ,极距  $\tau$ ,气隙长度  $l_{ef}$ ,气隙宽度  $\delta$ ,气隙系数  $K_s$ ,直轴磁场波形系数  $K_d$ ,于是直轴电枢反应磁势:

$$F_{ad} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi p} m W K_{w1} I_a \quad (7)$$

气隙磁导:

$$G_s = \frac{2}{\pi} \frac{\tau l_{ef}}{2\delta K_s} \mu_0 \quad (8)$$

直轴电枢反应基波磁通幅值:

$$\Phi_{ad1} = \Phi_{ad} \cdot k_d \quad (9)$$

将式(6)~式(9)代入式(4),得

$$x_{ad} = 4f \mu_0 \frac{m}{\pi p} (W K_{w1})^2 \frac{\tau l_{ef}}{\delta K_s} k_d \cdot \frac{G_M + G_f + G_s}{G_o + G_M} \quad (10)$$

式中,  $\mu_0$ ——真空磁导率,  $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-6} \text{H/m}$

对于面极式结构,  $G_f = 0$ ,所以

$$x_{ad} = 4f \mu_0 \frac{m}{\pi p} (W K_{w1})^2 \frac{\tau l_{ef}}{\delta K_s} k_d \cdot \frac{G_M + G_s}{G_M + G_s + G_s} \quad (11)$$

米春亭等:永磁同步电机电枢反应电抗计算方法的研究

式(11)中,  $G_M$  可由磁钢尺寸确定,  $G_s$  可根据电机转子结构尺寸确定.

对于埋入式结构,由于  $G_f$  与磁桥中场强成非线性关系,式(10)不能给出  $x_{ad}$  不饱和值的确切值,为此必须采用作图法<sup>[7]</sup>.

### 1.2 直轴电枢反应电抗饱和值的计算

即使磁路不饱和,铁芯仍有磁压降,且主磁场对电枢反应产生较大的影响.因此对永磁电机来说,饱和电枢反应电抗更具实际意义和实用价值.

饱和直轴电枢反应电抗的求取过程为:(1)令图1中  $F_{ad} = 0$ ,求出主磁场单独作用时产生的气隙磁通  $\Phi_{\delta 0}$ ; (2)求出负载时 ( $F_{ad} \neq 0$ ) 气隙磁通  $\Phi_{\delta d}$ ; (3)  $\Phi_{ad1} = (\Phi_{\delta 0} - \Phi_{\delta d}) \cdot k_d$ ,代入式(5)即可求出  $x_{ad}$  饱和值.

根据文献<sup>[7]</sup>,

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{G'_s G_M}{G_o + G_M} F_{M0} \quad (12)$$

$$\Phi_{\delta d} = \frac{G'_s G_M}{G_{od} + G_M} \cdot F_{M0} + F_{ad} G'_s \frac{G'_s}{G_{od} + G_M} - F_{ad} G'_s \quad (13)$$

式中,下标  $d$  表示该量负载时的值.若近似认为  $G'_s = G'_s$ ,于是

$$\Phi_{ad1} = F_{ad} G'_s \cdot \frac{G_s + G_{\delta d} + G_M k_d}{G_{od} + G_M} + G_M F_{M0} \frac{(G_{fd} - G_f) G'_s}{(G_o + G_M)(G_{od} + G_M)} k_d \quad (14)$$

事实上,从空载到额定负载  $G_f$  变化不大,且  $G_f \ll G'_s + G_M$ ,因而代入式(4),得:

$$x_{ad} = 4f \frac{m}{p} (W K_{w1})^2 G'_s k_d \frac{G_M + G_s + G_{fd}}{G_{od} + G_M} \quad (15)$$

式(15)与式(11)形式基本相同,其不同之处在于:(1)  $G'_s$  考虑了铁芯磁导,比  $G_s$  小;(2)  $G_f$  因磁桥中磁密增加而减小;因而由式(15)求出的  $x_{ad}$  的饱和值远远小于式(11)求出的  $x_{ad}$  的不饱和值.

### 1.3 交轴电枢反应电抗不饱和值的计算

面极式和埋入式结构交轴等值磁路分别如图3(a)、(b)所示.图中  $G_q$  为面极式极尖下气隙磁导.

仿照1.2节的推导,可得

面极式

$$x_{aq} = 4f \mu_0 \frac{m}{\pi p} (W K_{w1})^2 \frac{\tau l_{ef}}{\delta K_s} K_q \frac{\delta K'_s}{\delta' K'_s} \quad (16)$$

埋入式

$$x_{aq} = 4f \mu_0 \frac{m}{\pi p} (W K_{w1})^2 \frac{\tau l_{ef}}{\delta K_s} K_q \quad (17)$$

式中,  $K_q$  为交轴磁场波形系数,  $\delta'$  为面极式极尖下气

隙宽度,  $K'_s$  为极尖下气隙系数.

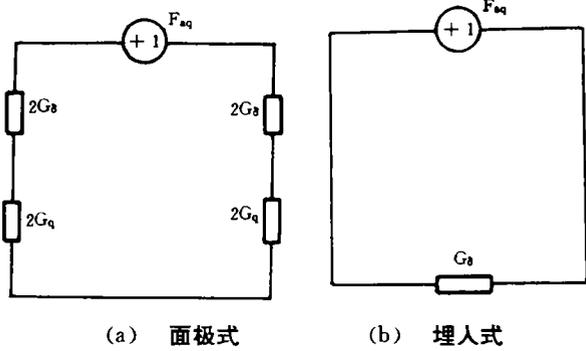


图3 交轴等值磁路

比较式(16)、(17)可见, 由于面极式极尖下气隙很大, 因此面极式永磁同步电机的交轴电枢反应电抗比埋入式电机小得多.

## 2 磁钢工作图法

等值磁路法只能计算  $x_{ad}$  和  $x_{aq}$  的不饱和值,  $x_{ad}$  (饱和值) 虽然可由等值磁路法求出定性表达式, 但因磁路的非线性, 式(15)并不能求出  $x_{ad}$  的值.

利用磁钢工作图可以较准确计算  $x_{ad}$  及  $x_{aq}$  的饱和值. 关于磁钢工作图的求解方法文献<sup>[7]</sup> 有较详细的叙述. 在利用磁钢工作图求出电机空载磁通  $\Phi_{s0}$  和负载磁通  $\Phi_{sd}$  后, 得

$$\Phi_{sd1} = (\Phi_{s0} - \Phi_{sd})k_d \quad (18)$$

代入式(4)即可求出  $x_{ad}$  的饱和值.

对于交轴, 由于电枢反应作用使磁场扭斜, 磁路饱和时, 增磁不等于去磁, 为此也可用图法, 在磁钢工作图上求出相应增磁和去磁时的磁通  $\Phi_1, \Phi_2$ , 如图4所示, 于是

$$\Phi_{aq1} = (\Phi_1 - \Phi_2)k_q/2 \quad (19)$$

代入式(5)即可求出  $x_{aq}$  的饱和值.

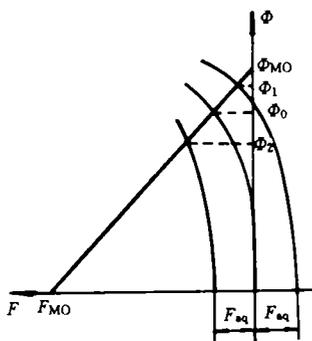


图4 交轴磁钢工作图

## 3 数值方法

利用数值计算方法可以求取  $x_{ad}, x_{aq}$  饱和值及不饱和值. 其步骤为, 首先用有限元法求出空载及负载磁场分布, 并用快速付立叶分析求出其对应的基波磁通幅值, 即可求出各种状态下的  $x_{ad}, x_{aq}$  值.

有限元法的数学模型是通过求解场域的矢量磁位的微分方程求能量泛函得到的<sup>[2]</sup>, 电磁场的基本方程及边界条件可表示为:

$$\begin{cases} \Delta^2 A = -\mu J \\ S_1: A = A_0 \\ S_2: \frac{\partial A}{\partial n} = q \end{cases} \quad (20)$$

关于有限元法的求解, 文献<sup>[2]</sup> 有详细的论述, 本文仅就求解  $x_{ad}$  及  $x_{aq}$  的饱和值与不饱和值时场源及边界条件的赋值进行研究.

### 3.1 $x_{ad}$ 的不饱和值

由于磁场的对称性, 求解时仅需选择一个极距, 如图5所示.

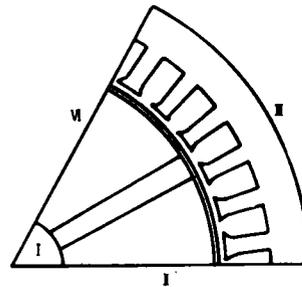


图5 有限元求解场域

求取  $x_{ad}$  不饱和值时, 所有边界满足第一类齐次边界条件, 即  $A = 0$ , 没有第二类边界, 定子槽区赋直流电流场源. 求出  $\Phi_{sd}$  经付立叶分析得出  $\Phi_{sd1}$ , 代入式(4)可求出  $x_{ad}$  的不饱和值.

### 3.2 $x_{ad}$ 的饱和值

仍用图5的求解场域, 第一类边界条件及场源分布同上, 此时磁钢两端满足第二类非齐次边界条件:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = H_c \quad (21)$$

式中,  $H_c$  为磁钢剩磁.

此时, 可求出负载磁场  $\Phi_{sd}$ . 若再令场源为零, 可进一步求出电机空载磁场  $\Phi_{s0}$ , 对上述两磁场分别进行付

立叶分析得出其基波磁通  $\Phi_{bd1}, \Phi_{bd1}$ , 于是

$$\Phi_{ad1} = \Phi_{bd1} - \Phi_{bd1} \quad (22)$$

利用式(4)即可求出  $x_{ad}$  的饱和值。

### 3.3 $x_{aq}$ 的不饱和值

此时过界 I、III 仍满足第一类齐次边界条件, 边界 II、IV 满足第二类齐次边界条件, 即  $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ , 定子槽区赋交轴电流。求出磁场分布后利用付立叶分析求出  $\Phi_{aq1}$  代入式(5)即可求出  $x_{aq}$  不饱和值。

### 3.4 $x_{aq}$ 的饱和值

必须求解负载时交轴电枢反应对磁场的影响。边界 I、III 仍满足第一类齐次边界条件, 边界 II、IV 满足周期性边界条件, 定子槽区赋交轴电流, 且磁钢两端

满足第二类非齐次边界条件。由于磁场被扭斜, 求出的磁场分布尚需减去空载磁场, 即将定子内园节点(或气隙单元)磁密减去空载时相应节点(单元)的磁密。再进行付立叶分析求  $\Phi_{aq1}$ , 该值代入式(5)求出的即是  $x_{aq}$  的饱和值。

## 4 算 例

对一台埋入式永磁同步电动机进行了计算和实验研究, 该电机有关参数如表 1 所示, 利用本文提供的 3 种方法求出的  $x_{ad}, x_{aq}$  值如表 2 所示。为验证本文方法的正确性, 同一表中列出了电机额定参数的实测结果

表 1 电机参数

$P_N/kW$	$p$	$m$	$f/Hz$	$W/匝$	$K_w1$	$\tau/m$	$l_{ef}/m$
0.6	3对	3	50	528	0.933	$8.116 \times 10^{-2}$	$6.08 \times 10^{-2}$
$\delta/m$	$K_s$	$H_c/Am^{-1}$	$G_M/H$	$G_s/H$	$G_s$	$k_d$	$k_q$
$0.04 \times 10^{-2}$	1.17	$680 \times 10^3$	$133.3 \times 10^{-8}$	$117.7 \times 10^8$	$421.8 \times 10^{-8}$	0.81	0.58

表 2 计算与实测结果

	等值磁路法	磁钢工作图法	数值方法	实测结果
$x_{ad}(\Omega)$	67.8	62.7	61.8	62.0
$x_{aq}(\Omega)$	118.7	116.6	115.4	115.0

## 5 结 论

通过上述分析和算例与实验结果的对比, 可得出如下结论:

由等值磁路法导出的电枢反应电抗的表达式概念明确, 但仅能用于计算电枢反应电抗的不饱和值, 对饱和电抗只能进行定性分析。

磁钢工作图法用于计算饱和电枢反应电抗简便易行, 但作图法本身精度稍差, 因而在初设计时宜结合磁路设计同时进行。

数值方法可以精确计算电枢反应电抗的饱和值和

不饱和值, 但这种方法必须借助计算机进行磁场计算和付立叶分析, 工作量大, 而且只能在已知电机所有结构尺寸及参数时方能进行, 因此仅限于校核设计。

## 参考文献

- 1 陈世坤. 电机设计. 机械工业出版社, 1984
- 2 胡之光. 电机电磁场的分析与计算. 机械工业出版社, 1986
- 3 Talaat M E. A new approach to the calculation of synchronous machine reactances. AIEE, T-PAS, 1955~1956(74,75)
- 4 陈峻峰. 永磁电机. 机械工业出版社, 1986
- 5 Gorman S F, Chen C and Cathey J J. Determination of permanent magnet synchronous motor parameters for use in brushless dc motor drive analysis. IEEE, Transactions on Energy Conversion, 1988, 3(3)
- 6 蒋宗荣等. 航空电机学. 国防工业出版社, 1987
- 7 米春亭, 陆鹤庆. 稀土永磁同步电动机磁路计算方法. 微电机, 1992, (4)

收稿日期: 1994-05-16

编 辑: 张新宝

conventional method is an average value and might have errors. This paper introduces briefly the program of measuring synchronously the torque of motor and beam pumping unit with Nk-7690 telemeter made by NEC Co. ,and measuring synchronously the rotary speed with a velodyne. The output shaft power of the motor and decelerator in a stroke was calculated eventually. The work done by the motor and decelerator in a stroke was then calculated by integral method and the average efficiency can thus be obtained. The paper also presents the measured results of two working conditions. By analysing the measured results ,it is believed that this program and method are practicable.

**Subject headings**/[Free words]: beam pumping unit, decelerator, efficiency /instantaneous value of torque, synchronous test

*Yang Yong-chang, et al*(Xi'an Petroleum Institute Xi'an 710061 • China) JXAPI v. 10 n. 4 1995 P31-33,37

## **A Practical Formula for Calculating the Work Done by the Drilling Cable**

**Abstract**: The paper analyses in detail the working process of the drilling cable in the technological processes of drilling, such as tripping, casing, drilling, coring and so on. A practical formula for calculating the work done by the cable in each process has been obtained. It provides a theoretical basis for quantitatively judging the life time of the drilling cable.

**Subject headings**: drilling cable, work, formula, abandonment

*Han Cheng-cai*(Xi'an Petroleum Institute Xi'an 710061 • China) JXAPI v. 10 n. 4 1995 P34-37

## **Computation of Armature Reactance of Permanent Magnet Synchronous Machines**

**Abstract**: Computation methods of armature reactance of permanent magnet synchronous machines are introduced. Armature reactance is a set of important parameters which include either saturated or unsaturated values. Based on the definition, the paper has deduced an expression of armature reactance. Then an equation for computing the unsaturated values, a graphical method and a numerical method for computing the saturated values are given. Computing examples and computed results are presented.

**Subject headings**/[Free words]: electric machines, electromagnetic, reactance, calculation method

*Mi Chun-ting, et al*(Xi'an Petroleum Institute Xi'an 710061 • China) JXAPI v. 10 n. 4 1995 P38-41

## **Analysis of Several Power Transformation Circuits of Imported Drilling Rigs**

**Abstract**: In the control system of three imported electric driving drilling rigs, the active power and reactive power exported by the generator are transformed respectively. In the RILL system, there is a diode bridge switching circuit. Its time of conducting is controlled by respective phase voltage. The conducting time of respective phase current is thus controlled and the switching circuit is made to export active power and reactive power respectively. In the  $\mu$ DRILL™ 3000 system, different combinations of multiplier and adder are used to transform voltage signals which are in proportion to the generator's active power and reactive power. In the IPS system, the output signals of two multipliers which reflect the generator's different line voltage and phase current are respectively transmitted to different input terminals of two low-pass filters. The filters exports active power and reactive power respectively.

**Subject headings**: electric rig, control system, power, arithmetic unit, wave filter