

中、高频感应子发电机原理与结构上的特点

叶剑秋

李亮军

(郑州大学机械与电气工程系 450052) (河南省卫辉市微特电机厂 453100)

摘 要 感应子发电机在原理与结构型式上与普通发电机有很大差异。如: 气隙磁通中含有并不感生电势的恒定分量; 转子上无绕组等。本文详细分析了各种结构形式的感应子发电机的优缺点, 列举了对频率、效率 (铁损、铜损)、尺寸、成本、加工工艺、轴承寿命等的影响因素。为设计者在选择结构形式时提供了正确的依据

关键词 感应子发电机 原理 结构

中图分类号 TM 301

前言

众所周知, 工农业生产中最常见的电源频率为 50Hz (工频), 随着科学技术的发展, 工业与国防工业的需要, 高于标准工频的中频 ($400\sim 10000\text{Hz}$) 及高频 ($10000\sim 50000\text{Hz}$) 电源, 正被越来越广泛地应用于各种领域。如: 感应加热、表面淬火、高频焊接、高速电力拖动、精密研磨、化学工程、大型发电机组的交流励磁机, 以及航海、航空、航天中的雷达、通讯、导航, 宇宙飞船、航天飞机的自动驾驶装置中等等。

交流电机的频率 $f = n_p/60$, 低于 400Hz 的中频电流可用提高转速和增加极对数的方法, 从普通交流同步发电机获取。但频率的进一步提高就要受到两个因素的限制: 磁极过多使励磁绕组难以安放, 转速提高不能超越转子结构强度的极限。诚然, 采用永久磁铁磁极可解决励磁绕组难以安置问题, 但频率的进一步提高, 会使转子极距非常之小, 造成永磁磁极极间漏磁很大, 电机无法正常工作。采用特殊结构形式的感应子发电机, 可以解决上述困难并可满意地得到中、高频电流。

顺便指出, 应用晶体管组成 LC 振荡电路振荡器 (高频或射频 $f = 3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^7 \text{Hz}$)、火花隙振荡器 ($f = 3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5 \text{Hz}$)、汞弧管变频器 ($f = 1000 \sim 2000$) 等, 也可得到中、高频电流, 但相比之下, 其效率是很低的, 均在 50% 以下, 而且容量很小。

1 感应子发电机的工作原理

所谓感应子发电机, 就是利用带齿转子的旋转, 在气隙内引起高频脉振的磁通来发电的交流发电机。

多齿转子的旋转, 在气隙内产生脉振磁导^[1], 转过一个齿, 磁导交变一个周期。当对定子

励磁绕组加上直流励磁电流后, 就会在气隙内引起脉振磁通。气隙内的脉振磁导和磁通由恒定分量和交变分量组成, 如图 1 所示。

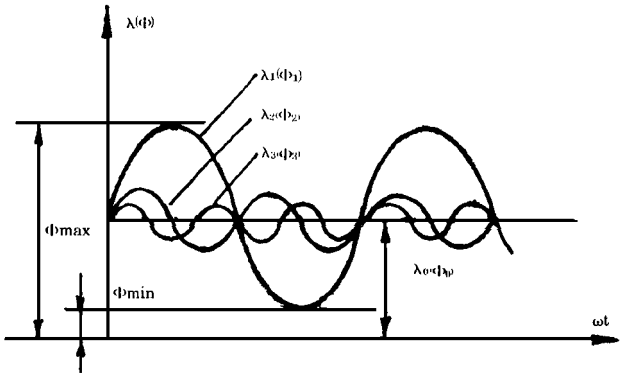


图 1 气隙磁导 (磁通) 波形

气隙内的脉振磁导——比磁导 $\lambda = \lambda + \sum_{v=1}^{\infty} \lambda_v \cos (v\omega t)$

$$= \lambda [1 + \epsilon \cos \omega t + \epsilon \cos 2\omega t + \epsilon \cos 3\omega t + \dots + \epsilon \cos (v\omega t)] \tag{1.1}$$

其中, λ ——气隙比磁导, 单位铁芯长度上一个定子齿距内的气隙磁导 (亨/厘米)。

λ ——比磁导的恒定分量。

λ_v ——比磁导的 v 次谐波分量。

ϵ —— v 次谐波比磁导对比磁导恒定分量的比例系数。

$$\epsilon = \lambda_v / \lambda \quad \text{或} = \phi_v / \phi_0$$

气隙内的脉振磁通 同样有

$$\phi = \phi_0 + \sum_{v=1}^{\infty} \phi_v \cos (v\omega t) \tag{1.2}$$

忽略高次谐波, 只考虑恒定分量和交变分量的基波。故恒定磁通

$$\phi_0 = \frac{1}{2} \phi_{\max} + \phi_{\min} \tag{1.3}$$

交变分量基波磁通

$$\phi_1 = \frac{1}{2} (\phi_{\max} - \phi_{\min}) \tag{1.4}$$

式中 ϕ_{\max} ——气磁磁通的最大值。 ϕ_{\min} ——气隙磁通的最小值。

利用交变分量的基波在定子工作绕组内感应电势, 电势的频率同转速及转子极对数 (齿数) 的关系为

$$f = (n/60) Z_r \tag{1.5}$$

式中 Z_r ——转子齿数 (极对数)

在某一恒定转速下 $n = \text{常数}$, 则频率 $f \propto Z_r$ 。

例 [1] 如转速 $n = 3000 \text{ r} \cdot \text{p} \cdot \text{m}$, 转子齿数 $Z_r = 60$, 则频率 $f = (\frac{3000}{60}) \times 60 = 3000 \text{ Hz}$ 。

随着转子齿数 Z_r 的增加, 即可得到不同的中、高频率的电势、电流。

应当指出, 由于感应子发电机气隙内含有恒定分量 (对感应电势来说是无效的), 则使它的利用率不高; 与饱和情况相同的同容量的同步发电机相比时, 它的尺寸要大的多。或者说在尺寸

容量相同时，由于气隙内恒定分量磁通的存在使它比一般同步发电机要饱和的多。另外，感应子发电机也有电抗大（有时需要电容补偿），电压变化大，电势波形随负载变化而变化等缺点。尽管如此，由于它有着结构简单（转子上无励磁绕组，无滑环），效率高，寿命长，单机容量大等一系列优点，故它们被广泛地应用在各个领域之中。

2 感应子发电机的结构特点及分类

感应子发电机由于结构型形繁多，很难将其系统分类。一般可分别以励磁方式及齿层结构两方面去分类。

2. 1 按励磁方式可分为两大类：

2. 1. 1 同极式（单极式）

励磁绕组为环状，放置平面与电机轴向重直，形成轴向磁路系统、某铁芯结构如图 2。为充分利用另一个气隙，又发展成双铁芯结构，如图 3 所示。

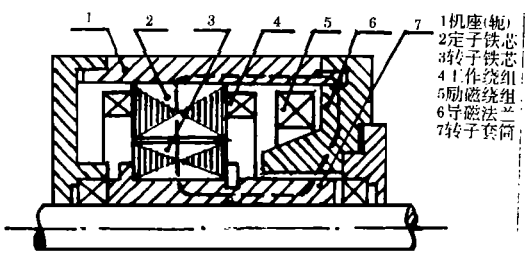


图 2 同极形

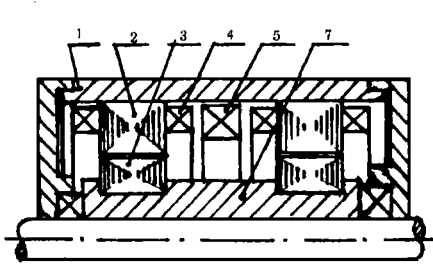


图 3 双铁芯同极式

(1) 优点：转子齿内磁通不交变，无铁损，可采用实心转子把加园周速度提高到 150 米/秒。励磁绕组尺寸、重量均较小，定子铁芯内表面利用率高，定子槽可全部用来放置工作绕组（感应电势的绕组），无大槽、小槽之分。

(2) 缺点：有一个很长的轴向磁路和导磁法兰。磁路长，消耗磁势多，且会产生轴电流，损坏轴承。磁通经过转子套筒和机座，使其截面积增加，重量增加，机械惯性增大。磁通经过实心机座，导致磁惯性加大，有磁滞现象。由于全部磁通与励磁绕组交链，故使励磁线圈有较大的电感，又因励磁线圈电组较小，则使时间常数加大，过渡过程加长，当卸去负荷时会引起过电压，也使电压调整变慢。另外，环形线圈的制造与维修均不方便。

2. 1. 2 异极式（多极式）

励磁绕组和工作绕组分别放在定子的的大、小槽内，形成径向磁路、磁通沿定子轭前进。如图 4 所示。

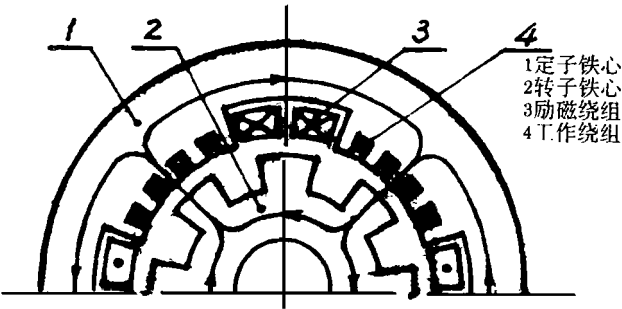


图 4 异极式

图 4 所示。(1) 优点：电机的机座、转轴不是主磁路，截面积可以减小，重量减轻。励磁极对数有选择的可能，如图 4 结构的励磁极数 $2p_r = 4$ 。励磁绕组的结构简单，制造与维修方便。无

轴向磁通，不会产生轴电流，轴承寿命长。

(2) 缺点：转子齿内磁通交变，产生铁损，并且铁损随励磁极对数 P_r 的增加而增加，转子不能用实心结构，致使圆周速度下降至 90m/s ，这就限制了频率的提高。另外，定子铁芯的内圆表面利用不好，需要挖去一部分安放励磁绕组，使工作绕组的数目减少。

由上述分析对比可知，异极式励磁结构的优点较多，故它比同极式的应用较广。

2. 2 按齿层结构可分为如下几种：

2. 2. 1 古典式

其特点是定子齿数 Z_s 和转子齿数 Z_r (高频极对数) 之间符合如下关系式：

$$Z_s = 2mqZ_r \tag{2. 1}$$

其中 Z_s —— 定子齿分数，
 Z_r —— 转子齿数，
 m —— 相数，
 q —— 每极每相槽数，
对于单相 $m = 1$, $Z_s = 2qZ_r$ (2. 2)

若 $q = 1$, 则 $Z_s = 2Z_r$, 故 $t_s = \frac{1}{2}t_r$,

其中 t_s —— 定子齿距, t_r —— 转子齿距, 对于三相 $m = 3$, $Z_s = 6qZ_r$ (2. 3)

若 $q = 1$, 则 $Z_s = 6Z_r$, 故 $t_s = \frac{1}{6}t_r$,

由 (2. 3) 式可知，一般情况下 ($q = 1$) 三相古典式感应子发电机的定子齿分数 Z_s 为转子齿数 Z_r 的六倍。又由式 (1. 5) 知，在某一转速下，当频率 f 增高时，转子齿数 Z_r 就很多 ($Z_r = 60\text{r/min}$)，而定子齿数 ($Z_s = 6Z_r$) 就更多。如例 [1] 中， $n = 3000$ 转/分， $f = 3000\text{Hz}$ ， $Z_r = 60 \times 3000 / 3000 = 60$ ，则 $Z_s = 6Z_r = 360$ 。为使定子齿磁密在允许值以内，势必要增大定子内径以得到足够大的齿宽。这将使电机尺寸非常大，是很不经济的。通常用在功率大于 50KW ，转速 3000r/min ，频率小于 2000Hz 的范围内^[2]。如果用分数槽就可减少定子齿数。如 $q = \frac{1}{2}$ ，则 $Z_s = 6qZ_r = 3Z_r$ ，在相同频率时 Z_r 不变，而定子齿数减少了一半。这可使结构尺寸变小，加工成本降低，同时可减少齿部铁损，效率提高。齿少使齿宽增大，槽内绕组可增多，功率可增大。

2. 2. 2 梳齿式

其特点是定、转子的齿距相等， $t_s = t_r$ 。

针对高频时，古典式齿层结构的缺点，对齿层结构进行改进，使工作绕组的跨距增大，而其内磁通脉振的频率仍然很高。即工作绕组在大齿上，而大齿上又开出很多小齿，这些小齿

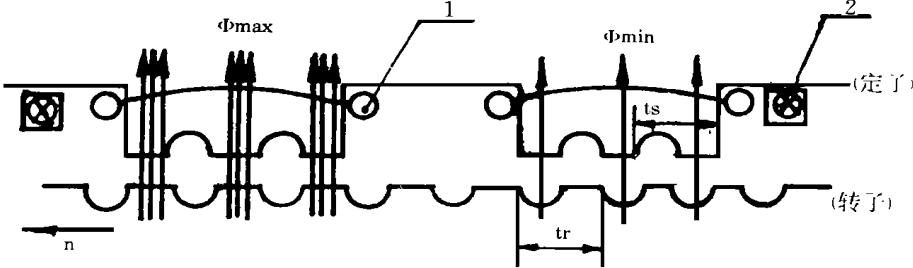


图 5 梳齿式 1—工作绕组 2—励磁绕组

看起来很像梳子，故尔由此得名。如图 5 为单相梳齿式的工作原理图 (展开图)。当转子不停地旋转时，定子大齿上的磁通不断地交变着 (因大齿上的小齿会引起磁通脉振)，由于定、转子齿距相等 $t_s = t_r$ ，则每转过一个小齿距，定子大齿上的磁通就交变一次，则在工作绕组内的感应电势就交变一次，而通过设计使相邻大齿上的磁通 (磁导) 互差 180° 相位，即当定子一个大齿上的小齿同转子齿相对时，相邻的另一个大齿上的小齿都同转子槽相对，则相邻两个大齿上的工作绕组内的感应电势就会互差 180° 相位，如果要想得到三相电势时，则只要使定子上相邻的各个

大齿上的磁导互差 120° 相位即可。

采用这种结构后，频率可以进一步提高，一般可使 $f=3000\sim 6000\text{Hz}$ 。由于工作绕组的跨距可以拉大，从而能够把它放在槽内，没有前述在小槽内放不下工作绕组的问题。而且极距 t_s (或小齿宽) 可以下降到加工工艺所能允许的宽度。又梳齿式的工作绕组数目减少了，可节省铜线和绝缘材料，相应地铜损也减少了。但其缺点是铁损大，因为不但在齿内是高的脉振磁通，而且在铁芯轭内也有高频脉振磁通。尤其是在频率很高时，铁损往往会大于铜损。另外，梳齿式结构对冲片工艺要求很高，模具复杂，成本高。

为了限制过高的铁损，可进行结构上的改进，使定子大齿上相邻三个小齿内的磁通互差 120° 相位，则在铁轭内的公共磁路中磁通为零 ($\Phi=0$)，即可把高频脉振的磁通限制在定子齿层以内，而使铁轭内的磁通，只含恒定分量，没有可引起铁损的交变分量。如图 6 所示。

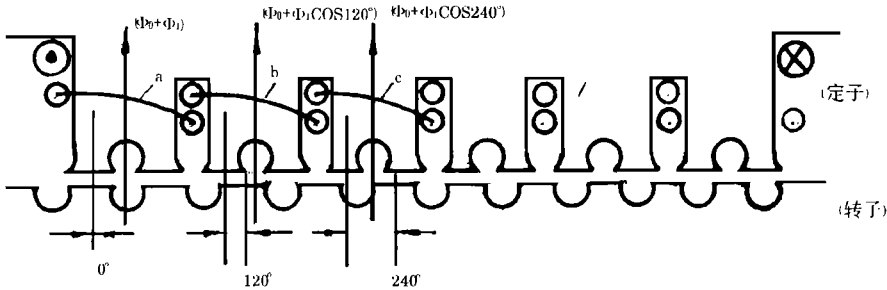


图 6 梳齿式

2. 2. 3 双齿距绕组式

其特点是工作绕组与励磁绕组相互交错，且工作绕组跨两个“半极” (指励磁极的两个大齿)，故叫双齿距绕组式。如图 7 所示。

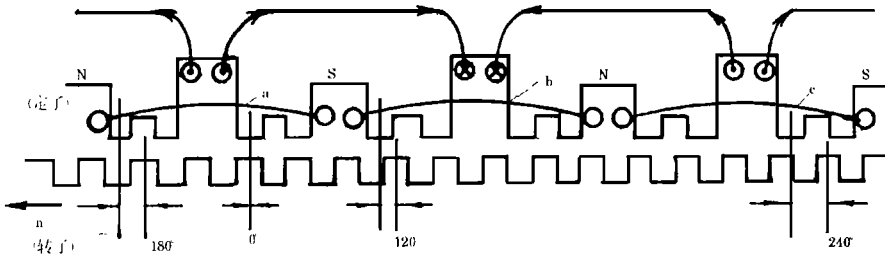


图 7 双齿距绕组式

由于一个绕组 (一相) 包含两个“半极” (一个极)，则三个绕组 (三相) 共包含三个磁极。但磁极数目只能是双数，故最少要有六个磁极 (三对极)，并且励磁极对数应为三的倍数 ($P_f=3n$, n 为正整数)，因此最少要有六个工作绕组和六个励磁绕组。

在一个绕组 (如 a 相) 所跨的两个大齿上，其磁导变化相差 180° 相位，而其上的磁通又反向，所以这一绕组中的感应电势是叠加的。另外，b 相绕组、c 相绕组所分别跨过的大齿上的磁导同 a 相相差 120° 及 240° 相位，故 a、b、c 三相绕组中的感应电势互差 120° 相位。

2. 2. 4 干扰式

其特点是定、转子齿数相接近，二者只差一点，即定、转子齿数的关系式为

$$Z_s = Z_r \pm s \tag{2.4}$$

由于它不再是 $Z_s=2mqZ_r$ ，故当 Z_r 增加时， Z_s 增加的不多，则频率的增高就不再受定子齿数 Z_s 的限制了。其频率比古典式的高，一般可达 10000Hz 。但它仍然是在定子的各槽中安放工作绕组，所以又限制了频率的进一步提高。其频率介于古典式与梳齿式之间。如图 8 所示。

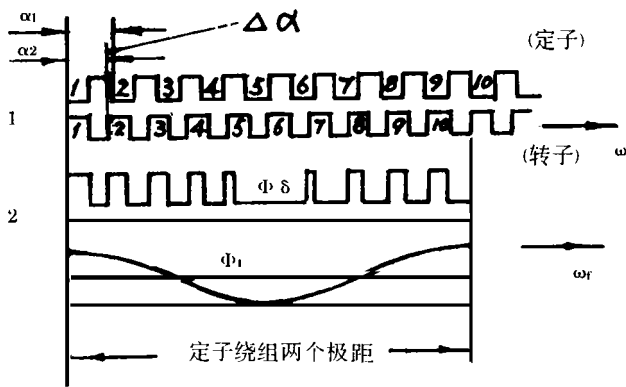


图 8 干扰式 1—齿层结构 2—气隙磁场分布

由图 8 可知，如果以定子绕组两个极距为一单元的话，则每一单元定、转子齿之间只差一个齿（距），设若沿着定子内园表面有 S 个这样的单元，则定、转子齿数总共相差 S 个齿 $Z_s = Z_r + s$ ）。在一个单元内气隙磁场的分布如图 8 所示。其基波为 Φ_1 ，此气隙磁场的旋转速度以角速度表示为 ω ，要比转子的转速（以角速度 ω 表示）大好多倍。当转子转过 $\Delta \alpha$ 时，磁通幅值将位移 α ，由此可知旋转磁场的角速度为

$$\omega = (\alpha / \Delta \alpha) \omega \tag{2.5}$$

则感应电势的频率

$$f = s (\omega / \omega_n) / 60 = s (\alpha / \Delta \alpha) n / 60 \tag{2.6}$$

干扰式感应子发电机具有很多优点，首先是它的定子齿数，比古典式的大大减少，克服了古典式结构因定子齿数多而影响频率提高的缺点。虽然它是开口槽，但因为定、转子齿数相差很少，所以在励磁绕组内的磁通几乎没有脉振。也即它的定子轭部磁通不交变，可使定子铁损减少。另外，可用分布绕组来改善波形。同时，由于定子轭部磁通不交变，可用拉紧螺杆固定铁芯轭部而不需绝缘，从而简化了结构。

3 结束语

感应子发电机的工作原理是基于气隙磁导（磁通）的变化而产生的脉振磁场从而感生电势的。其气隙磁通中含有并不感生电势的恒定分量。它是影响电机性能的一个重要因素，在结构设计时，应考虑将其尽量减小。在详细分析了各种结构形式的优缺点之后，可以得出结论：

- (1) 异极式结构优于同极式结构，设计时应优先考虑。其机座、转轴重量轻，励磁结构简单，制造维修方便，无轴电流，轴承寿命长。
- (2) 当频率在 $2000H_z$ 时，可选用古典式齿层结构。如采用分数槽绕组时，频率可提高到 $3000H_z$ ，并使体积减小，成本降低，齿部铁损降低，效率提高。
- (3) 当频率在 $4000 \sim 6000H_z$ 时，梳齿式结构较为合理。可减少铜损，提高效率。减少用铜量和绝缘材料，降低成本。
- (4) 当频率在 $10000H_z$ 以上时，可采用干扰式结构。定子齿数少，铁损少，又可用分布绕组改善波形。

参 考 文 献

1 叶剑秋 分数槽感应子发电机气隙磁导的分析。 郑州大学学报 1994. 3.

2 Н ЕфтинОВ Авиационные электрические генераторы 1980.

3 R Pohl Theory of pulsing field machines JIEE 1946, vol 93. Part II (3).

4 叶剑秋 分数槽感应子发电机磁路的分析与计算。中南、西南八省区电工学术讨论会论文集。 1984. 7.

Principle and Construction's Feature
of The Inductor Generator

Ye Jianqiu

(Department of Mechanical and Electric Engineering Zhengzhou University)

Li Liangjun

(Henan weihuei Small and special electric machine factory)

Abstract There are very difference in principle and construction, relating to inductor generator and general generator. For example, in air-gap flux, there is a constant component which is unable to gtnerate electromvtive ofrce; have not winding on rotor etc. This paper Analyse the features and faults of all menner of construction of inductor generator. it give some factors of influence, Such as frequency, efficiency (core loss, copper loss) 、Size、cost 、process and the bearing's longevity etc. a correct reference for the designer is given.

Keywords Inductor generator principle construction.

(上接 38 页)

表 1

| M ₂ KN·M | $\frac{M_1}{M_2}$ | β | ξ_2 N/mm ² | Ψ | P ₂ KN | 规范 | | 李 | | 本文 | | 试验 |
|------------------------|-------------------|---------|------------------------------|--------|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------|
| | | | | | | B _g N·mm ² | F ₂ mm ² | B _g N·mm ² | F ₂ mm ² | B _g N·mm ² | F ₂ mm ² | |
| 100 | 0.1971 | 0.2023 | 88 | 0.5136 | 103 | 6.550×10 ¹³ | 2.10 | 6.329×10 ¹³ | 2.17 | 1.087×10 ¹⁴ | 1.26 | 1.33 |
| 150 | 0.1314 | 0.1349 | 143 | 0.6850 | 154 | 6.550×10 ¹³ | 3.13 | 6.329×10 ¹³ | 3.24 | 8.561×10 ¹³ | 2.39 | 2.34 |
| 200 | 0.0986 | 0.1010 | 199 | 0.7788 | 205 | 6.550×10 ¹³ | 4.17 | 6.329×10 ¹³ | 4.32 | 7.561×10 ¹³ | 3.62 | 3.68 |
| 230 | 0.0857 | 0.0880 | 232 | 0.8172 | 234 | 6.550×10 ¹³ | 4.67 | 6.329×10 ¹³ | 4.93 | 7.196×10 ¹³ | 4.37 | 4.47 |
| 250* | 0.0788 | 0.0810 | 254 | 0.8285 | 256 | 6.550×10 ¹³ | 5.09 | 6.329×10 ¹³ | 5.27 | 6.660×10 ¹³ | 5.13 | 5.35 |