

永磁交流发电机外特性的分析研究

国 培 光

(西北农业大学农机系)

摘 要

永磁交流发电机作为照明电源,被广泛应用于链式和小型拖拉机。所谓外特性是指在额定工作转速下,发电机的端电压 U 与负载电流 I 间的关系,即 $U=f(I)$ 。由于永磁交流发电机是属于电流调正系统,因此,只有当由发电机供电的照明负荷一定时,才能获得最佳的功率输出和运行状态。本文用数学分析引出最佳功率输出时的负载值。

※ ※ ※ ※

一、输出电流方程式

1. 等效电路和相量图的确定:

爪形凸极式永磁发电机的极掌与定子铁芯内圆表面之间的气隙是均匀的,因此,磁通密度沿定子铁芯表面的分布呈梯形(如图1所示)。磁通在南极和北极下沿定子铁芯表面分布是对称的。利用富氏级数可以把气隙中的磁密分布分解为基波 $B_{\delta 1}$,三次谐波 $B_{\delta 3}$,五次谐波 $B_{\delta 5}$ 等正弦形分布曲线。其中

$$B_{\delta 1} = \frac{4 B_{\delta m}}{\alpha \pi} \sin \alpha \cdot \sin \omega t;$$

$$B_{\delta 3} = \frac{4 B_{\delta m}}{9 \alpha \pi} \sin 3 \alpha \cdot \sin 3 \omega t;$$

$$B_{\delta 5} = \frac{4 B_{\delta m}}{25 \alpha \pi} \sin 5 \alpha \cdot \sin 5 \omega t;$$

.....

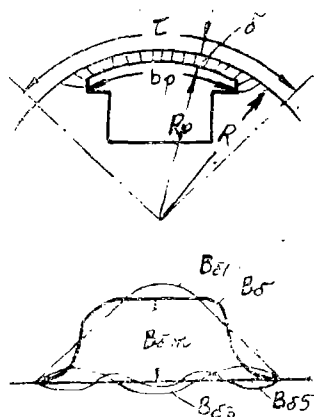


图1 永磁交流发电机空气隙磁密分布

式中 $B_{\delta m}$ 为磁通密度的最大值; α 为梯形腰在时间轴上的投影。由于各次谐波磁密的幅值远远小于基波磁密的幅值,所以,它们在定子绕组中的感应电势也十分小,故在工程计算中为了简化常忽略不计,即认为永磁交流发电机每一单路绕组切割基波磁密 $B_{\delta 1}$ 而发

本刊编辑室收到此稿时间:1985年1月22日。

出正弦形交变电势(如图2所示)。于是,可作出单路的等值电路(如图3所示)。

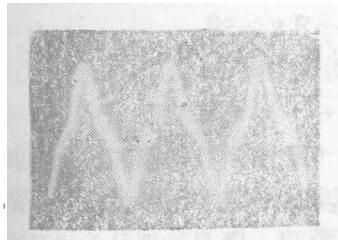


图2 单路电势波形

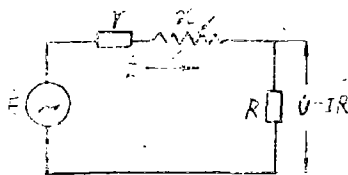


图3 永磁交流发电机单路等值电路

E —单路绕组的感应电动势(有效值,单位为伏);

U —单路负载端电压(发电机输出电压,有效值,单位为伏);

I —负载(输出)电流(有效值,单位为安);

X —单路绕组的感抗(单位为欧);

r —单路绕组的电阻(单位为欧);

R —负载(灯泡)电阻(单位为欧)。

由图3可写出各电量间的相量表达式及作出相应的相量图(如图4所示)。

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \dot{I} (R+r) + j\dot{I} \cdot X \\ &= \dot{I}R + \dot{I}r + j\dot{I}X \\ &= \dot{U} + \dot{I} (r+jX)\end{aligned}\quad (1)$$

2. 输出电流表达式:

根据图4电势相量图及(1)式,可写出各电量间有效值表达式:

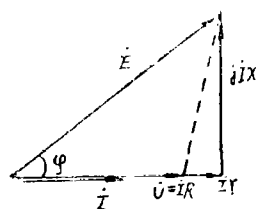


图4 单路电势相量图

$$\begin{aligned}E &= I \cdot \sqrt{(R+r)^2 + X^2} \\ \therefore I &= \frac{E}{\sqrt{(R+r)^2 + X^2}}\end{aligned}\quad (2)$$

式中: $E = 4.44f\phi WK_{00}$;

$f = \frac{p \cdot n}{60}$ —定子绕组中由基波磁密 B_{01} 所感应的电势的频率;

P —转子磁极对数;

n —转子转速;

ϕ —转子磁极每一极面的有效磁通;

W —单路绕组的线圈匝数;

K_{00} —定子绕组的绕组系数(在永磁发电机中等于1)。

因为上式中 W 、 P 、 K_{00} 、 4.44 均为常数(对于给定的发电机来说),令它们之积为 K ,于是可得出 $E = K\phi n$

$$\text{又 } X = 2\pi fL = 2\pi L \frac{Pn}{60}$$

式中: L —单路绕组的电感。若令

$$2\pi PL/60 = K_x$$

于是 $X = K_x \cdot n$, 代入 (2) 式可得:

$$I = \frac{K\phi n}{\sqrt{(R+r)^2 + (K_x \cdot n)^2}} \quad (3)$$

在低速范围内, $K_x \cdot n \ll (R+r)$, 若略去 $K_x \cdot n$, 可得

$$I_{n \rightarrow 0} \doteq \frac{K\phi n}{R+r} \quad (4)$$

即在低速范围内, 电流 I 随着转速 n 的升高而按比例的增加, 故 $I = f(n)$, 在此期间是一段穿过直角坐标系原点的斜线 (如图 5 a 段所示)。

在高速范围内, $K_x \cdot n \gg (R+r)$, 若略去 $R+r$, 则又得

$$I_{n \rightarrow \infty} \doteq \frac{K\phi n}{K_x n} = \frac{K}{K_x} \cdot \phi = K' \phi \quad (5)$$

即在转速 n 升高到一定值时, 电流 I 近似保持定值 (因为 $\phi = \text{常数}$), $I = f(n)$ 变成一段近似平行于横轴的直线 (如图 5 b 段所示)。

因为, 输出电压 $U = I \cdot R$, 所以, 在转速 n 升高到一定值时, 对于给定负载电阻 R , 输出

电压 U 也近似为常数。应该指出, 由于实际负载—灯泡电阻值的非线性变化, 在高速范围内输出电压略有增加, 这里为了使问题的分析简化, 设灯泡电阻为定值。

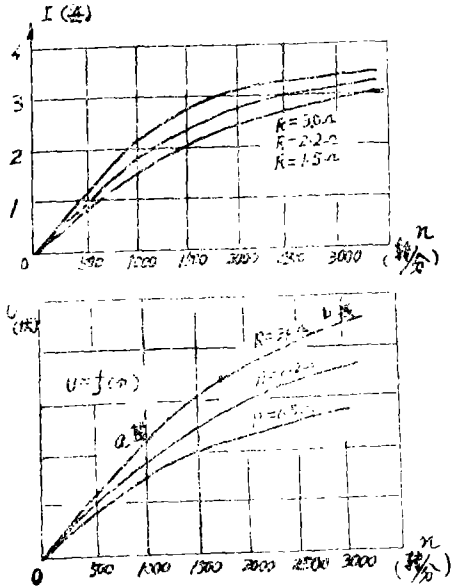


图5 $I = f(n)$ 曲线

二、最佳输出功率与负载电阻关系的确定

负载电阻 (灯泡) R 所获得的功率与发电机单路的输出功率 P 相等, 其值为:

$$P = I^2 \cdot R$$

将 (3) 式代入上式可得:

$$P = \frac{(K\phi n)^2}{(R+r)^2 + (K_x \cdot n)^2} \cdot R \quad (6)$$

所谓最佳输出功率即负载获得最大功率是在如下条件下实现的, 即

$$\frac{dP}{dR} = 0, \text{ 将 (6) 式代入得}$$

$$\frac{dP}{dR} = (K\phi n)^2 \frac{(R+r)^2 + (K_x \cdot n)^2 - 2R(R+r)}{[(R+r)^2 + (K_x \cdot n)^2]^2} = 0$$

$$\therefore (R+r)^2 + (K_x \cdot n)^2 - 2R(R+r) = 0$$

$$R^2 + 2Rr + r^2 + (K_x \cdot n)^2 - 2R^2 - 2Rr = 0$$

$$\therefore R^2 = r^2 + (K_x \cdot n)^2$$

$$\text{即 } R = \sqrt{r^2 + (K_x \cdot n)^2} \quad (7)$$

即负载电阻（每一路的灯泡电阻） $R = \sqrt{r^2 + (K_x \cdot n)^2}$ 时，发电机才有最大的功率输出，或者说灯泡负载上才有最大的吸收功率。若该功率与灯泡的额定功率相等，就称为发电机与灯泡负载阻抗匹配。自然，在使用中总是力图使永磁发电机的功率输出与灯泡负载电阻间满足于这种匹配的。

在满足于负载阻抗匹配的情况下，灯泡负载所获得的最大功率为：

$$\begin{aligned} P_{n,x} &= \frac{(K\phi n)^2}{[\sqrt{r^2 + (K_x \cdot n)^2} + r]^2 + (K_x \cdot n)^2} \cdot \sqrt{r^2 + (K_x \cdot n)^2} \\ &= \frac{(K\phi n)^2}{2} \cdot \frac{1}{\frac{r^2 + (K_x \cdot n)^2}{\sqrt{r^2 + (K_x \cdot n)^2}} + r} \end{aligned}$$

$$\text{令 } \frac{r^2 + (K_x \cdot n)^2}{\sqrt{r^2 + (K_x \cdot n)^2}} = Kn$$

$$\text{则 } P_{n,x} = \frac{(K\phi n)^2}{2} \cdot \frac{1}{Kn + r} = P_N \text{ (负载额定功率)} \quad (8)$$

因为发电机正常工作时都处于额定转速下，即 $n \rightarrow n_N$ ，又由于在额定转速时 $K_x \cdot n \gg r$ ，若忽略 r ，则（7）式便简化为

$$R_{n \rightarrow n_N} = K_x \cdot n \quad (9)$$

于是，在额定转速时，负载所获得的最大功率的近似值为：

$$P_{n,x} \underset{(n \rightarrow n_N)}{=} \frac{(K\phi n)^2}{2} \cdot \frac{1}{K_x \cdot n} = \frac{E^2}{2X} \quad (10)$$

即在额定转速下，负载电阻 R 近似等于单路定子绕组的感抗 $X (= K_x \cdot n)$ 时，灯泡上便可获得最大的功率。这又从另一个角度证明了永磁交流发电机的负载不可任意变更性。

应该指出，在阻抗匹配的情况下，发电机的效率是很低的，理想情况下仅为50%。

三、负载均衡性分析

永磁式交流发电机在使用中既要求各路负载电阻 R 一定，同时又要保持均衡。所谓均衡是指各路负载应同时工作或同时不工作，否则负载上的电压会发生明显变化。如 JF—90 型发电机每路应配置一只 12 伏、30 瓦（32 烛光）的灯泡，若夜间作业时，关闭后灯，两个前灯便会立刻变暗；而三只灯同时接通时，灯光却都会明亮。这是反映永磁

交流发电机输出特性的又一个重要问题。

当发电机各路均接入规定的负载时, 定子各路绕组中便流过频率相同、相位差为零、数值也相等(从理论上讲)的单相电流, 这些电流各自所产生的磁动势在空间上静止不动, 而在时间上随着绕组电流的变化(这里仅考虑按正弦规律变化的基波电流)作正、负交替变化。这时, 在电机内同时作用着旋转着的(转速为 n)转子磁场和定子电流的脉动磁场。定子脉动磁场的基波分量对转子磁场的作用, 称为电枢反应。这种反应存在于发电机的整个运行期间, 而且相当复杂, 给运行带来许多不同于其它电机的特殊现象。下面作简单的定性分析。

每一单路定子电流所产生的脉动磁动势, 按照对称分量法可以分解为两个相对于定子绕组以同样速度(n)沿相反方向旋转的磁动势, 即正转磁动势 B 和反转磁动势 C (如图6所示)。每一个旋转着的磁动势的振幅等于脉动磁动势振幅的 $\frac{1}{2}$ 。若只讨论磁动势的基波, 则每一个旋转磁动势的振幅为:

$$F_{(\text{正})} = F_{(\text{反})} = \frac{1}{2} F_{(\text{脉})} = 0.45 I_1 \cdot S_k \cdot K_{0.01} \quad (11)$$

式中: I_1 —定子绕组电流;

S_k —每一只线圈的总导体数;

$K_{0.01}$ —定子线圈的绕组系数。

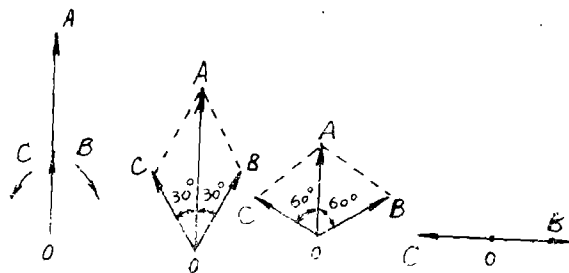


图6 脉动磁场分解

两个旋转磁场相对于定子绕组的转速为 $n = \frac{60f}{P}$ 。因此, 正转磁动势将以与转子同样的速率沿着与转子同样的转向旋转, 即正转磁动势相对于转子来说是相对静止的; 而反转磁动势则相对于转子以 $2n$ 的速率沿着与转子转向相反的方向旋转着。

当各路绕组均有基本相同的电流流过时, 在电机内部便同时存在着若干个正转磁场和同数量的反转磁场及一个转子磁极磁场。根据右手螺旋法则判断, 正转磁场与转子磁场合成的结果使穿过定子绕组的磁力线数增多, 因而, 在相同的转速下, 定子绕组的感应电动势 E 增加, 使输出电流 I 增加, 输出电压 U 升高, 所以, 灯泡显得明亮。

若某一路开路时(如不带负载), 正转磁动势减小, 穿过带负载绕组的合成磁力线数减小, 于是 E 减小, 因而灯泡显得昏暗。反转磁动势因以 $2n$ 的速率沿着与转子转动相反的方向旋转, 又由于整块转子的阻尼作用, 该磁动势被大大削弱, 故其影响甚小,

在此定性分析中不予考虑。

四、结 论

永磁交流发电机具有如下外特性:

1. 永磁交流发电机供电属于电流调节系统, 在额定转速下, 输出电流恒定, 对给定的负载电阻来说, 输出电压也近似恒定, 所以, 由于 $I = f'(n)$, 则 $U = f(I)$ 就可以用 $U = \phi(n)$ 来反映其输出特性。

2. 当 $R_n \rightarrow n_n = K_x \cdot n$ 时, 将获得最大的功率输出, 若该功率与负载的额定功率相等, 便达到理想的阻抗匹配。为实现此理想情况, 对于给定的发电机来说, 负载电阻不能随意变更。

3. 永磁交流发电机不宜在非均衡负载下工作。

参 考 文 献

- (1) Л.М. 朴德罗夫斯基著, 竺培勋等译: 《电机学》, 高等教育出版社, 1957年2月新1版, 第537—546页。
- (2) 吴大榕著: 《电机学》, 水利电力出版社, 1961年, 第407—421页。
- (3) Ю.М. 卡尔金著, 程宏译: 《汽车拖拉机的电气设备》, 1960年, 第628—629页。
- (4) 李纯善: “永磁交流发电机输出特性的研究”, 《汽车电器》, 1980年, 第3期, 第16—18页。

An Analysis and Study of External Features of Permanent-magnet Alternator

Guo Peiguang

(Farm Machinery Department, Northwestern
Agricultural university)

Abstract

The permanent-magnet alternator served as the lighting sources is widely used in the tracklaying and small-sized tractors. The so-called external features refer to the relationship between the terminal voltage (U) and the load current (I) of the alternator under the operating rated speed, i.e. $U = F(i)$. Since the permanent-magnet alternator belongs to the current adjusting system, only when the lighting load provided by the alternator comes to a certain amount, can the best power output and operating conditions be obtained. This paper analyses the negative load value when the best power output is applied mathematically.

Key words permanent-magnet alternator/external feature/output power