

# ⑦ 单相电容式异步电机运行方式的分析

93-98

An Analysis to the Operating Mode of the Single Phase  
Capacitor-run Induction Machine

杨炳中  
Yang Bingzhong

王翠芳  
Wang Cuifang

(重庆大学电气工程系)

TM343.1

**摘要** 根据双旋转磁场理论,分析了单相电容式电机运行方式的特点,并提出了判别电机的电磁制动、电动机和发电机三种运行方式的判据。最后,结合单相异步发电机运行方式下的对称条件,确定了单相异步发电机的最佳运行区间和参数间的最佳配合问题。

**关键词** 异步发电机 / 单相异步发电机; 单相电容式异步发电机

中国图书资料分类法分类号 TM343.1

**ABSTRACT** The operating mode of the single-phase capacitor-run induction machine is analyzed with the theory of double rotating field. Since there are two stable generators and two stable motor operating speed regions, with the balanced operation condition the better speed region can be decided for the generator, i. e. reverse direction of the rotor.

**KEYWORDS** asynchronous generators / single phase asynchronous generators; single phase capacitor-run asynchronous generators

## 0 前 言

近年来人们对新能源的利用产生了广泛的兴趣,特别是开发小型水力资源、风力资源和沼气等所谓可再生能源,为解决边远地区用电需求时,若发电机容量较小,仅供一家或几家用电需要,采用单相异步发电机就无需考虑三相负载的平衡问题,简化机组的电压调节装置,缩小电机的体积,从而降低机组的成本<sup>[1,2]</sup>。于是,单相电容式电机作为发电机方式运转也就应运而生。

当人们在研究单相异步发电机时,常基于对三相异步电机的已有知识和使用经验的基础上,来推断单相异步发电机的使用方法。这就是说,将电动机的转子加速,使其超过同步转速,就达到发电机运行状态。可惜,这种方法对单相电容式异步发电机来说是不正确的。所获得的发电机运行性能很差。可能也由于这一点,使这种运行方式很久未被采用。

1984年 E. C. Boardman 等<sup>[3]</sup>的论文,讨论如何在将单相电容式电动机改作发电机运行时提高效率的问题。虽然,论文并没有完全解决单相电容式异步发电机的运行理论和设计方法

中遇到的问题,但确使人们突破了传统的偏见,激发了对单相电容式电机运行方式特点进行研究的热情和探讨其设计方法的兴趣。

本文应用双旋转磁场理论来分析单相电容式电机运行方式的特点,并提出判别电机的电磁制动、电动机和发电机三种运行方式的判据。最后,结合单相异步发电机运行方式下的对称条件来确定其最佳运行区间和参数间的最佳配合等问题。

### 1 运行方式的分析

众所周知,三相异步电机具有发电机、电动机和电磁制动三种运行方式。它们的转速范围也是固定不变的,即

$$\begin{aligned} -\infty < s < 0 & \quad \text{发电机运行} \\ 0 < s < 1 & \quad \text{电动机运行} \\ 1 < s < \infty & \quad \text{电磁制动运行} \end{aligned}$$

这一点可通过分析电机转子的旋转方向、旋转速度及其与电机气隙磁势的旋转方向、旋转速度之间的相互关系来解释。当电机转子的旋转速度高于气隙中旋转磁势的转速,而两者之旋转方向相同,则为发电机运行;当电机转子旋转速度低于气隙中旋转磁势的转速时,而转向相同,则为电动机运行;当电机转子的旋转方向与气隙中旋转磁势的转向相反时,则为电磁制动运行。

对于单相电容式电机而言,情况就要复杂一些。在单相电容式电机的气隙中,不但存在正转旋转磁势,还存在反转旋转磁势。两个磁势的大小随电机的参数、转速和所接电容器容量的变化而变化。因此,在决定电机的运行方式时,首先要确定在某一转差下,哪一种转向的旋转磁势占主要地位;随后,观察此时电机转子的旋转方向,转速与这一种旋转磁势的转向、转速之间的关系,最后才能决定单相电容式电机在何种运行方式下运转。

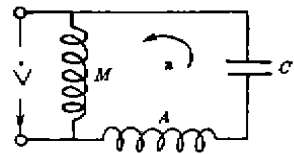


图 1 电动机接线图

为了确立正、反转旋转磁势的大小,仍可根据单相电容式电动机的数学模型,并假定电机作电动机运行时的旋转方向为规定正方向,其接线如图1所示。

电机的电压平衡方程式为:

$$\begin{cases} V = I_m Z_1 + E_{f_m} + E_{m_m} \\ V = I_A (Z_{1A} + Z_C) + E_{f_A} + E_{m_A} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} E_{f_m} = (I_m - jA I_A) Z_f = I_f Z_f \\ E_{m_m} = (I_m + jA I_A) Z_m = I_m Z_m \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} E_{f_A} = jA E_{f_m} \\ E_{m_A} = -jA E_{m_m} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $E_{f_m}$  为由气隙中合成的正转旋转磁场在主相绕组中感应的电势,  $E_{m_m}$  为由气隙中合成的反转旋转磁势在主相绕组中感应的电势。因此,根据  $E_{f_m}$  和  $E_{m_m}$  的大小,就可确定气隙中哪一种转向的旋转磁势起主要作用。为了便于分析,设电机的正转和反转电势系数  $K_f$  和  $K_m$  [4]。

$$\begin{cases} K_f = |E_{fm}|/|V| = |I_f Z_f|/|V| \\ K_s = |E_{sm}|/|V| = |I_s Z_s|/|V| \end{cases} \quad (4)$$

若给定了一台电容式电机，则其参数都为已知，根据附录 A 所推导的公式，就可求  $K_f$  和  $K_s$  随转速而变化的曲线。

以四川省南充市电机厂试制的单相异步发电机 YFD90L-4-1.1 千瓦电机为例，计算其  $K_f$ 、 $K_s$  与电机转速的关系，如图 2 所示。

现在，重新来分析一下判别单相电容式电机运行方式的条件。

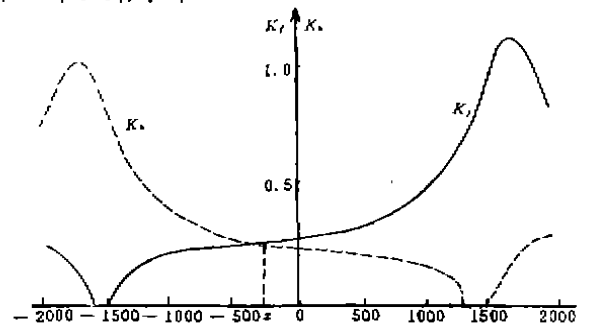


图 2  $K_f, K_s = f(n)$  曲线

1) 气隙中只存在正转旋转磁势

即  
则

$$K_s = 0$$

- $-\infty < s < 0$           发电机运行
- $0 < s < 1$             电动机运行
- $1 < s < \infty$           电磁制动运行

2) 气隙中只存在反转旋转磁势

即  
则

$$K_f = 0$$

- $2 < s < \infty$           发电机运行
- $1 < s < 2$             电动机运行
- $-\infty < s < 1$         电磁制动运行

3) 既有正转，又有反转旋转磁势

以上述电机为例。

(a)  $s < 0$ ，正转旋转磁势占主要成分，电机转子按正转方向旋转，且转速高于同步转速，所以电机处于发电机运行方式；

$s > 2$ ，反转旋转磁势占主要成分，电机转子按反转方向旋转，且转速高于同步转速，电机亦是处于发电机运行方式。

(b)  $0 < s < 1$ ，正转旋转磁势占主要成分，电机转子按正转方向旋转，但转速低于同步转速，所以电机处于电动机运行方式。

$1 < s < 2$ ，反转旋转磁势占主要成分，电机转子按反转方向旋转，但转速低于同步转速，电机亦处于电动机运行方式。

(c)  $1 < s < X$ ，正转旋转磁势占主要成分，电机转子按反转方向旋转，故为电磁制动运行方式。

在本例中，当气隙中正、反转旋转磁势相等时，其转速  $n \approx -250$  r/min,  $X \approx 1.17$ 。

根据上述分析结果，可以确定该试验样机的运行区间

- $s < 0$  或  $s > 2$           发电机运行
- $0 < s < 1$  或  $1 < s < 2$       电动机运行
- $1 < s < X$                 电磁制动运行

显然,对于该单相电容式电机,存在着二个稳定的发电机运行区间和二个稳定的电动机运行区间,电磁制动运行区间变窄,这就是单相电容式电机运行的一个最大特点。

## 2 发电机设计方法

既然单相电容式电机存在二个稳定的发电机运行区间,那么,究竟在哪个区间运行为最佳?为了解答这一问题,首先得研究单相电容式电机在发电机运转方式下的对称运行条件。为研究方便,假定电机的主、辅相绕组是完全对称布置的 $90^\circ$ 相带绕组。忽略电容器电阻

$$Z_{1\lambda} = A^2 Z_1 \quad r_c = 0$$

当电机按正转方向旋转时,根据对称运行要求,电机的反转旋转磁势完全消失,即

$$I_r = I_m + jA I_\lambda = 0$$

则可推得

$$\begin{cases} A = (X_1 + 2X_r) / (r_1 + 2R_r) \\ X_c = (1 + A^2)(X_1 + 2X_r) \end{cases} \quad (5)$$

此时,由于转差  $s < 0$ , 为负值,则

$$R_r < 0 \quad \text{而} \quad X_r > 0$$

在一般情况下,  $r_1 + 2R_r < 0$

$$\text{得} \quad A < 0 \quad X_c > 0$$

这个结果表明:按照电动机运行时接线方法,在转子按正转方向旋转时,电机在发电机运行状态下不可能获得对称运行条件。

相反,当电机转子按反转方向旋转时,为达到对称运行,要求电机的正转旋转磁势完全消失,即

$$I_r = I_m - jA I_\lambda = 0$$

同样,可推得

$$\begin{cases} A = -(X_1 + 2X_r) / (r_1 + 2R_r) \\ X_c = (1 + A^2)(X_1 + 2X_r) \end{cases} \quad (6)$$

由于此时

$$2 - s < 0 \\ R_r < 0 \quad \text{而} \quad X_r > 0$$

通常

$$r_1 + 2R_r < 0$$

得

$$A > 0 \quad X_c > 0$$

可见,单相电容式电机作为发电机方式运行时,只有在反转情况下,才能满足对称运行条件。而当单相电容式电机作为电动机方式运行时,只有在正转情况下,才能满足对称运行条件。两种运行方式所需的转向恰恰相反。

根据对称运行条件,解答了 R. Ramakumar 所提的问题<sup>[3]</sup>,即在设计单相电容式异步发电机时,主辅绕组有效匝数比  $A$  和电容量  $C$  的选择问题。

根据以上的分析及由此而得到的结果,设计和试制的二种规格的单相电容式异步发电机, YFD90S-4-0.75千瓦和 YFD90L-4-1.1千瓦。与容量相近的单相同步型发电机相比,若维持其主要性能指标——效率,功率因数相同,则单相异步发电机的中心高可以比同步型发电机低1~2级。再加上异步机的结构和加工工艺较简单,因而经济效益比较显著。

### 3 结 论

1) 根据双旋转磁场理论,通过计算单相电容式电机的正转和反转电势系数  $K_f, K_r$  的大小,可以决定单相电容式电机的运行方式。

2) 单相电容式电机的运行方式比较复杂,它不仅与电机本身的参数大小有关,还与所配电容大小有关。

3) 对正常设计的单相电容式电机,一般具有二个稳定的发电机运行区间和二个稳定的电动机运行区间。

4) 根据对称运行条件的分析,可以决定最佳运行的转速区间、有效匝数比  $A$  和电容量  $C$ 。

### 参 考 文 献

- 1 Bernays Jr D J. A low-cost, Single Phase Induction Generator. In: IEEE Power Electronics Specialists Conference Proceedings. MIT, 1982: 185~196
- 2 Watson D B, Watson R M. Microprocessor Control of a Self-Excited Induction Generator. Int J Elect Eng Educ, 1985, 22(1), 69~82
- 3 Boardman E C, Venkata S S, Butler N C. The Effect of Rotational Direction in Single-Phase Induction Generators. IEEE, 1984, PAS-103(8): 2222~2229
- 4 Yang binzhong. IF and IB Calculations of T- and L- Connected Capacitor Motose with Arbitrarily Displaced Windings. In: IECM' 84 Proceedings. Lausanne and zürich, 1984. 1206~1208

### 附 录 A

单相电容电动机的电压平衡方程式为:

$$\begin{cases} \dot{V} = I_m Z_1 + \dot{E}_{fm} + \dot{E}_{\Sigma} \\ \dot{V} = I_A (Z_{1A} + Z_c) + \dot{E}_{fA} + \dot{E}_{\Sigma A} \end{cases} \quad (A1)$$

其中

$$\begin{cases} \dot{E}_{fm} = (I_m - jA I_A) Z_f = I_f Z_f \\ \dot{E}_{\Sigma} = (I_m + jA I_A) Z_b = I_b Z_b \end{cases} \quad (A2)$$

$$\begin{cases} \dot{E}_{fA} = jA \dot{E}_{fm} \\ \dot{E}_{\Sigma A} = -jA \dot{E}_{\Sigma} \end{cases} \quad (A3)$$

将(A2)、(A3)代入(A1),得

$$\begin{cases} \dot{V} = I_m Z_{11} + I_A Z_{12} \\ \dot{V} = I_m Z_{21} + I_A Z_{22} \end{cases} \quad (A4)$$

其中

$$\begin{cases} Z_{11} = Z_1 + Z_f + Z_b \\ Z_{12} = -jA(Z_f - Z_b) \\ Z_{21} = jA(Z_f - Z_b) \\ Z_{22} = Z_{1A} + Z_c + A^2(Z_f + Z_b) \end{cases} \quad (A5)$$

$Z_1$  主绕组定子漏阻抗

$Z_{1A}$  副绕组定子漏阻抗

A 副相对主相的有效匝数比

$Z_0 = r_0 - jX_0$  电容器阻抗

$Z_1 = R_1 + jX_1$  正序视在阻抗

$Z_2 = R_2 + jX_2$  负序视在阻抗

$$\left\{ \begin{array}{l} R_f = \frac{0.5r_2' X_m^2}{(r_2'/s)^2 + (X_2' + X_m)^2} \\ X_f = \frac{0.5[(r_2'/s)^2 X_m + X_2' X_m^2 + X_2'^2 X_m]}{(r_2'/s)^2 + (X_2' + X_m)^2} \\ R_b = \frac{0.5r_2' X_m^2}{\left(\frac{r_2'}{2-s}\right)^2 + (X_2' + X_m)^2} \\ X_b = \frac{0.5\left[\left(\frac{r_2'}{2-s}\right)^2 X_m + X_2' X_m^2 + X_2'^2 X_m\right]}{\left(\frac{r_2'}{2+s}\right)^2 + (X_2' + X_m)^2} \end{array} \right. \quad (A6)$$

$X_m$  激磁电抗

$s$  转差率

$r_2'$  折算到主绕组的转子电阻

$X_2'$  折算到主绕组的转子漏抗

由方程(4)可求得主绕组电流  $I_m$  和副绕组电流  $I_A$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_m = \frac{V(Z_{22} - Z_{12})}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}} \\ I_A = \frac{V(Z_{11} - Z_{21})}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}} \end{array} \right. \quad (A7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_f = I_m - jAI_A \\ I_b = I_m + jAI_A \end{array} \right. \quad (A8)$$