

# 新型三绕组并联式 高效单相感应电动机稳态性能

裴英, 王秀和, 仲慧, 杨玉波

(山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061)

## Steady-state Performances of a Novel Energy-efficient Single-phase Induction Motor With Three Parallel-connected Windings

PEI Ying, WANG Xiuhe, ZHONG Hui, YANG Yubo

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

**ABSTRACT:** In this study, a novel energy-efficient single-phase induction motor with three-phase stator windings which were connected to two external capacitors in parallelly, supplied by the single-phase AC power, had been presented. By selecting the appropriate capacitors, the three-phase currents of the proposed motor would be approximate symmetric under steady-state operation. First of all, based on the method of synthetic current, the condition for balanced operation was analyzed and the method for determining the requested capacitances was also obtained. Then, the approach for calculating the steady-state performance was brought out. Finally, a prototype was designed, based on which, detailed experimental researches were carried out. It is concluded that, compared with three-phase induction motors of the same capacity, the novel single-phase induction motor has nearly the same efficiency when operating at rated load but with a higher power factor.

**KEY WORDS:** three parallel-connected windings; single-phase induction motor; method of synthetic current; steady-state performance calculation; single-phase supply

**摘要:** 提出一种新型的三绕组高效单相感应电动机, 其定子上有3个绕组, 与2个外接电容连接, 采用单相交流电源供电, 3个绕组所在的支路之间为并联关系。通过电容的适当选择, 可使该电机在额定运行时3个绕组的电流接近对称。基于合成电流法, 对该接法电机的对称运行条件进行分析, 得出了电容的确定方法; 提出了该电机稳态性能计算的具体方法; 设计了一台样机, 并进行了试验研究。结果表明, 该新型电动机在额定负载下运行时, 具有与同容量三相感应电

动机相近的效率和更高的功率因数。

**关键词:** 三绕组并联式; 单相感应电动机; 合成电流法; 稳态性能计算; 单相供电

## 0 引言

单相感应电动机采用单相交流电源供电, 具有结构简单、运行可靠、维修方便等优点, 广泛应用于工业、农业、交通以及家用电器等方面, 但体积大、效率低。随着能源供应的日益紧张, 国家对单相感应电机所配套的空调、洗衣机、冰箱等家用电器的能效水平提出了更高的要求, 因而对单相感应电动机的效率水平提出了更高要求。

由于单相感应电机体积大、成本高, 难以采用三相感应电动机中为提高效率而采取的增加材料用量和采用高性能材料的措施。考虑到三相感应电动机的诸多优点, 国内外对三相感应电动机的单相运行进行了深入研究, 提出了多种方案。归纳起来, 主要有以下3种: 一是在不改变三相感应电动机绕组的基础上接入一个电容, 然后采用单相供电, 这种方式的缺点是带负载能力差, 通常只有三相感应电动机的80%左右<sup>[1-9]</sup>; 二是O.J.M.Smith提出的Smith接法<sup>[10-13]</sup>和SEMIHEX接法<sup>[14-18]</sup>, 打破了三相绕组的连接方式, 串入2个电容, 实现单相供电, 有明显的节能效果, 但该电机起动性能差, 需要复杂的起动电路; 三是该文提出的一种新型的三绕组串联式单相感应电动机, 采用3个绕组和2个电容连接, 3个绕组所在的支路之间为串联关系, 采用

基金项目: 山东省科技发展计划项目(2010GSF10604)。

Project Supported by the Science and Technology Development Programs in Shandong Province(2010GSF10604).

单相供电，额定负载时 3 个绕组接近对称运行，具有接近于同容量三相感应电动机的效率和更高的功率因数，并提出了简单的起动电路<sup>[19-20]</sup>。

本文在三绕组串联式单相感应电动机研究的基础上，又提出了一种新型的三绕组并联式单相感应电动机。利用合成电流法对这种新型电机进行了分析，得出了对称运行时的匹配电容，建立了其稳态性能计算方法，并进行了试验研究。结果表明，该新型电机具有高效、高功率因数的特点，具有很好的应用价值和应用前景。

### 1 结构与工作原理

本文提出的新型三绕组并联式单相感应电动机定子上有 3 个绕组，转子采用简单、可靠的鼠笼型结构。3 个绕组与 2 个电容连接，采用单相交流电源供电，如图 1 所示。A 相绕组构成支路 1；B 相绕组和电容  $C_1$  串联构成支路 2；C 相绕组和电容  $C_2$  串联构成支路 3；将支路 1 和支路 3 并联，再和支路 2 反向并联构成复合并联支路，再接到单相电压源。可以看出 3 个绕组所在的支路之间为并联关系。

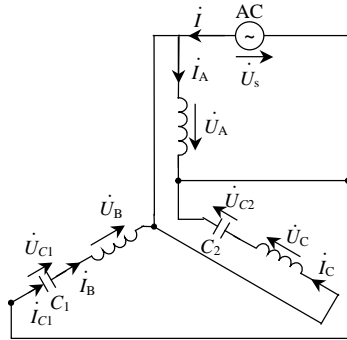


图 1 定子绕组连接图

Fig. 1 Connection of the stator windings

从图 1 可以看出，若以 A 相绕组中电流  $i_A$  为基准，B 相绕组中电流  $i_B$  的相位滞后，C 相绕组中电流  $i_C$  的相位超前，因此，可以通过选择合适的移相电容，使得三相绕组中的电流对称。

### 2 对称运行条件分析

根据图 1 所示的电压、电流参考方向以及基尔霍夫电压、电流定律，三绕组并联式单相感应电动机的电压约束关系为

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{U}_s \\ \dot{U}_B + \dot{U}_{C1} = -\dot{U}_s \\ \dot{U}_C + \dot{U}_{C2} = \dot{U}_s \end{cases} \quad (1)$$

电流约束关系为

$$\begin{cases} \dot{i}_{C1} = \dot{i}_B \\ \dot{i}_{C2} = \dot{i}_C \end{cases} \quad (2)$$

2 个移相电容电压、电流之间的约束关系为

$$\begin{cases} \dot{U}_{C1} = \dot{i}_{C1} Z_{C1} \\ \dot{U}_{C2} = \dot{i}_{C2} Z_{C2} \\ Z_{C1} = R_{C1} - jX_{C1} \\ Z_{C2} = R_{C2} - jX_{C1} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\dot{U}_s$  为电源电压； $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  分别为定子 A、B、C 三相绕组两端的电压； $\dot{U}_{C1}$ 、 $\dot{U}_{C2}$  分别为电容  $C_1$  和  $C_2$  两端的电压； $\dot{i}_{C1}$ 、 $\dot{i}_{C2}$  分别为流过电容  $C_1$  和  $C_2$  的电流； $Z_{C1}$ 、 $Z_{C2}$  分别为电容  $C_1$  和  $C_2$  的阻抗。

合成电流法是分析多绕组电机的一种有效方法，其基本思想是将多绕组电机等效成仅有单绕组的电机来分析<sup>[21]</sup>。由电机学可知道，单相绕组通入正弦交流电时，在气隙中形成的基波磁势是脉振磁势。一个脉振磁场可以分解为与电动机转向相同的正序圆形旋转磁场和与电动机转向相反的负序圆形旋转磁场。在合成电流法中，认为其余各相绕组产生的正序、负序磁场效应均由某一相绕组中通入归算后的电流得到的(当然这种归算需要考虑各相绕组的空间位置和时间相位)，这样就可以将多绕组电机等效成单绕组电机，简化分析和计算。

三绕组并联式单相感应电动机的定子绕组分布和普通三相感应电动机的绕组分布完全一样，即 A 相、B 相、C 相绕组轴线在空间依次相差  $120^\circ$  电角度，根据合成电流法基本原理，将 B 相、C 相绕组电流产生的正序、负序磁势分别归算到 A 相上，认为是由 A 相绕组中电流产生的，则有

$$\begin{cases} \dot{i}_f = \dot{i}_A + a\dot{i}_B + a^2\dot{i}_C \\ \dot{i}_b = \dot{i}_A + a^2\dot{i}_B + a\dot{i}_C \end{cases} \quad (4)$$

式中  $a = e^{j120^\circ}$  为复数算子。

合成的正序、负序电流反映了定子三相绕组间的相互作用，再与反映转子闭路效应的视在阻抗相乘，便是正序、负序旋转磁场在绕组中感应的电动势。因此，由正序、负序旋转磁场在 A 相绕组中感应的正序、负序感应电动势为

$$\begin{cases} \dot{E}_{Af} = \dot{i}_f Z_f \\ \dot{E}_{Ab} = \dot{i}_b Z_b \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\dot{Z}_f$ 、 $\dot{Z}_b$  分别为正序视在阻抗和负序视在阻抗，其表达式为

$$\begin{cases} Z_f = R_f + jX_f \\ R_f = \frac{1}{3} \frac{sR_2' X_m^2}{R_2'^2 + s^2(X_m + X_{2\sigma}')^2} \\ X_f = \frac{1}{3} \frac{X_m [R_2'^2 + s^2 X_{2\sigma}'(X_m + X_{2\sigma}')] }{R_2'^2 + s^2(X_m + X_{2\sigma}')^2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Z_b = R_b + jX_b \\ R_b = \frac{1}{3} \frac{(2-s)R_2' X_m^2}{R_2'^2 + (2-s^2)(X_m + X_{2\sigma}')^2} \\ X_b = \frac{1}{3} \frac{X_m [R_2'^2 + (2-s^2)X_{2\sigma}'(X_m + X_{2\sigma}')] }{R_2'^2 + (2-s^2)(X_m + X_{2\sigma}')^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $R_f$ 、 $X_f$  分别称为正序视在电阻和正序视在电抗； $R_b$ 、 $X_b$  分别称为负序视在电阻和负序视在电抗。

正序、负序旋转磁场在 B 相、C 相绕组中感应的电动势分别为

$$\begin{cases} \dot{E}_{Bf} = aI_f \dot{Z}_f \\ \dot{E}_{Bb} = a^2 I_b \dot{Z}_b \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{E}_{Cf} = aI_f \dot{Z}_f \\ \dot{E}_{Cb} = a^2 I_b \dot{Z}_b \end{cases} \quad (9)$$

在每一相绕组的回路中，如果忽略漏磁互感压降，则外加电压由绕组漏抗压降以及正序、负序旋转磁场感应的电动势所组成，如图 2 所示。

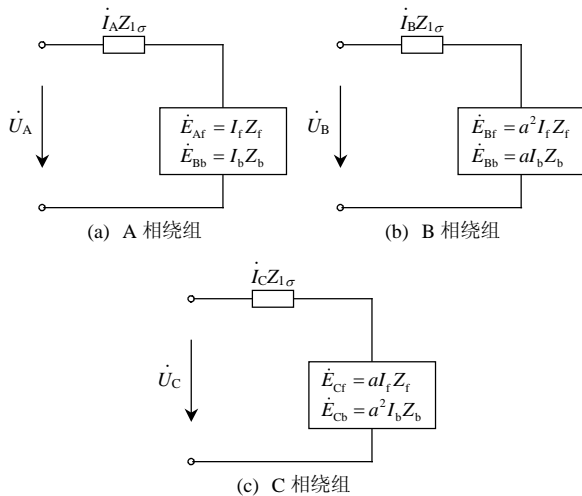


图 2 电压框图

Fig. 2 Voltage block diagram

根据各相绕组电压框图可以写出各相绕组的电压方程：

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{I}_A Z_{1\sigma} + \dot{I}_f Z_f + \dot{I}_b Z_b = (Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b) \dot{I}_A + (aZ_f + a^2 Z_b) \dot{I}_B + (a^2 Z_f + aZ_b) \dot{I}_C \\ \dot{U}_B = \dot{I}_B Z_{1\sigma} + a^2 \dot{I}_f Z_f + a \dot{I}_b Z_b = (a^2 Z_f + aZ_b) \dot{I}_A + (Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b) \dot{I}_B + (aZ_f + a^2 Z_b) \dot{I}_C \\ \dot{U}_C = \dot{I}_C Z_{1\sigma} + a \dot{I}_f Z_f + a^2 \dot{I}_b Z_b = (aZ_f + a^2 Z_b) \dot{I}_A + (a^2 Z_f + aZ_b) \dot{I}_B + (Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b) \dot{I}_C \end{cases} \quad (10)$$

联立式(1)、(2)、(3)、(10)可得

$$\begin{cases} (Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b) \dot{I}_A + (aZ_f + a^2 Z_b) \dot{I}_B + (a^2 Z_f + aZ_b) \dot{I}_C = \dot{U}_s \\ (a^2 Z_f + aZ_b) \dot{I}_A + (Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b + Z_{C1}) \dot{I}_B + (aZ_f + a^2 Z_b) \dot{I}_C = -\dot{U}_s \\ (aZ_f + a^2 Z_b) \dot{I}_A + (a^2 Z_f + aZ_b) \dot{I}_B + (Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b + Z_{C2}) \dot{I}_C = \dot{U}_s \end{cases} \quad (11)$$

可得

$$\dot{I}_A = \frac{\begin{vmatrix} \dot{U}_s & aZ_f + a^2 Z_b & a^2 Z_f + aZ_b \\ -\dot{U}_s & Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b + Z_{C1} & aZ_f + a^2 Z_b \\ \dot{U}_s & a^2 Z_f + aZ_b & Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b + Z_{C2} \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (12)$$

$$\dot{I}_B = \frac{\begin{vmatrix} Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b & \dot{U}_s & a^2 Z_f + aZ_b \\ a^2 Z_f + aZ_b & -\dot{U}_s & aZ_f + a^2 Z_b \\ aZ_f + a^2 Z_b & \dot{U}_s & Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b + Z_{C2} \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (13)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\begin{vmatrix} Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b & aZ_f + a^2 Z_b & \dot{U}_s \\ a^2 Z_f + aZ_b & Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b + Z_{C1} & -\dot{U}_s \\ aZ_f + a^2 Z_b & a^2 Z_f + aZ_b & \dot{U}_s \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (14)$$

式中：

$$\Delta = \begin{vmatrix} Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b & aZ_f + a^2 Z_b & a^2 Z_f + aZ_b \\ a^2 Z_f + aZ_b & Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b + Z_{C1} & aZ_f + a^2 Z_b \\ aZ_f + a^2 Z_b & a^2 Z_f + aZ_b & Z_{1\sigma} + Z_f + Z_b + Z_{C2} \end{vmatrix} \quad (15)$$

要使电机实现对称运行，则必须满足

$$\begin{cases} \dot{I}_b = \dot{I}_A + a^2 \dot{I}_B + a \dot{I}_C = 0 \\ \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \end{cases} \quad (16)$$

可以解得

$$\begin{cases} Z_{C1} = a^2 (Z_{1\sigma} + 3Z_f) \\ Z_{C2} = (a^2 - 1)(Z_{1\sigma} + 3Z_f) \end{cases} \quad (17)$$

式(17)就是该新型电动机稳态运行时的对称条件, 可以据此确定某一负载下实现对称运行所需要接入的容性阻抗, 通常根据额定负载确定, 保证额定负载时对称运行。

然而, 由于需要接入的是容性阻抗, 即接入电阻和电容, 电阻可能正或负, 接入负电阻是不可能的, 而接入正电阻将产生损耗, 也是不现实的。因此, 只能接入电容, 这将无法保证严格的对称运行。必须对电容进行优化, 使额定运行时三相绕组尽可能接近对称运行。

### 3 稳态性能计算方法

基于合成电流法, 根据式(4)、(12)、(13)、(14)可以计算出正序电流分量  $\dot{I}_f$  和负序电流分量  $\dot{I}_b$ , 进而计算出正序和负序电磁功率, 为

$$\begin{cases} P_{ef} = 3I_f^2 R_f \\ P_{eb} = 3I_b^2 R_b \end{cases} \quad (18)$$

合成电磁功率为

$$P_e = P_{ef} - P_{eb} = 3I_f^2 R_f - 3I_b^2 R_b \quad (19)$$

正序、负序机械功率分别为

$$\begin{cases} P_{\Omega f} = P_{ef} - P_{Cu2} = 3I_f^2 R_f - 3sI_f^2 R_f = 3(1-s)P_{ef} \\ P_{\Omega b} = P_{eb} - P_{Cu2} = 3I_b^2 R_b - 3(2-s)I_b^2 R_b = 3(s-1)P_{eb} \end{cases} \quad (20)$$

合成机械功率为

$$P_{\Omega} = P_{\Omega f} + P_{\Omega b} = (1-s)P_e \quad (21)$$

输出功率为

$$P_2 = P_{\Omega} - P_0 \quad (22)$$

式中  $P_0$  为机械损耗和杂散损耗之和。

电磁转矩为

$$T_e = \frac{P_{\Omega}}{\Omega} = \frac{P_e}{\Omega_s} \quad (23)$$

输出转矩为

$$T_2 = P_2 / \Omega \quad (24)$$

由图 1 可以看出, 总输入电流为

$$\dot{i} = \dot{I}_A - \dot{I}_B + \dot{I}_C = -2a^2 \dot{I}_f - 2a \dot{I}_b + \dot{I}_0 \quad (25)$$

输入功率为

$$P_1 = U_s I \cos \varphi \quad (26)$$

式中:  $\varphi$  为电压源与输入电流之间的相位角;  $\cos \varphi$  为电机的功率因数。效率为

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (27)$$

## 4 稳态试验研究

### 4.1 与三相感应电动机进行对比研究

为验证本文所提出的新型电机的性能优越性和分析方法的正确性, 对一台 Y100L1-4 型三相感应电动机(其额定参数如表 1 所示)进行改接, 制造了一台三绕组并联式单相感应电动机。额定电压为 220 V, 额定功率为 2.2 kW, 极对数  $p=2$ , 额定转差率  $s=0.0533$ 。电机参数为: 定子绕组电阻  $R_1=2.39 \Omega$ , 定子绕组漏抗  $X_{1\sigma}=3.28 \Omega$ ; 折算到定子侧时, 转子绕组电阻  $R'_2=2.34 \Omega$ , 转子绕组漏抗  $X'_{2\sigma}=3.75 \Omega$ ; 激磁电抗  $X_m=101.8 \Omega$ 。

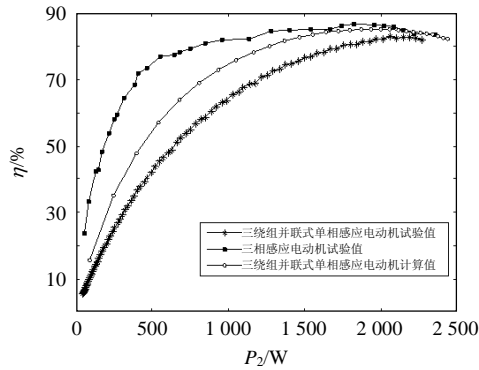
表 1 Y100L1-4 型三相感应电动机的额定参数  
Tab. 1 Y100L1-4 three-phase induction motor ratings

参数	数值
额定功率/kW	2.2
额定电压/V	380
额定电流/A	5
相数	3 相
接法	Y 接法
额定频率/Hz	50
额定转速/(r/min)	1 420
额定效率/%	82.04
额定功率因数	0.833

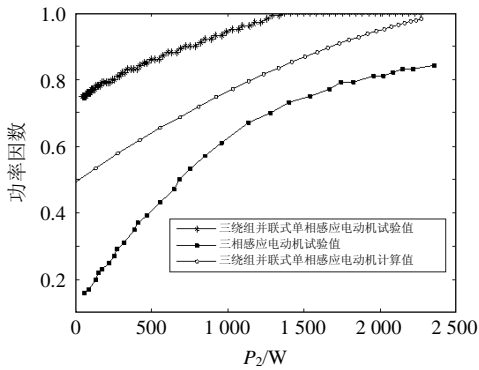
由式(17)可以看出, 匹配电容值是转差率  $s$  的函数。根据该电机在三相运行方式时的额定转差率  $s=0.0533$ , 可以计算出额定运行时的匹配电容值; 令转差率  $s=1$ , 可以计算出起动时的匹配电容值。考虑到实际电容规格, 选择运行电容  $C_{1r}=75 \mu\text{F}$ ;  $C_{2r}=50 \mu\text{F}$ , 其对应的交流电阻分别为  $R_{C1r}=4.4 \Omega$ ;  $R_{C2r}=4.3 \Omega$ 。选择起动电容  $C_{1st}=400 \mu\text{F}$ ;  $C_{2st}=200 \mu\text{F}$ 。

利用 MTS-I 电机测试系统进行稳态试验, 分别得到原三相感应电动机和该三绕组并联式单相感应电动机的效率、功率因数和定子绕组电流值。效率、功率因数随输出功率变化的曲线如图 3 所示。定子绕组电流随输出功率变化的曲线如图 4 所示。同时, 根据三绕组并联式单相感应电动机的稳态性能计算方法计算了该电机的稳态性能, 并将计算结果绘于图 3、4 中。

从图 3 可以看出, 三相感应电动机在负载率超过 70% 时, 效率和功率因数能够取得较高值, 并随着负载率的增加继续提高。满载之后, 其效率会下降。在额定输出功率 2.2 kW 时, 电机效率为 83.5%, 功率因数为 0.83。对于三绕组并联式单相感应电动



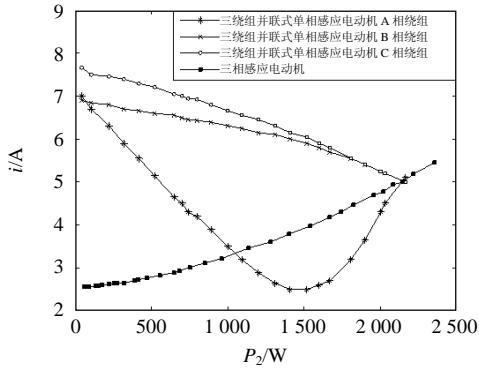
(a) 效率对比



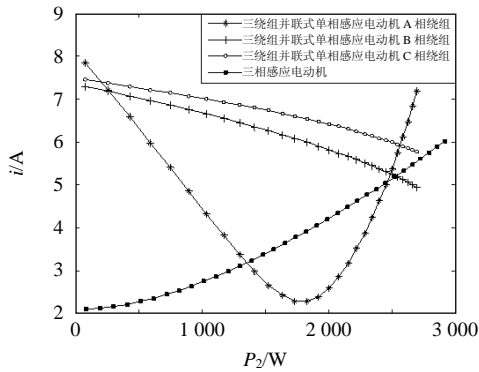
(b) 功率因数对比

图3 效率、功率因数随输出功率变化曲线

Fig. 3 Efficiency and power factor for different output power



(a) 试验电流



(b) 计算电流

图4 电流随输出功率变化曲线

Fig. 4 Currents for different output power

机, 在负载率超过 70% 时, 效率和功率因数能够取得较高值, 并随着负载率的增加继续提高。满载之后, 其效率会下降。在额定输出功率 2.2kW 时, 电机效率为 82.4%, 功率因数为 1。综上所述, 新型单相感应电动机的额定效率略低于三相感应电动机, 额定功率因数显著高于后者且在轻载时能够维持较高值。另外, 从图 3(b) 可以看出, 三绕组并联式单相感应电动机功率因数的试验结果和理论计算结果吻合的不是很好, 可能的原因是 1) 与普通单相感应电动机一样, 由于负序磁场的存在, 铁耗难以准确计算; 2) 没有考虑谐波磁场及铁心饱和的影响。

三绕组并联式单相感应电动机的各相电流与三相感应电动机的相电流对比如图 4 所示。可以看出, 三相感应电动机对称运行时, 绕组电流随着负载的增大而增大。对于三绕组并联式单相感应电机, 随着负载的增大, A 相绕组电流先减小, 后增大, 在输出功率约为 1500 W 时, 电流达到最小值 2.5 A; B 相、C 相电流随负载增大而减小。当电机输出功率为额定功率 2.2kW 时, A 相、B 相、C 相电流有效值分别为 5.1、5.0 和 5.0 A, 三相电流基本对称, 且接近三相感应电动机的额定相电流 5.1 A。理论计算结果和试验结果基本一致, 证明了稳态数学模型的正确性。

定义负序系数  $k_{1b}$  为电机正常运行时负序电流有效值与正序电流有效值之比; 零序系数  $k_{10}$  为电机正常运行时零序电流有效值与正序电流有效值之比。为了考虑各相电流相位的变化, 图 5 给出了负序系数  $k_{1b}$  和零序系数  $k_{10}$  随输出功率变化的曲线。

从图 5 可以看出, 负序电流和零序电流都是随

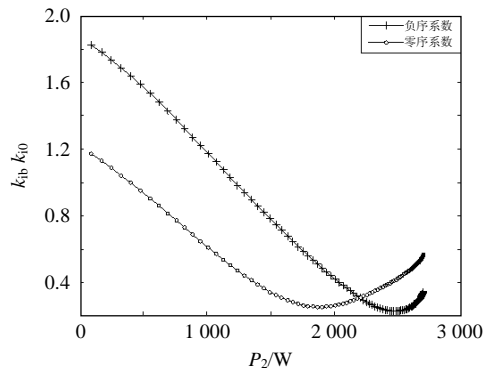


图5 负序系数  $k_{1b}$  和零序系数  $k_{10}$  随负载变化的曲线

Fig. 5 Negative sequence factor  $k_{1b}$  and zero sequence factor for different output power

着输出功率的增大先减小后增大，当  $P_2=2\ 450\ \text{W}$  时，负序电流达到最小值 0.2285；当  $P_2=1\ 870\ \text{W}$  时，零序电流达到最小值 0.2516；当输出功率为额定功率 2 200 W 时，负序电流和零序电流分别为 0.305 8 和 0.308 9。所以，按照额定负载选取合适的匹配电容，可以使三绕组并联式单相感应电动机在额定负载附近运行时取得较小的负序系数和零序系数，具有较好的对称性。

#### 4.2 与 SEMIHEX 接法进行对比研究

为了进一步验证三绕组并联式单相感应电动机的性能，将其试验结果和一台 2.2 kW, 190 V/50 Hz 的具有 SEMIHEX 接法的单相感应电动机的试验结果进行比较。表 2 给出了 SEMIHEX 接法单相感应电动机的参数和运行电容。

表 2 SEMIHEX 接法单相感应电动机的参数和运行电容  
Tab. 2 Parameters and running capacitances of the motor with SEMIHEX connection

参数	数值
额定功率/kW	2.2
极对数	2
额定转差率 $s$	0.053 3
单相供电电源	190V/50Hz
定子绕组电阻 $R_1/\Omega$	0.812 8
归算到定子侧时转子绕组电阻/ $\Omega$	0.746 3
定子绕组漏电抗 $X_{1\sigma}/\Omega$	0.992 7
归算到定子侧时转子绕组漏电抗/ $\Omega$	0.992 7
激磁电抗 $X_m/\Omega$	118.092 3
运行电容 $C_{1r}/\mu\text{F}$	135
运行电容 $C_{2r}/\mu\text{F}$	270

图 6(a)、(b)分别给出了三绕组并联式接法和 SEMIHEX 接法电机的试验效率和功率因数。从图 6(a)可以看出，当电机的输出功率为 1 900 W 时，2 种电机的效率几乎相等，约为 82%。当输出功率小于 1 900 W 时，三绕组并联式接法电机的效率略低于 SEMIHEX 接法电机，然而，当输出功率大于 1 900 W 时，前者具有更高的效率。从图 6(b)可以看出，三绕组并联式单相感应电动机比 SEMIHEX 接法电动机具有更高的功率因数。

### 5 结论

本文提出了一种新型高效的单相感应电动机——三绕组并联式单相感应电动机。基于合成电流法，推导出了该新型电机的对称运行条件，从分析结果可以看出，匹配电容值是转差率的函数，即当

转差率或者负载变化时，应选取不同的电容以达到新的平衡状态。本文详细推导了该电机的稳态性能计算公式，并将计算结果与试验结果做对比，结果证明了计算方法的正确性。对一台 2.2 kW 的三相感应电动机进行改接，并进行稳态试验研究，结果表明，该新型单相感应电动机额定效率接近于同容量三相感应电动机的效率，功率因数明显高于后者，有很好的应用价值和应用前景。

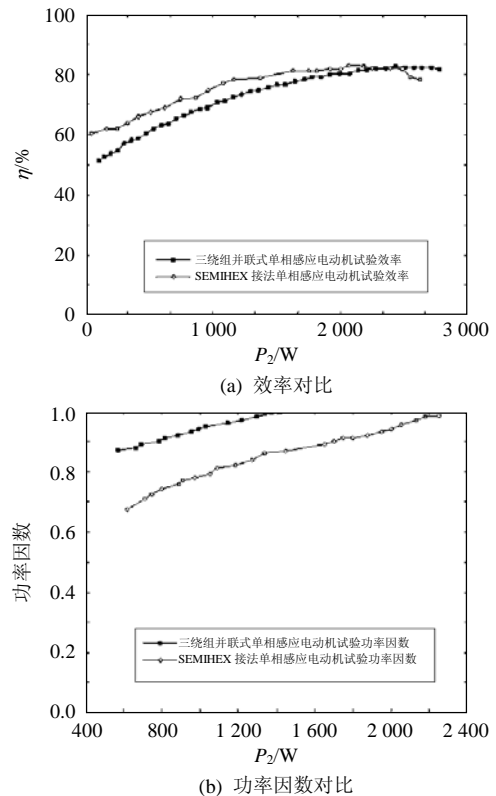


图 6 与 SEMIHEX 接法电机试验结果比较  
Fig. 6 Comparison of experimental results with SEMIHEX connection

### 参考文献

- [1] Badr M A, Alolah A I, Abdel-Halim M A. A capacitor start three phase induction motor[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995, 10(4): 675-680.
- [2] Alwash J H H. Predicting performance of three-phase induction motor connected to a single phase supplies [J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 1996, 143(4): 339-344.
- [3] Brown J E, Jha C S. The starting of a three-phase induction motor connected to a single phase supply system[J]. Proceedings of the institution of Electrical Engineers, 1959, 106(1): 183-190.
- [4] Tindall C E, Monteith W. Balanced operation of three-phase induction motors connected to single-phase

- supplies[J]. Proceedings of the institution of Electrical Engineers, 1976, 123(6): 517-522.
- [5] Tozune A D. Balanced operation of three-phase induction motor with asymmetrical stator windings connected to single-phase supply system[J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings B, 1991, 38(4): 167-174.
- [6] 吴新振, 金明, 周鹏. 三相异步电机在单相电源供电时稳态运行性能的分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 49-52.  
Wu Xinzhen, Jin Ming, Zhou E. Analysis and calculation on steady state performance of three-phase induction motors with single-phase source[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 49-52(in Chinese).
- [7] 吴新振, 王祥珩. 异步电机不对称运行时电容值的确定[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 125-129.  
Wu Xinzhen, Wang Xiangheng. Run capacitance of the induction machine under unbalanced operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 125-129(in Chinese).
- [8] 麻鸿儒, 刘永德, 张宇辉. 三相异步电动机单相运行的最佳电容计算[J]. 中小型电机, 1999, 26(5): 21-25.  
Ma Hongru, Liu Yongde, Zhang Yuhui. Calculation on the best capacitor of three-phase induction motors with single-phase source[J]. Small and Medium Electric Machines, 1999, 26(5): 21-25(in Chinese).
- [9] 仲慧, 王秀和, 张洪宝. 三绕组单相感应电动机的性能分析与实验研究[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(4): 501-506.  
Zhong Hui, Wang Xiuhe, Zhang Hongbao. Performance analysis and experimental research of three winding single phase induction motor[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(4): 501-506(in Chinese).
- [10] Smith O J M. High-efficiency single-phase motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1992, 7(3): 560-569.
- [11] Chan T F, Lai L L. Single-phase operation of a three-phase induction generator with the smith connection [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(1): 47-54.
- [12] Chan T F, Lai L, Yan L T. A coupled circuit and field analysis of a three-phase induction motor with the Smith connection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1315-1318
- [13] Chan T F, Lai L. Steady-state analysis of a three-phase induction motor with Smith connection[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(10): 45- 46.
- [14] Smith O J M. Large low-cost single-phase SEMIHEX™ motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1353- 1358.
- [15] Hui Zhong , Xiuhe Wang , Xuemei Leng , et al. Steady-state performance analysis of three-phase induction motor with SEMIHEX connection[C]//Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Guangzhou, China: IEEE, 2007: 269-272.
- [16] 田国会, 王蕾. 新型高起动转矩高效单相感应电动机研究[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(2): 103-106.  
Tian Guo hui, Wang Lei. A new type of single phase induction motorwith high starting torque and efficiency [J]. Electric Machines and Control, 2001, 5(2): 103-106(in Chinese).
- [17] 王秀和, 田国会. 新型高效单相感应电动机的设计计算方法研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(4): 10-13.  
Wang Xiuhe, Tian Guohui. Study of a new type of single-phase induction motor with higher efficiency [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(4): 10-13(in Chinese).
- [18] 付大金, 王秀和, 杨玉波, 等. 一种新型高效单相感应电动机的试验研究[J]. 电工技术杂志, 2003(5): 52-54.  
Fu Dajin, Wang Xiuhe, Yang Yubo, et al. Experimental study of new type high efficiency single-phase induction motor[J]. Electrotechnical Journal, 2003(5): 52-54(in Chinese).
- [19] 仲慧, 王秀和, 张洪宝, 等. 新型接法的三绕组单相电动机[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 69-73.  
Zhong Hui, Wang Xiuhe, Zhang Hongbao, et al. Single phase induction motor with new type three-winding [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 69-73(in Chinese).
- [20] Wang Xiuhe, Zhong Hui, Yang Yubo, et al. Study of a novel energy efficient single-phase induction motor with three series-connected windings and two capacitors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 433-440.
- [21] 孙云鹏. 单相异步电动机及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 24-35.  
Sun Yunpeng. Single-phase asynchronous motor and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 24-35(in Chinese).



裴英

收稿日期: 2011-06-20。

作者简介:

裴英(1985), 女, 博士研究生, 主要从事特种电机研究, peiying666666@163.com;  
王秀和(1967), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事特种电机方面研究;  
仲慧(1974), 女, 讲师, 主要从事特种电机研究;  
杨玉波(1978), 男, 讲师, 主要从事特种电机研究。

(责任编辑 王剑乔)