

三相异步电动机单相运行的起动 分析计算和试验研究

李自良 曹东白 麦灼辉 龙静仪 尤保蕙
(电气工程系) (铁道部电化局 (铁道部第二设计院) (北京发那科数控 (上海宝山钢铁公司)
天津设计院) 服务中心)

摘 要

通过三相异步电动机单相运行的试验,着重研究了起动接线方案、电机绕组电流、电机转矩及功率、控制电路等,并提出多组实用计算公式,以便选用和参考。

关键词:异步电动机;单相运行;控制电路

0 引 言

在某些技术场所,需要采用单相电源进行电力拖动.对于功率较小的运动负载,使用单相电动机较为方便,对于较大的负载,单相电动机则需要作特殊设计.这种单相电动机与等效的三相电动机相比,成本较高.三相异步感应电动机单相运行是一个实际的技术课题,不容否定^[2].家用电器的单相电动机损坏后,代之以三相电动机,有时是当务之急^[3].多年来,关于三相异步电动机的单相运行问题,迄今时有报道^[1~6].

三相电动机单相运行时,由于无起动转矩,可在机械或电气方面,采取附加措施.电动机可在空载状态下,由小型汽油机或柴油机起动.例如,农村拖拉机的动力输出传动轴便可起动电动机.待其运转后,实际电源才被接通,同时机械传动被分离^[2].另外,电动机可以附加起动绕组,即构成辅助相,以便生成起动转矩,这就是本文的研究内容.在唐山机车车辆工厂,我们曾经结合生产实际需要,进行试验研究,用以牵引运动负载,并取得成功,如图1所示.实际上,该供电装置构成一条完整的袖珍型电气化铁路.

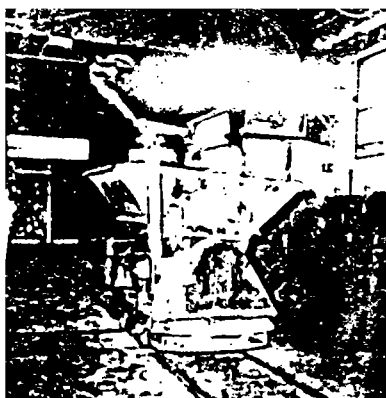


图1 电车外观

本文于1994年4月13日收到

1 起动元件的选择和接线方法

1.1 三角形接法

(1) 起动绕组加入电感，工作绕组加入电阻

这种接线方法如图 2 所示. X_L 为所加感抗, R_u 为所加电阻, U 为外加电压. 工作绕组由两相定子绕组通过反极性串联构成, 以使工作和起动绕组的磁通在空间构成 $\pi/2$ 电度角.

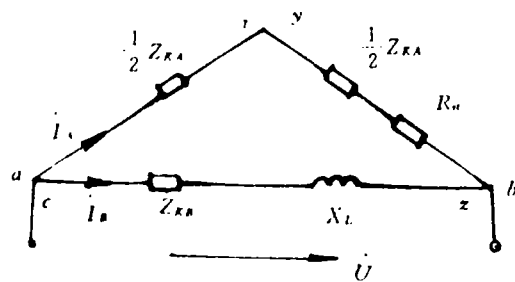


图 2 三角形接线图

(a) X_L 的选择

X_L 的选择条件: 辅助相的起动电流 I_B 不大于三相对称电机的起动电流 $I_u^{(3)}$, 即

$$I_B \leq I_u^{(3)}. \tag{1}$$

而 $I_u^{(3)} = \frac{U_\pi}{Z_K}$,

式中 U_π ——三相对称电机相电压的额定值;
 Z_K ——三相对称电机的每相短路阻抗.

$$U = mU_\pi.$$

本装置中, 电压比例系数 $m = \sqrt{3}$.

可求得

$$X_L \geq \sqrt{m^2 Z_K^2 - r_{KB}^2} - x_{KB}. \tag{2}$$

(b) R_u 的选择

R_u 的选择条件: 起动转矩 M_u 具有最大值.

$$M_u = KI_A I_B \sin \gamma.$$

式中 γ ——电流 I_A 和 I_B 的相位差, 其值为:

$$\gamma = \varphi_A - \varphi_B,$$

其中 φ_A ——A 相支路的阻抗角;

φ_B ——B 相支路的阻抗角.

X_L 选定后, I_B 即为常数. R_u 的最大值应满足 $dM_u/dR_u = 0$. 可求得

$$R_u = x_{KA} \left[\frac{r_{KB}}{x_{KB} + x_L} + \sqrt{1 + \left(\frac{r_{KB}}{x_{KB} + x_L} \right)^2} \right] - r_{KA}. \tag{3}$$

一般情况下, 有

$$R_u \approx x_{KA} \left(\frac{r_{KB}}{x_{KB} + X_L} + 1 \right) - r_{KA}. \tag{4}$$

(2) 起动绕组加入电容, 工作绕组 加入电阻

该法与方法 (1) 的选择条件相同, 可求得

$$x_c \geq x_{KB} + \sqrt{m^2 Z_K^2 - r_{KB}^2}, \quad (5)$$

$$R_u = x_{KA} \left(\frac{r_{KB}}{x_{KB} - X_C} + 1 \right) - r_{KA}. \quad (6)$$

(3) 起动绕组分别加入电阻或电感或电容

选择条件: 起动转矩 M_u 具有最大值^[1]. 可求得

$$R_u = \frac{x_{KB}}{x_{KA}} (r_{KA} + Z_{KA}) - r_{KB}, \quad (7)$$

$$X_L = \frac{r_{KB}}{r_{KA}} (x_{KA} + Z_{KA}) - x_{KB}, \quad (8)$$

$$X_C = \frac{r_{KB}}{r_{KA}} (x_{KA} + Z_{KA}) + x_{KB}. \quad (9)$$

(4) 起动和工作绕组同时加入电抗元件

如拟 B 相加入电容, A 相加入电感.

X_C 和 X_L 的选择条件: 起动时构成两相对称系统而产生圆形旋转磁场. 这是精确的理论分析方法, 必须同时满足如下条件:

(a) 两相磁势的幅值相等

这时, 有 $W_A I_A = W_B I_B$.

式中 W_A ——A 相绕组的有效匝数;

W_B ——B 相绕组的实有匝数.

按图 1 接线时, 有 $W_A = \sqrt{3} W_B$,

故

$$I_B = \sqrt{3} I_A. \quad (10)$$

(b) 两相磁势, 亦即两相电流的相位差等于 $\pi/2$;

(c) 两相磁势在空间相差 $\pi/2$ 电度角. 由前述, 此项条件已经满足.

根据以上条件, 有

$$\dot{I}_B = j \sqrt{3} \dot{I}_A, \quad (11)$$

可求得

$$X_C = \frac{r_{KA}}{\sqrt{3}} + x_{KB}, \quad (12)$$

$$X_L = \sqrt{3} r_{KB} - x_{KA}. \quad (13)$$

计算和试验结果表明, 采用该方法时, 起动电流过大. 3kW 容量等极的三相电机在满电压下单相起动时, 定子绕组电流可达 30~70A. 为此, 将该方法作如下变更.

(5) 起动绕组加入电容

(a) 两相磁势的幅值相等

可求得

$$X_C = x_{KB} \pm \sqrt{\frac{Z_{KA}^2}{3} - r_{KB}^2}. \quad (14)$$

(b) 辅助相的起动电流不大于三相对称电机的起动电流

显然, X_C 的取值同式 (5).

(c) 两相磁势的相位差等于 $\pi/2$

可求得

$$X_C = x_{KB} + r_{KB} \frac{r_{KA}}{x_{KA}}. \quad (15)$$

计算结果表明, 上述三种方法不可同时兼有, 方法 (c) 所需的电容量最大, 方法 (a) 次之, 方法 (b) 最小. 首先, 可用方法 (a) 确定电容量 C ; 其次, 用方法 (c) 验算相位差 φ . 若 $\varphi \geq 135^\circ$ 时, 则适量增大电容量. 最后, 用方法 (b) 校验辅助相的起动电流. 若起动电流过大时, 则适当减小电容量.

1.2 星形接法

这种接线方法如图 3 所示. 拟定 A 相加入电容, B 相加入电感.

X_C 和 X_L 的选择条件: 起动时构成三相对称系统而产生圆形旋转磁场. 这也是精确的理论分析方法, 具体条件为:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_B \angle 120^\circ, \quad (16)$$

可求得

$$X_C = \sqrt{3} r_K + x_K, \quad (17)$$

$$X_L = \sqrt{3} r_K - x_K. \quad (18)$$

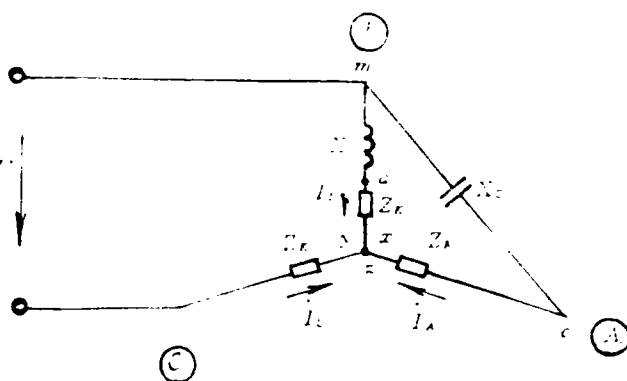


图3 星形接线图

2 转矩和功率的确定

在三相不对称条件下, 三相异步电动机的机械转矩 (内转矩)

$$M = \frac{3p}{\omega_1} (I_1^2 \frac{r_2}{s} - I_2^2 \frac{r_2'}{2-s}). \quad (19)$$

式中 ω_1 —— 电源电压的基波角频率, rad/s , 其值为 $\omega_1 = 2\pi f_1$;

p —— 极对数;

s —— 转差率;

I_1 —— 定子正序电流;

I_2 —— 定子负序电流.

$$\text{机械功率 (内功率)} \quad P = M\omega, \quad (20)$$

式中 ω ——转子角速度, 其值为 $\omega = \frac{\omega_1}{p}(1-s)$,

起动转矩

$$M_u = \frac{3p}{\omega_1}(I_1^2 - I_2^2)r_2. \quad (21)$$

2.1 一相断线的不完全星形

本装置采用的星接三相电动机单相运行状态与电力系统二相短路等价. 将求得的 I_1 和 I_2 代入式 (19), 得

$$M = \frac{p}{\omega_1} \left(\frac{r_2}{s} - \frac{r_2}{2-s} \right) \frac{U^2}{(2r_1 + \frac{r_2}{s} + \frac{r_2'}{2-s})^2 + (2x_1 + 2x_2)^2} \quad (22)$$

定子电流

$$I = \frac{U}{\sqrt{(2r_1 + \frac{r_2}{s} + \frac{r_2'}{2-s})^2 + (2x_1 + 2x_2)^2}} \quad (23)$$

2.2 起动绕组加入电容的星形

只有起动绕组加入电容的星形接线如图 4 所示. 采用对称分量法, 对该不对称三相系统分析如下.

特征方程组

$$\begin{bmatrix} Z_3 & Z_4 \\ Z_5 & Z_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

式中 $Z_1 = (r_1 + \frac{r_2}{s}) + jx_k$;

$$Z_2 = (r_1 + \frac{r_2'}{2-s}) + jx_k;$$

$$Z_3 = -j\sqrt{3}Z_1;$$

$$Z_4 = j\sqrt{3}Z_2;$$

$$Z_5 = \sqrt{3}Z_1 \angle 30^\circ - jX_c;$$

$$Z_6 = \sqrt{3}Z_2 \angle -30^\circ - jX_c.$$

可求得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{U} \frac{Z_6}{Z_3Z_6 - Z_4Z_5}, \\ \dot{I}_2 &= \dot{U} \frac{Z_5}{Z_4Z_5 - Z_3Z_6}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式(25)同时适用于起动和运行情况(起动时, 令 $s = 1$), 将所求结果代入式(19)和(21), 即得 M 和 M_u .

2.3 起动绕组加入电容的三角形

只有起动绕组加入电容的三角形接线如图 5 所示. 采用对称分量法, 对该不对称二相系

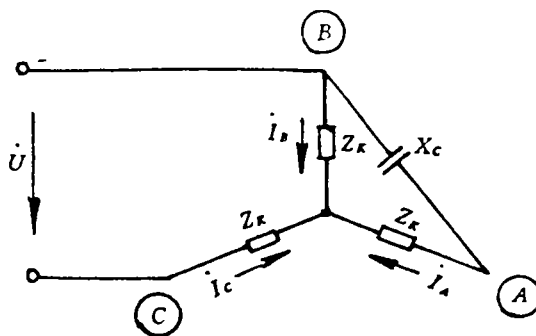


图 4 星形简化接线图

统分析如下.

二相电流

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_B' &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2, \\ \dot{I}_A &= -j\dot{I}_1 + j\dot{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

式中 $\dot{I}_B'$ —— 以 A 相绕组匝数 W_A 为基准, B

相电流的归算量, 其值为 $\dot{I}_B' = \frac{1}{\sqrt{3}}\dot{I}_B$

由式 (26) 得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{1}{2}(\dot{I}_B' + j\dot{I}_A), \\ \dot{I}_2 &= \frac{1}{2}(\dot{I}_B' - j\dot{I}_A). \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

特征方程组

$$\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_3 & Z_4 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{U} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

式中 $Z_1 = \sqrt{3}[(r_{1B} + \frac{r_{2B}}{s}) + j(x_{KB} - X_C)];$

$$Z_2 = \sqrt{3}[(r_{1B} + \frac{r_{2B}'}{2-s}) + j(x_{KB} - X_C)];$$

$$Z_3 = -j[(r_{1A} + \frac{r_{2A}}{s}) + jx_{KA}];$$

$$Z_4 = j[(r_{1A} + \frac{r_{2A}'}{2-s}) + jx_{KA}].$$

可求得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{U} \frac{Z_2 - Z_4}{Z_2 Z_3 - Z_1 Z_4}, \\ \dot{I}_2 &= \dot{U} \frac{Z_3 - Z_1}{Z_2 Z_3 - Z_1 Z_4}. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

式 (29) 同时适用于起动和运行情况.

不对称二相电机的起动转矩应当为

$$M_u = \frac{p}{\omega_1} (I_1^2 - I_2^2) (r_{2A} + 3r_{2B}), \quad (30)$$

不对称二相电机的机械转矩应当为

$$M = \frac{p}{\omega_1} [(I_1^2 \frac{r_{2A}}{s} - I_2^2 \frac{r_{2A}'}{2-s}) + 3((I_1^2 \frac{r_{2B}}{s} - I_2^2 \frac{r_{2B}'}{2-s})]. \quad (31)$$

另外, 起动转矩尚可用相电流表示之. 由式 (27) 得 $I_1^2 - I_2^2 = \frac{I_A I_B}{\sqrt{3}} \sin r.$

将上式代入式 (30), 得

$$M_u = K I_A I_B \sin r. \quad (32)$$

式中 $K = \frac{p}{\sqrt{3} \omega_1} (r_{2A} + 3r_{2B}).$

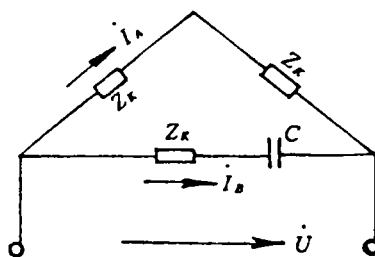


图5 三角形简化接线图

式 (32) 在电力系统继电保护中常用, 该式且与式 (30) 等价.

3 方案鉴定

采用 JO₂-32-4 型三相异步电动机, 额定功率 2.8kW. 同时, 采用三相电力电容器, 电容为 216 μ F. 当采用一台或两台电容器时, 可得五个单相电容值, 即 108, 144, 216, 252, 288 μ F. 曾拟定五个接线方案, 包括三角形和星形接法, 电源电压分别取为 380 或 220V. 对于上述方案, 我们均进行了试验. 鉴别原则如下:

- (1) 辅助相只作电动机起动用. 起动后, 便将其切除, 三相电动机遂进入单相运行状态;
- (2) 电动机应可靠起动, 即起动转矩足够大;
- (3) 电动机定子绕组的起动电流不超过三相对称电动机的起动电流;
- (4) 根据往复运动的需要, 电动机应能反转;
- (5) 为使电气装置轻便, 电容器不超过两台;
- (6) 在保证起动和运行可靠的前提下, 为简化计, 取消电阻和电感元件, 只保留电容元件, 从而采用简单的星形或三角形接线.

根据上述理论分析, 三相异步电动机在各种状态下的有关物理量计算结果如表 1 所示. 该计算结果与试验结果相符.

由表 1 可见, 无论三角形或星形接法 (简单型), 带电容运行时, 定子绕组工作电流过大, 起动完成后, 辅助相必须断开. 此外, 星形的起动转矩比三角形的大, 大约为其 1.3 倍. 还须指出, 三角形接法固定时, 电动机不能反转, 旋转方向为引前相至滞后相. 在星形接法中, 采用转换开关将辅助相的端子分别接至其他两相绕组的出线端时, 电动机便可反转. 因此, 星形接法是最优方案, 如图 3 所示.

4 控制电路

控制电路的作用是起动开始时将起动电容自动投入, 起动完成时将其自动切除. 我们研制的三相异步电动机单相运行的主电路如图 6 所示. 转换开关 Zk 具有前进、后退、停止三个位置, 以便实现电动机的可逆运转. 交流接触器 JJ 的两个常开接点分别串入电容器 C 和指示灯 HD 的支路.

控制电路 (KL) 如图 7 所示. 交流接触器 JJ 和时间继电器 SJ 均在电车起动时动作, 它们的额定电压取为 220V. 中间继电器 ZJ 在电车运行中自保持, 其额定电压取为 380V. SJ 的整定时限取为 3~4s. 考虑到外部电压损失的实际情况, 为确保继电器和接触器具有足够的动作电压起见, 分别加入电容 C₁ (8 μ F), C₂ (10 μ F), C₃ (5 μ F). 串联电容起电压补偿作用.

表 1 计算结果表 ($n=1430\text{rpm}$, $c=144\mu\text{F}$)

			U (V)	380	350	300	250	200
不对称	星形	起动	I_A (A)	13.50	12.40	10.70	8.85	7.10
			I_B (A)	31.30	28.80	24.80	20.50	16.50
			I_C (A)	22.00	20.40	17.50	14.50	11.60
			M_u (N·m)	15.70	13.35	9.80	6.80	4.37
		运行	I_A (A)	23.80	22.00	18.90		
			I_B (A)	20.20	18.50	15.90		
			I_C (A)	29.50	27.20	23.30		
			M (N·m)	15.40	13.10	9.64		
	P (kW)		2.32	1.96	1.45			
	三角形	起动	I_A (A)	23.70	22.80	18.75	15.60	12.50
			I_B (A)	24.40	22.50	19.30	16.10	12.85
			M_u (N·m)	12.40	10.50	7.72	5.36	3.44
		运行	I_A (A)	12.00	11.10	9.45		
			I_B (A)	28.80	26.60	22.80		
			M (N·m)	41.60	35.20	25.90		
			P (kW)	6.23	5.26	3.88		
			不完全星形	运行	I_A (A)	6.67	6.15	5.28
	I_B (A)	6.67			6.15	5.28		
	M (N·m)	13.70			11.64	8.55		
	P (kW)	2.05			1.74	1.28		
对称	起动	I_u (A)	28.20	26.00	22.30			
		M_u (N·m)	35.20	29.90	22.00			
	运行	I (A)	4.22	3.90	3.33			
		M (N·m)	16.80	14.30	10.50			
		P (kW)	2.51	2.14	1.57			

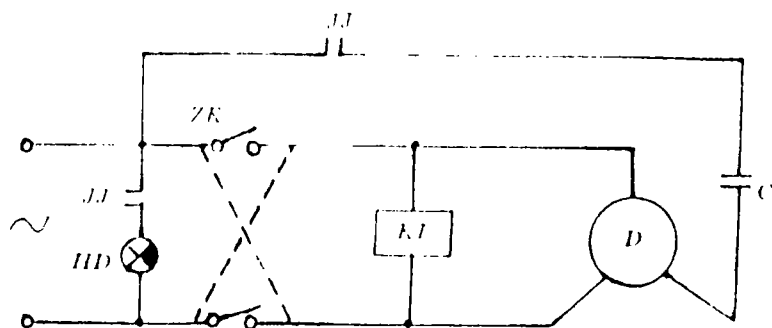


图 6 三相异步电动机单相运行的主电路

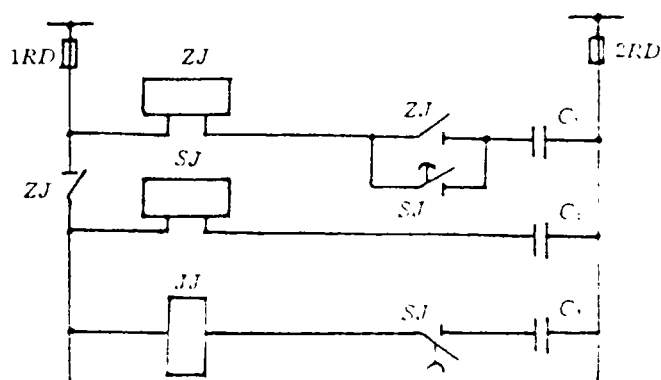


图 7 控制电路展开图

参 考 文 献

- [1] 莫斯科动力学院电机教研组编, 潘曙先译. 异步电机研究. 北京: 高等教育出版社, 1959
- [2] 唐竹译. 三相电动机在单相电源下的运行. 电工技术, 1987, (2): 22~23
- [3] 孙毅铨. 三相异步电动机用于单相电源的改接. 电工技术, 1982, (10): 55~56
- [4] 谢开炎编译. 三相异步电动机在单相电路中的运行. 电工技术, 1986, (7): 45~46
- [5] 樊伟准译. 三相电机在单相电网中高效运行的接法. 电工技术, 1983, (8): 11~13
- [6] 韩有志. 改三相异步电动机为单相运行. 电工技术, 1985, (10): 19

The Starting Analysis and Calculation and the Experimental Research for the Single—phase Operation of the Three—phase Asynchronous Motor

Li Ziliang Cao Dongbai Mai Zhuohui
Long Jingyi You Baohui

ABSTRACT

Through the experimental research for the single—phase operation of the three—phase asynchronous motor, we have made place emphasis on study to start connection scheme, the motor winding current, the motor torque, the power and the control circuit etc. Groups of practical calculation formulas have been also provided so that readers may choose and consult.

Key words: Asynchronous motor; Single—phase operation; Control circuit