

游梁式抽油机功率因数调节技术研究

首次推导出了三相异步电动机功率因数与端电压和负载转矩之间的关系。针对晶闸管三相交流调压电路，推导出了功率因数与触发角和负载转矩之间的关系式。为达到提高游梁式抽油机功率因数的目的，进一步给出了触发角与功率因数角之间的关系，并在试验系统上验证了算法的有效性。

张永锋 孙晓凌 周国顺/大连东软信息学院电子工程系



张永锋/讲师

三相异步电动机是一种使用广泛的动力机械，在满负荷的工作条件下，功率因数一般较高；然而一旦负载下降，电动机的功率因数便随之显著下降，所以实际运行时电动机的平均功率因数都是比较低的。通过降压运行的方式，提高电动机的功率因数，降低能耗，有着巨大的经济和社会效益。

三相异步电动机系统是一个时变、强耦合的非线性系统，使得其功率因数调节技术非常复杂。本文在转差率接近于零的条件下，推导出了功率因数与端电压和负载转矩之间的关系式并将其推广应用用于游梁式抽油机系统。基于晶闸管三相交流调压电路，给出了触发角与功率因数角之间的关系式，并在试验条件下验证了该算法的有效性。

关键词/Keywords

功率因数 ·
降压节能 ·
三相异步电动机 ·

功率因数调节原理

为便于说明分析，图1给出了三相异步电动机经过频率归算后的T形等效电路^[1]。

1. 电压、负载转矩与转差率的关系

根据电机学原理，异步电动机的电

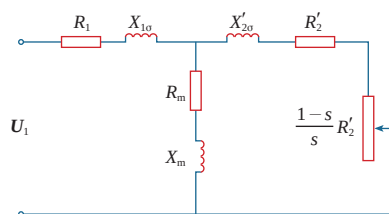


图1 三相异步电动机的T形等效电路

磁转矩^[1]为

$$T_e = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{(R_1 + c \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{1\sigma} + cX_{2\sigma}')^2} \quad (1)$$

式中， s 为转差率， U_1 为电动机端电压；当电动机处于额定转速运行时，假定其他参数对于固定电动机来说是常数。

负载转矩占主要成分、忽略机械损耗和附加损耗时，可以认为电磁转矩 T_e 和负载转矩 T_s 相等，由此可推出 U_1 、 s 和 T_s 之间的关系为

$$U_1 \approx \sqrt{T_s \frac{s}{R_2'} \frac{\Omega_s}{m_1} \left[(R_1 + c \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{1\sigma} + cX_{2\sigma}')^2 \right]} \quad (2)$$

式中， $0 \leq s \leq 1$ ，当电动机处于额定转速运行、 s 接近于0时，式(2)可以进一步简化为

$$U_1^2 \approx \frac{c^2 R_2' \Omega_s T_s}{m_1 s} \quad (3)$$

由式(3)可以看出，当电动机处于额定转速运行、 s 接近于0时， U_1^2 近似与 T_s 成正比，与 s 成反比。

由式(3)可以推出

$$s = \frac{c^2 R_2' \Omega_s T_s}{m_1 U_1^2} \quad (4)$$

2. 功率因数与转差率的关系

由图1的等效电路可知

大连市科学技术基金(2013J21DW005)，大连市高新技术产业园区集成电路设计产业化专项。

$$\begin{aligned}
 Z &= Z_{1\sigma} + \frac{Z_m Z'_2}{Z_m + Z'_2} \\
 &= \frac{Z_{1\sigma} Z_m + Z_{1\sigma} Z'_2 + Z_m Z'_2}{Z_m + Z'_2} \\
 &= \frac{Z_{1\sigma}/Z'_2 + Z_{1\sigma}/Z_m + 1}{1/Z'_2 + 1/Z_m}
 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $Z_{1\sigma} = R_1 + jX_{1\sigma}$; $Z_m = R_m + jX_m$; $Z'_2 = \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma}$ 。

据文献[1], 三相异步电动机正常工作时, $|Z_{1\sigma}| = |Z_m|$, $|Z_{1\sigma}| = |Z'_2|^{[1]}$, 可以近似取 $Z_{1\sigma}/Z'_2 \approx 0$, $Z_{1\sigma}/Z_m \approx 0$, 则式(5)可简化为

$$\begin{aligned}
 Z &\approx \frac{1}{1/Z'_2 + 1/Z_m} = \frac{1}{1/(\frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma}) + 1/(R_m + jX_m)} \\
 &= \frac{1}{(\frac{R'_2}{s} - jX'_{2\sigma}) / [(\frac{R'_2}{s})^2 + (X'_{2\sigma})^2] + (R_m - jX_m) / (R_m^2 + X_m^2)}
 \end{aligned} \quad (6)$$

当电动机处于额定转速运行、s接近于0时, $(\frac{R'_2}{s})^2 \gg (X'_{2\sigma})^2$, 上式可进一步简化为

$$Z \approx \frac{1}{(\frac{R'_2}{s} - jX'_{2\sigma}) / (\frac{R'_2}{s})^2 + a + jb} \quad (7)$$

式中, $a = R_m / (R_m^2 + X_m^2) = 1$; $b = -X_m / (R_m^2 + X_m^2)$; 且 $|a| = |b|$ 。

当电动机处于额定转速运行、s接近于0时, 忽略 s^2 项, 式(7)可进一步简化为

$$Z \approx \frac{1}{\frac{s}{R'_2} + a + jb} = \frac{\frac{s}{R'_2} + a - jb}{(\frac{s}{R'_2} + a)^2 - b^2} \quad (8)$$

当电动机处于额定转速运行、s接近于0时, 忽略 s^2 、 as 项, 式(8)可进一步简化为

$$Z \approx \frac{\frac{s}{R'_2} + a - jb}{a^2 - b^2} \quad (9)$$

由式(9)可知, 电动机功率因数为

$$\cos \varphi \approx \frac{\frac{s}{R'_2} + a}{\sqrt{(\frac{s}{R'_2} + a)^2 + b^2}} \quad (10)$$

当电动机处于额定转速运行、s接近于0时, 忽略 s^2 、 as 项, 式(10)可简化为

$$\cos \varphi \approx \frac{\frac{s}{R'_2} + a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (11)$$

由于 $|a| = |b|$, 故忽略 $\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}$ 项, 即

$$\cos \varphi \approx \frac{s}{R'_2 \sqrt{a^2 + b^2}} \quad (12)$$

3. 功率因数与电压和负载转矩的关系

将式(4)代入式(12), 可以得到

$$\cos \varphi \approx \frac{c^2 \Omega_s T_s}{m_1 U_1^2 \sqrt{a^2 + b^2}} \quad (13)$$

由式(13)可以看出, 当电动机处于额定转速运行、s接近于0时, 电动机功率因数近似与负载转矩 T_s 成正比, 与电动机端电压 U_1^2 成反比。当 U_1^2 稳定时, $\cos \varphi$ 的变化直接反映了负载的变化。

因此可以将 φ 作为反馈量, 当 φ 变大时, $\cos \varphi$ 变小, 反映出负载变轻, 此时可通过调节晶闸管三相交流调压电路触发角降低 U_1^2 , 使 $\cos \varphi$ 变大, 从而达到改善功率因数的目的。

调压方法

由参考文献[2]可知, 晶闸管三相交流调压电路输出电压与触发角和功率因数角的关系为

$$U_1 = U_0 \sqrt{\frac{2(\varphi + \pi - \alpha) + \sin(2\alpha) - \sin(2\varphi)}{2\pi}} \quad (14)$$

式中, α 为以电压过零点为起点的触发角; φ 为功率因数角。

式(14)化简后可得

$$U_1^2 = U_0^2 \frac{(\varphi + \pi - \alpha) + \sin(\alpha + \varphi) \sin(\alpha - \varphi)}{\pi} \quad (15)$$

忽略 $\sin(\alpha + \varphi) \sin(\alpha - \varphi)$, 可得

$$U_1^2 = U_0^2 \frac{(\varphi + \pi - \alpha)}{\pi} = U_0^2 \frac{\pi - (\alpha - \varphi)}{\pi} \quad (16)$$

由式(16)可知, U_1^2 与 $(\alpha - \varphi)$ 成线性关系。 α 为以电压过零点为起点的触发角; φ 为功率因数角, 即电流过零点与电压过零点的角度差。因此 $(\alpha - \varphi)$ 为以电流过零点为起点的触发角, 设 $\alpha' = (\alpha - \varphi)$, 故有

$$U_1^2 = U_0^2 \frac{\pi - \alpha'}{\pi} \quad (17)$$

将式(17)代入式(13), 可得

$$\cos \varphi \approx \frac{\pi c^2 \Omega_s T_s}{m_1 U_0^2 (\pi - \alpha') \sqrt{a^2 + b^2}} = \eta \frac{T_s}{(\pi - \alpha')} \quad (18)$$

式中, $\eta = \frac{\pi c^2 \Omega_s}{m_1 U_0^2 \sqrt{a^2 + b^2}}$, 对于固定电动机来说是常数。

考虑时间变量, 式(18)可进一步转换为

$$[\pi - \alpha'(t)] \cos[\varphi(t)] = \eta T_s(t) \quad 0^\circ \leq \varphi(t) \leq 90^\circ \quad (19)$$

由参考文献[3-4]可知, 对于游梁式抽油机来说, 负载转矩 $T_s(t)$ 是周期性变化的。因此, 当 $\alpha'(t)$ 为常数时, $\cos[\varphi(t)]$ 也是周期性变化的, 与 $T_s(t)$ 的周期一致, 变化方向相同; $\varphi(t)$ 也是周期性变化的, 与 $T_s(t)$ 的周期一致, 变化方向相反。

为达到改善功率因数的目的, 将 $\varphi(t)$ 作为反馈量, 当 $\varphi(t)$ 变大时, $\cos \varphi$ 变小, 反映出负载变轻, 此时通过增大触发角 $\alpha'(t)$, 使 $\pi - \alpha'(t)$ 减小, 可以使 $\cos \varphi$ 变大, 从而达到改善功率因数的目的。这样做的前提条件是 $\varphi(t)$ 的周期性不被破坏, 只有这样, $\varphi(t)$ 的大小才能真实反映负载的变化。

考虑如下的简单关系, 即

$$\alpha'(t) = \lambda \varphi(t) + \xi \quad (20)$$

将式(20)代入式(19), 可得

$$[\pi - \alpha'(t)] \cos[\varphi(t)] = [\pi - \lambda \varphi(t) - \xi] \cos[\varphi(t)] \quad (21)$$

假设 $\varphi(t)$ 的周期为 T , 则 $\cos[\varphi(t)]$ 的周期为 T , $[\pi - \lambda \varphi(t) - \xi]$ 的周期为 T , 故 $[\pi - \lambda \varphi(t) - \xi] \cos[\varphi(t)]$ 的周期也为 T 。因此按照式(20)调节 $\alpha'(t)$, 不改变 $\varphi(t)$ 的周期性, 同时可以通过改变 λ 和 ξ 的大小, 达到调整 $\alpha'(t)$ 和改善功率因数的目的。

自学习方式的参数确定

如式(20)所述方法进行触发角控制不同于以往的经典PID算法, 需要确定的参数只有两个, 分别是 λ 和 ξ , 而这两个参数可以通过自学习的方式加以确定。

当触发角 $\alpha'(t) = 0$, 即不进行调压操作时, 可以测得系统的最大及最小功率因数角分别记为 $\varphi_{\max}$ 和 $\varphi_{\min}$ 。

假设要将功率因数角减小10%, 则可等效为将功率因数角的最大值和最小值减小10%。由于负载转矩的大小与触发角及功率因数角无关, 根据式(21)可得

$$\left. \begin{aligned} (\pi - 0.9\lambda\varphi_{\max} - \xi) \cos(0.9\varphi_{\max}) &= \pi \cos(\varphi_{\max}) \\ (\pi - 0.9\lambda\varphi_{\min} - \xi) \cos(0.9\varphi_{\min}) &= \pi \cos(\varphi_{\min}) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

解式(22)的方程组, 可通过计算得到 λ 和 ξ 的大小, 再利用 $\alpha'(t) = \lambda \varphi(t) + \xi$ 进行调压, 即可实现改善功率因数的目的。

由上述可知, 本文所述的功率因数调节算法, 仅需给出功率因数角的改善比例或功率因数的改善比例, 即可实现自动计算算法参数, 自动跟踪功率因数角的变化进行触发角调节, 以提高功率因数。

试验

试验硬件系统采用ABB公司QA100L4B三相异步电动机(星形接法), 模拟游梁式抽油机系统, 负载为重100 kg的铁块, 如图2所示。触发电路采用晶闸管三相交流调压主电路^[5], 触发角以电流过零点为起点, 采用所述算法, 设定功率因数角减小比例为30%。



图2 试验平台

图3为功率因数调压前后变化曲线。图3中, 纵坐标为功率因数, 横坐标为采样点序号, 采样周期为10 ms, 调压后为算法执行阶段。从图3中可以看出, 调压后功率因数仍保持了准周期性, 且调压后与调压前相比, 功率因数有了明显的提高。上述结果说明, 本文所述方法有效。

需要说明的是, 本文所述方法是在当电动机处于额定转速运行、 s 接近于0时推导出来的。由于调压过程中, 电动机转速会发生变化, 因此该算法也有相应的调压范围。目前, 经过试验验证,

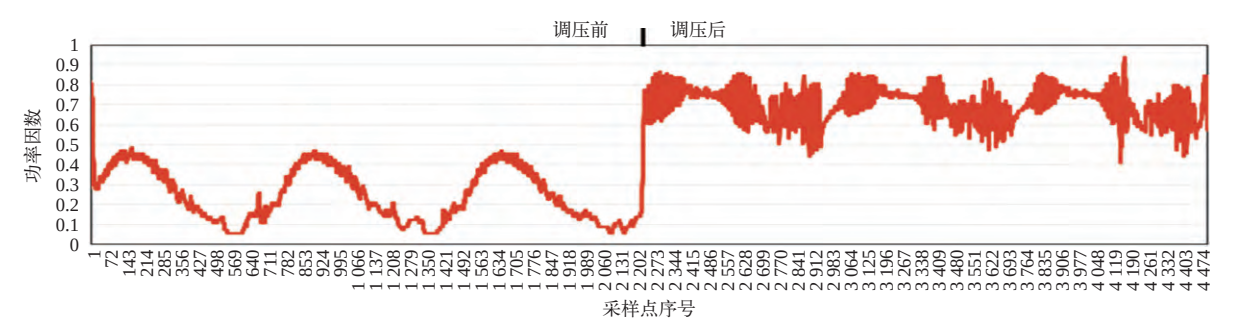


图3 功率因数调压前后变化曲线

在电动机不发生振动的前提下，两相间调压范围为190～380 V。

表1为经过Tektronix公司PA4000功率分析仪测量的上述试验系统在满压、某著名品牌晶闸管型节电器调压和试验功率因数调节器调压3种情况下的能耗和平均功率因数结果。和满压（即不调压）情况相比，本文所述的功率因数调节器将试验系统能耗降低了34%，平均功率因数提高了14.8%；与某著名品牌晶闸管型节电器相比，能耗下降了8.7%，平均功率因数提高了10%。上述结果表明，所提出的方法切实可行。

表1 试验平台功率因数调节结果对比

负载运行2 min	满压	某著名品牌 晶闸管型节电器	试验功率因数 调节器
WHR/W·h	4	2.89	2.64
PAV（平均功率因数）	0.189	0.197	0.217

此外，针对两款不同型号的游梁式抽油机，进行了功率因数调节试验，安装此功率因数调节器前后相关参数的测试结果如表2所示。由表2可知，安装此功率因数调节器后，平均功率因数提高超过5%，平均功率下降超过20%，达到了改善功率因数、降低能耗的效果。

表2 不同类型游梁式抽油机试验结果对比

抽油机型号	状态	平均有功功率/kW	平均无功功率/kW	平均功率因数	平均电流/A	平均电压/V
CYJ3-1.5-9HB	安装前	4.55	12.33	0.346	31.01	361
	安装后	3.35	8.55	0.365	26.97	302
	变化率 (%)	-26	-31	5.4	13	16
CYJ8-2.5-26HB	安装前	8.11	12.55	0.543	29.2	381
	安装后	6.51	9.34	0.572	25.1	310
	变化率 (%)	-20	-26	5.4	14	19

结束语

针对不同的负载情况，提高三相异步电动机的平均功率因数，降低能耗的方法多种多样。针对游梁式抽油机系统，分析了功率因数调节的原理与调压方法，并经过试验验证了算法的可行性，具有非常好的节能效果和功率因数调节效果。

参考文献

[1] 汤蕴璆，史乃．电机学[M]．北京：机械工业出版社，2005．
[2] 童军，张臻，郭昌永．电动机软启动功率因数角

闭环控制技术研究[J]．电机与控制学报，2013，16(12)：51-56．
[3] 黄安怡，李海亮．游梁式抽油机工作系统计算机仿真分析[J]．西南石油大学学报：自然科学版，2010，32(3)：167-171．
[4] 魏延富，陈祥光，张敏．游梁式抽油机运行过程优化控制扭矩测试分析[J]．石油机械，2013，41(4)：59-62．
[5] 周国顺，张阳，申华．基于STM32的晶闸管三相交流调压电路的设计[J]．电子设计工程，2013，21(13)：173-177．

(收稿日期：2014-12-11) EA