

油田抽油机用感应电动机调压节能控制策略的研究

朱常青¹ 王秀和¹ 申宁¹ 张鑫¹ 张承慧²

摘要 针对油田抽油机负载变化频繁, 其对应的配套感应电动机经常处于轻载状态, 效率低, 电能浪费大的特点, 分析了电机的效率与负载大小的关系, 探讨了调压节能的可行性, 推导了最佳调压系数与负载及电机参数间的数值关系, 提出了调压节能策略. 该方法为抽油机用三相感应电动机提高效率, 降低用电成本提供了理论依据. 实验结果证明该方法是正确有效的.

关键词 节能, 感应电动机, 油田, 调压

中图分类号 TP202

Variable-voltage Energy Saving Strategy for Three-phase Induction Motor in Oil Pumpjacks

ZHU Chang-Qing¹ WANG Xiu-He¹ SHEN Ning¹ ZHANG Xin¹ ZHANG Cheng-Hui²

Abstract As the loads of oil pump in oil field are changing frequently, a three-phase induction motor that drives the loads often operates under light-load conditions. As a result, the efficiency of the system is low and electric energy is wasted greatly. This paper discusses the possibility of adjusting voltage for the purpose of energy saving, deduces the optimal variable-voltage coefficient and gives a variable-voltage energy saving strategy for the induction motor. The strategy lays a theoretical foundation for efficiency improvement and cost reducing of induction motor in operation. The correctness of the method has been proved by experimental results.

Key words Energy saving, induction motor, oil field, variable-voltage

1 引言

目前油田抽油机的配套电机主要是三相感应电动机. 抽油机对电动机的要求是大起动转矩、高效率 and 宽广的经济运行范围. 为满足起动转矩的要求, 需采用大容量的感应电动机, 而抽油机正常工作时负载较小 (一般为额定功率的 30% 左右), 效率、功率因数很低, 造成电能的浪费^[1]. 随着油田对节能工作的重视, 永磁同步电动机逐渐在油田推广使用, 然而永磁同步电动机仍存在轻载时效率和功率因数不高的问题, 且价格高、性能不稳定、易退磁, 在油田的应用并不理想, 目前尚未有完全满足抽油机的要求、工作可靠、价格合理的永磁同步电动机可供使用, 因此, 三相感应电动机仍占据该领域的主导地位.

众所周知, 三相感应电动机常用的节电措施有调速节能和调压节能两种方式^[2]. 前者主要针对变频器的电动机的节能运行, 有多种实现途径^[3, 4].

而后者针对普通的感应电动机, 通过降低电压, 提高负载率, 达到提高效率和功率因数的目的^[5]. 油田由于工作环境特殊, 当前仍基本使用普通的感应电动机, 因此其调压节能运行方式的研究对其提高效率, 降低成本具有非常现实的意义. 本文根据异步电动机等效电路和能量守恒关系^[6, 7], 推导了调压节能的可行性条件, 量化了“轻载”的概念, 得到了最佳调压系数与负载系数及电机参数间的关系, 为电机的调压节能控制器的实现提供了理论依据. 试验结果和计算结果吻合较好, 证明本文给出的结论是正确有效的.

2 “轻载调压节能”可行性分析

根据电机的效率定义及异步电动机的等效电路, 得到电机效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + p_{Fe} + p_{Cu} + p_{mec} + p_{ad}} \quad (1)$$

其中 P_2 为输出功率, P_1 为输入功率, p_{Fe} 为铁耗, p_{Cu} 为铜耗, p_{mec} 为机械损耗, p_{ad} 为附加损耗.

满载运行时, 满足: $I_{1N}^2 = I_m^2 + I_{2N}^2$, 其中 I_m 为额定电压时的励磁电流, I_{1N} 和 I_{2N} 分别为定子电流和定子电流的有功分量. 此时电机总损耗为

$$\begin{aligned} \sum p_1 &= p_{Fe} + p_{Cu} + p_{mec} + p_{ad} = 3I_m^2 r_m + 3I_{1N}^2 r_1 \\ &+ 3I_{2N}^2 r_2 + p_{mec} + p_{ad} = p_0 + p_k \end{aligned}$$

收稿日期 2005-10-24 收修改稿日期 2006-3-6
Received October 24, 2005; in revised form March 6, 2006
国家自然科学基金 (50477042), 山东省自然科学基金资助项目 (Y2004F09) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (50477042), Natural Science Foundation of Shandong Province (Y2004F09)
1. 山东大学电气工程学院 济南 250061 2. 山东大学控制科学与工程学院 济南 250061
1. School of Electrical, Shandong University, Jinan 250061 2. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061
DOI: 10.1360/aas-007-0749

式中 $p_0 = 3I_m^2(r_m + r_1) + p_{mec} + p_{ad}$ 称为额定电压时的空载损耗, 而 $p_k = 3I_{2N}^2(r_1 + r_2)$ 为额定电流时的短路损耗. 则电机的额定效率可表示为

$$\eta_N = \frac{P_{2N}}{P_{2N} + \sum p_1} = \frac{P_N}{P_N + p_0 + p_k} \quad (2)$$

当电动机工作在额定电压、输出功率不是额定输出功率时, 输出功率 $P_2 = \beta P_N$, 其中 β 为负载系数, 则定子电流有功分量近似为 $I_2 = \beta I_{2N}$, 定子电流 $I_1 = \sqrt{I_m^2 + \beta^2 I_{2N}^2}$, 此时电机总损耗为 $\sum p_2 = p_0 + \beta^2 p_k$. 则电机的效率变为

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P_2 + \sum p_2} = \frac{\beta P_N}{\beta P_N + p_0 + \beta^2 p_k} = \frac{P_N}{P_N + \frac{1}{\beta} p_0 + \beta p_k} \quad (3)$$

比较式 (2) 和 (3) 可知, 若要使 $\eta_1 \geq \eta_N$, 必须满足

$$\frac{1}{\beta} p_0 + \beta p_k \leq p_k + p_0$$

即

$$\beta \geq \frac{p_0}{p_k} \quad (4)$$

为求得最大效率, 对式 (3) 进行求导并令其为零, 即 $\frac{d\eta_1}{d\beta} = 0$ 得

$$\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_k}} \quad (5)$$

则最大效率为

$$\eta_{max} = \frac{P_N}{P_N + 2\sqrt{p_0 p_k}} \quad (6)$$

上述研究表明: 当负载系数 β 在 $(p_0/p_k, 1)$ 范围内时, 电动机的效率都在额定效率以上, 且在 $\beta = \sqrt{\frac{p_0}{p_k}}$ 处具有最大效率.

为验证上述结论的正确性, 本文对一台抽油机用三相感应电动机进行了试验验证, 该电机的额定功率为 $P_N = 22 \text{ kW}$, $p_0 = 746 \text{ W}$, $p_k = 1.45 \text{ kW}$, 试验值和理论计算值的对比如图 1 所示.

从图 1 可以看出, 无论是计算曲线还是实际曲线, 在 $(p_0/p_k = 0.513, 1)$ 范围内效率都在额定效率之上, 因此 $\beta \geq \frac{p_0}{p_k}$ 时不需要调压. 式 (4) 可作为电机“轻载调压”的可行性判断条件, 即

1) 若 $\beta \geq \frac{p_0}{p_k}$, 则电机效率 $\eta \geq \eta_N$, 不需要进行调压节能.

2) 若 $\beta < \frac{p_0}{p_k}$, 则电机工作在“轻载”状态, 效率较低, 可进行调压节能, 提高效率.

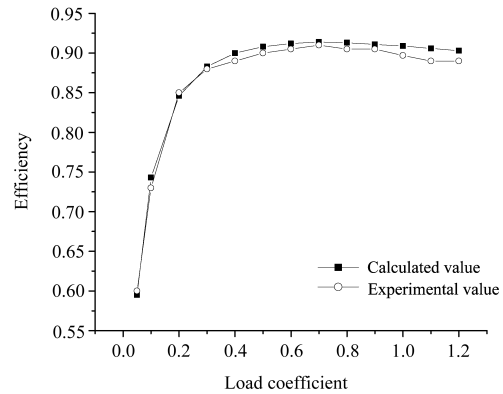


图 1 额定电压时的效率与负载系数关系曲线

Fig. 1 Relation between efficiency and load at rated voltage

3 三相感应电动机最佳调压系数的确定

令 $U_1 = \alpha U_{1N}$, $P_2 = \beta P_N$ ($\beta < \frac{p_0}{p_k}$), 其中 α 称为调压系数, $\alpha < 1$, 则励磁电流变为 $I_{m,\alpha} = \alpha I_m$, 定子电流有功分量近似为 $I_{2,\alpha} = \frac{1}{\alpha} I_2 = \frac{\beta}{\alpha} I_{2N}$, 定子电流为 $I_1 = \sqrt{\alpha^2 I_m^2 + \frac{\beta^2}{\alpha^2} I_{2N}^2}$, 则电机的总损耗为

$$\sum p_3 = 3I_{m,\alpha}^2 r_m + 3I_{1,\alpha}^2 r_1 + 3I_{2,\alpha}^2 r_2 + p_{mec} + p_{ad} = p_0 + \frac{\beta^2}{\alpha^2} p_k + 3(\alpha^2 - 1) I_m^2 (r_m + r_1) \quad (7)$$

令 $p_{0,\alpha} = 3I_m^2 (r_m + r_1)$, 则式 (7) 可改写为

$$\sum p_3 = p_0 + \frac{\beta^2}{\alpha^2} p_k - (1 - \alpha^2) p_{0,\alpha}$$

则电机效率为

$$\eta_\alpha(\beta) = \frac{\beta P_N}{\beta P_N + \sum p_3} \quad (8)$$

若调压后能节能, 必有 $\eta_\alpha \geq \eta_1$, 则 α 应满足

$$\beta \sqrt{k_p} < \alpha < 1 \quad (9)$$

其中 $k_p = \frac{p_k}{p_{0,\alpha}} = \frac{I_{2N}^2 (r_1 + r_2)}{I_m^2 (r_1 + r_m)}$. 式 (8) 对 α 求导数, 得到最高效率时的调压系数为

$$\alpha_m = \sqrt[4]{\beta^2 k_p} = \sqrt[4]{\beta I_{2N}^2 / I_m^2 \cdot \sqrt[4]{(r_1 + r_2) / (r_1 + r_m)}} \quad (10)$$

其中 α_m 称为最佳调压系数, $(r_1 + r_2), (r_1 + r_m)$ 可通过短路和空载实验利用等效电路求出, 而 I_{2N}, I_m 为额定状态时的转子电流和励磁电流, 也可通过等效电路求出. 此时的电机损耗为

$$\sum p_{3,min} = p_{mec} + p_{ad} + 2\beta\sqrt{p_{0,\alpha}p_k}$$

从而得到调压后的最高效率为

$$\eta_{\alpha,max}(\beta) = \frac{\beta P_N}{\beta P_N + \sum p_{3,min}} = \frac{P_N}{P_N + 2\sqrt{p_{0,\alpha}p_k} + (p_0 - p_{0,\alpha})/\beta} \quad (11)$$

为了验证上述公式的正确性, 用前面的油田抽油机用异步电动机进行调压节能实验, 调压装置使用的是调压器, 得到不同负载下的最佳电压及相应的最大效率, 分别如图 2 和图 3 所示. 可以看出, 计算值与实际数据非常接近.

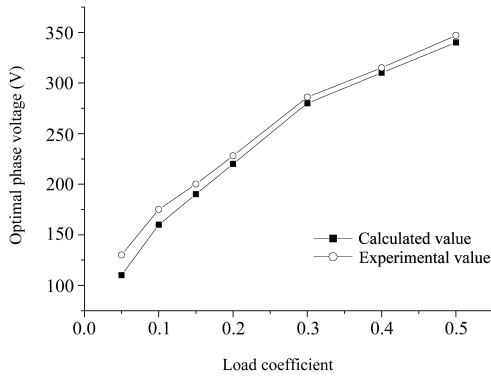


图 2 定子最佳调压值与负载的关系曲线

Fig. 2 Relation between optimal voltage and load

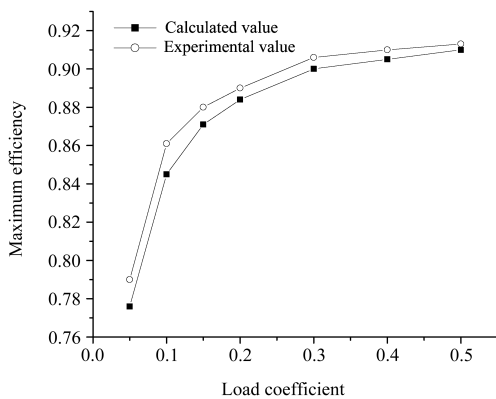


图 3 调压后最大效率与负载的关系曲线

Fig. 3 Relation between maximum efficiency and load

4 调压过程中定子电流的变化

根据前面的分析可知, 在调压之前, 定子电流为

$$I_1 = \sqrt{I_m^2 + \beta^2 I_{2N}^2}$$

而调压后, 定子电流变为

$$I_{1,\alpha} = \sqrt{\alpha^2 I_m^2 + \frac{\beta^2}{\alpha^2} I_{2N}^2} \quad (12)$$

由上式得到:

1) 当 $\beta = 0$ 即空载时, $I_{1,\alpha} = \alpha I_m$, 即空载相电流随调压系数减小而减小.

2) 当 $\beta > 0$ 时, 式 (12) 对 α 求导并令其为零, 得

$$\alpha_i = \sqrt{\beta I_{2N} / I_m} \quad (13)$$

其中 α_i 称为最小电流调压系数, 即 $I_{1,\alpha}$ 在调压过程中存在最小值 α_i , 当 $\alpha > \alpha_i$ 时, 定子电流随 α 增大而增大, 当 $\alpha < \alpha_i$ 时, 定子电流随 α 减小而增大. 图 4 所示的实验结果很好地证明了这一点.

比较式 (10) 与 (13), 可知 $\alpha_i \approx \alpha_m$, 即在最佳电压附近定子电流也较小.

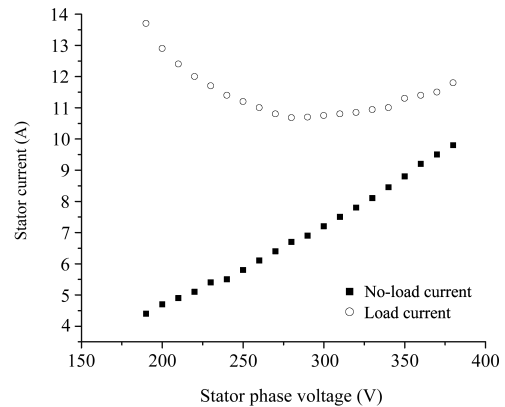


图 4 定子电流随定子相电压的变化曲线 ($P_2 = 6$ kW)

Fig. 4 Response curve of stator current to stator voltage ($P_2 = 6$ kW)

5 三相感应电动机调压节能策略

通过以上分析, 得到三相感应电动机调压节能的控制策略如下:

1) 从电机的效率方面考虑, 所谓的“轻载”是指负载系数 $\beta < \frac{p_0}{p_k}$, 这时可进行调压节能; 若 $\beta \geq \frac{p_0}{p_k}$, 则无调压的必要.

2) $\beta < \frac{p_0}{p_k}$ 时, 在最佳调压系数 $\alpha_m = \sqrt[4]{\beta^2 k_p}$ 处, 电机可获得最高效率.

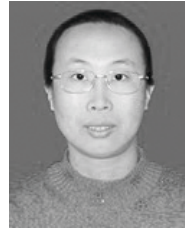
3) 在整个调压范围内, 定子电流随之变化, 在最佳电压附近定子电流也较小.

6 结论

本文对抽油用感应电动机提出一种基于等效电路参数的调压节能策略, 即对轻载电机定子电压并不是越小越好, 而是存在最佳值, 应随负载的变化, 按最佳电压进行调压节能, 能保证电机在各种负载条件下都能最大限度地提高效率, 获得较好的经济效益. 同时, 在整个调压范围内, 定子电流随之变化, 在最佳电压附近定子电流也较小, 这样可避免因电压过低引起的定子电流过大等不利现象. 试验结果与理论分析结果吻合很好, 验证了本调压策略的可行性和有效性, 为今后抽油机用感应电机调压控制器的研制提供了理论依据.

References

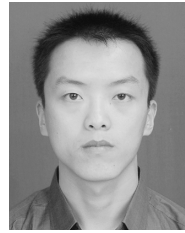
- 1 Jiang Xue-Jun, Chen Xiu-He, Di Min-Yan. Energy saving technology application in power driving and economy benefit evaluation. *Oil and Gas Field Surface Engineering*, 2003, **22**(2): 30~31
(蒋学军, 陈秀和, 狄敏燕. 电力拖动节能技术的应用及经济效益评价. 油气田地面工程, 2003, **22**(2): 30~31)
- 2 Sundareswaran K. An improved energy-saving scheme for capacitor-run induction motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, **48**(1): 238~240
- 3 Zhang Cheng-Hui, Li Ai-Wen, Zhang Qing-Fan. A novel loss minimization control strategy of an induction motor drive. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 1998, **13**(4): 25~38
(张承慧, 李爱文, 张庆范. 感应电动机新型最小损耗控制策略. 电工技术学报, 1998, **13**(4): 25~38)
- 4 Tsuchiya T, Egami T. Application of improved optimal regulator theory to optimal efficiency control of an electrical drive system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1985, **30**(8): 822~825
- 5 Dai Guang-Ping, Liu Xiao-Fang, Cui Xue-Shen, Shen Jin-Bo, Zhang Jian-Hua, Luo Ying-Li. The theory and method of synthetic energy saving for beam pumping unit. *China Petroleum Machinery*, 2004, **32**(2): 7~11
(戴广平, 刘晓芳, 崔学深, 沈金波, 张建华, 罗应立. 游梁式抽油机电动机综合节能的理论及途径. 石油机械, 2004, **32**(2): 7~11)
- 6 Huang H, Fuchs E F, White J C. Optimization of single-phase induction motor design: the maximum efficiency and minimum cost of an optimal design. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1988, **3**(2): 357~366
- 7 Tang Yun-Qiu, Shi Ke, Shen Wen-Bao. *Electrical Machines' Theory and Operation*. Beijing: China Water Power Press, 1983. 301~314
(汤蕴璆, 史可, 沈文豹. 电机理论与运行. 北京: 水利电力出版社, 1983. 301~314)



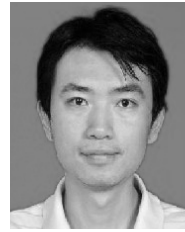
朱常青 山东大学博士研究生. 主要研究方向为电机智能控制和弱磁调速. 本文通信作者. E-mail: zhucq@sdu.edu.cn
(**ZHU Chang-Qing** Ph.D. candidate at Shandong University. Her research interest covers intelligent control to electrical machines and adjusting speed by flux weakening. Corresponding author of this paper.)



王秀和 山东大学教授, 主要研究方向为特种电机控制及专家系统. E-mail: wangxh@sdu.edu.cn
(**WANG Xiu-He** Professor at Shandong University. His research interest covers control of special electrical machines and experts system.)



申宁 山东大学硕士研究生, 主要研究方向为新型电机开发与设计. E-mail: fire@mail.sdu.edu.cn
(**SHEN Ning** Master student at Shandong University. His research interest is design method of novel electrical machines.)



张鑫 山东大学硕士研究生, 主要研究方向为新型电机开发与设计. E-mail: skiry@126.com
(**ZHANG Xin** Master student at Shandong University. His research interest is design method of novel electrical machines.)



张承慧 山东大学教授, 主要研究方向为工程优化控制、自适应控制、电气传动自动化及电力电子技术. E-mail: zchui@sdu.edu.cn
(**ZHANG Cheng-Hui** Professor at Shandong University. His interest covers engineering optimization control, adaptive control, power electronic and motion control.)