

晶闸管控制异步电动机 节电技术的研究*

史玉法

(郑州工学院计算机与自动化系)

摘 要: 本文分析了异步电动机运行时的有功损耗、功率因数与入端电压的关系, 阐明了异步电动机降压运行节电的机理, 并导出晶闸管控制异步电动机节电的使用条件在特定延迟角触发下控制其应用的条件。

关键词: 负载率, 有功损耗, 功率因数, 延迟角

中图分类号: TM33

异步电动机在我国工农业生产中是使用最多的电动机, 仅它的用电量就占全国总用电量的三分之二以上。因此, 重视异步电动机节能的意义重大。异步电动机的节能, 主要有两个方面, 一是改进异步电动机的结构, 提高材料的利用率, 改善其性能; 二是合理地选择异步电动机及重视使用节电控制系统。对于用户来说, 在选好合适的异步电动机外, 重要的是正确使用节电控制系统。这种系统不仅可以节约电能, 使电动机有良好的运行条件, 同时还可以有效地保护电动机, 延长使用寿命。目前, 使用的节能控制器主要是晶闸管控制系统, 它可以根据异步电动机运行情况的需求, 自动调整入端电压及电流的大小, 既满足异步电动机在空载、轻载及额定负载下正常运行, 又达到空载、轻载时异步电动机消耗的最低能量, 从而节约了电能。然而并不是晶闸管控制异步电动机在任何工况下都能达到节约电能的目的, 它是有条件的, 应具备什么样的条件, 就此问题探讨分析如下。

1 异步电动机中有功损耗与入端电压电流关系。

异步电动机在运行中有五部分有功损耗: ①定子中铜耗 P_s (指绕组中内阻损耗); ②转子中铜耗 P_r (指转子绕组中电阻损耗); ③铁耗 P_i (指磁滞损耗, 涡流损耗); ④机械损耗 P_m (指机械摩擦、风阻等损耗); ⑤杂散损耗 P_{sc} (指磁路中局部饱和及载流导体周围, 齿部表面损耗等), 这五个部分称之为异步电动机的有功损耗。即使电动机的结构设计十分合理, 有功损耗也是不可避免的, 且与电动机的负载率、入端电压电流相关。

* 收稿日期: 1992-03-03

1.1 电动机在空载及轻载工况下, 若降低入端电压, 且电压电流仍为正弦波。由于铁损 P_i 与入端电压的平方成正比, 故铁损及励磁电流 I_o 都趋减少。然而入端电压的降低却又导致电动机铁芯气隙磁通的下降, 由电磁转矩公式

$$T = K_m I_2 \phi \cos \varphi_2$$

式中 K_m 为转矩系数; I_2 为转子电流; ϕ 为气隙磁通; $\cos \varphi_2$ 为转子电路功率因数。可以看出, 当要求 T 不变时, ϕ 的下降, 势必导致 I_2 增大, 引起定子中电流 I_1 的增加。因而转子和定子中的铜耗必将增大。综合上述, 电动机中总有功损耗比额定值是减小或是增大了呢? 它将取决于励磁电流 I_o 的减小量与转子电流 I_2 的增加量之间的数量关系。

然而, 电动机在空载和轻载工况下, I_2 相对较小, 而降压引起 I_2 的变化量 ΔI_2 也相对的小。这样即有可能出现两者变化的结果使 I_1 减小。况且杂散损耗中一部分是与定子绕组感应甄势成正比, 另一部分与 I_1 的平方成正比, 这样降压后杂散损耗将比额定值有所减少。如果考虑到电动机受控后电压和电流的波形是含有多次谐波的非正弦波, 电动机运行时有功损耗, 特别是定子损耗、转子损耗和铁损都将比正弦波电压电流运行时有所增大。尽管如此, 只要使电动机在空载或轻载下运行, 适当降低入端电压电流, 电动机中有功损耗势必减少。

1.2 电动机重载工况下。所谓重载是相对轻载而言, 一般认为电动机所带负载是额定负载的 75% 以上至额定负载, 即为重载。这种情况下, 降低入端电压电动机运行时的有功损耗将如何呢? 现以实例分析说明: 有一台 Y-280S-4 型, 75KW 异步电动机, 其设计指标: 额定线电压 $V_e = 380V$; 线电流 $I_e = 139.7A$; 励磁电流 $I_o = 27A$; 效率 $\eta = 0.927$; 功率因数 $\cos \varphi = 0.88$; 额定转速 $n_e = 1480$ 转/分; 额定电压下各种有功损耗:

$$\text{定子中铜耗 } P_s = 2.067KW$$

$$\text{转子中铜耗 } P_r = 1.081KW$$

$$\text{铁耗 } P_i = 1.463KW$$

$$\text{机械损耗 } P_m = 0.373KW$$

$$\text{杂散损耗 } P_{st} = 0.491KW$$

$$\text{总有功损耗 } P_d = P_s + P_r + P_i + P_m + P_{st} = 5.475KW$$

若入端电压下降到额定电压 V_e 的 90% 时, 即 342V, 计算出各部分有功损耗为:

$$P'_s = P_s \left\{ \left(\frac{I'_o}{I_o} \right)^2 + \left[1 - \left(\frac{I'_o}{I_o} \right)^2 \right] \left[\frac{(1 - S_e)S'}{(1 - S')S_e} \right]^2 \right\} = 3.086KW$$

式中 P'_s 为降压后定子铜耗; S_e 为电动机额定转差率; $S' = S_e \left(\frac{V_e}{V} \right)^2$ 式中 V 为降压

值; $I'_e = \frac{I_e V}{V_e}$; $I'_o = I_o (0.18 + 0.16V/V_e) / (1 - 0.66V/V_e)$ 。

$$P'_r = P_r \left(\frac{V_e}{V} \right)^2 \left(\frac{1 - S_e}{1 - S'} \right)^2 = 1.343KW$$

$$P'_i = P_i \left(\frac{V}{V_e} \right)^2 = 1.185KW$$

$$P'_m = P_m \left(\frac{1-S'}{1-S_e} \right)^2 = 0.372 \text{ KW}$$

$$P'_{st} = P_{st} \left(\frac{V_e}{V} \right)^2 \left(\frac{1-S_e}{1-S'} \right)^2 = 0.61 \text{ KW}$$

降压后总有功损耗为:

$$P'_d = P'_s + P'_r + P'_i + P'_m + P'_{st} = 6.59 \text{ KW}$$

由此得出额定入端电压下降了 10%，电动机的有功损耗将上升 20.5%。同理，若入端电压下降到额定值的 85% 时，总有功损耗为 7.4696 KW，即额定电压下降了 15%，有功损耗将上升 36.4%。

由此可见，电动机在重载下降压运行，将使有功损耗大幅度上升，不但不能节能，反而导致电动机严重发热，这是绝不允许的。

由以上二种情况分析可得出这样的结论：异步电动机运行中的有功损耗与输入电压的关系取决于电动机所带负载的大小，轻载下（一般认为负载率在 30% 以下）并满足下式：

$$\frac{V}{V_e} = \frac{T}{T_e} + 0.2 \text{ 且 } \frac{T}{T_e} < 0.8 \quad \text{式中 } T_e \text{ 为电动机的额定转矩；} T \text{ 为降压后电动机实际}$$

转矩。降压可使有功损耗减小。当然，是以降低电动机的电磁转矩为代价换来的，这就是电动机降压运行节电的实质。

2 电动机的功率因数与入端电压的关系

电动机对电源来说是一个感性负载，异步电动机在额定电压、额定负载下的功率因数一般为 0.7—0.9，空载时为 0.2—0.3。图 1 所示为不同负载率下，功率因数的标么值 $\cos \varphi^*$ （即 $\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_e}$ ）随输入电压的标么值 V^* （即 $\frac{V}{V_e}$ ）变化的情况。

变化的情况。

从图 1 中可以看出，输入电压超过额定电压时即 U^* 大于 1， $\cos \varphi^*$ 严重下降。这是因为实际电压超过额定电压时，铁芯中磁通趋于饱和而引起激磁电流的增加，使无功分量增大， $\cos \varphi$ 严重下降。

而入端电压过低时，也会造成 $\cos \varphi$ 的下

降。因负载一定时，电源电压愈低，转差率愈高，电动机的负载等效电阻愈小，励磁电流要减小，但是转子电路中功率因数却同时下降。整体看来总的功率因数趋于下降。

只有在 U^* 的中间段，随电压的下降，功率因数相对的提高，且负载率愈低， $\cos \varphi$

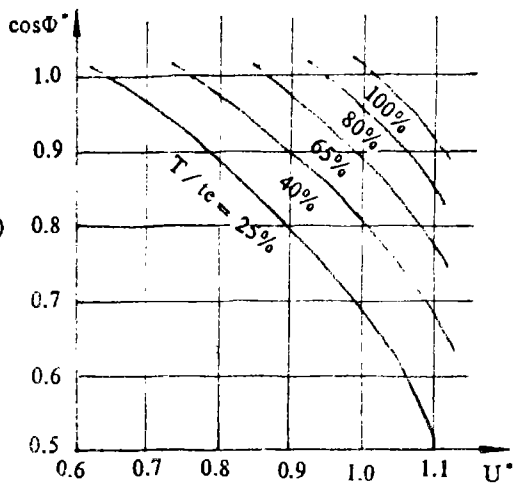


图 1

上升的斜率愈大, 无功分量愈少。说明了异步电动机适当降低电压, 可以提高功率因数, 节约电能。

3 晶闸管的延迟角 α 与功率因数角 φ 的关系

晶闸管控制单相电源调压控流的电压电流波形如图2所示。由图2分析, 晶闸管控制异步电动机要达到节约电能之目的, 从理论上讲, 电动机运行到 $(\pi - \varphi)$ 间隔内, 电机应该从电源中吸收功率。运行到 φ 间隔内, 电机应该向电网馈送功率。晶闸管应该在电动机向电网馈送功率期间被关断, 在电机吸收功率时被导通。晶闸管控制系统以一定方式检测出 φ 的大小, 经信号转换去控制触发电路, 以实现上述过程, 而达到节电的目的。然而, 实际上晶闸管的延迟角 α 并不能等于功率因数角 φ , 所以使问题复杂化。

由于晶闸管控制的对象是电动机, 为感性负载, 可根据克希荷夫电压定律列出一个常系数非齐次一元一次线性微分方程:

$$R_i + L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} V_n \sin(\omega t + \alpha)$$

式中 R 为电机一相绕组的内电阻; i 为一相输入电流; V_n 为一相的额定电压;

应用数学中经典法可求其解为:

$$i = \sqrt{2} \frac{V_n}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}]$$

式中 Z 为一相绕组的复阻抗; τ 为时间常数, 且 $\tau = tg\varphi / \omega$, $tg\varphi = \frac{\omega L}{R}$ 式中 L 为一相绕组的电感系数。

而负载电流 i 是由两部分分量组成, 即强制分量和暂态分量, 如图2所示。

$$\text{强制分量} \quad i_1 = \sqrt{2} \frac{V_n}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

$$\text{暂态分量} \quad i_2 = -\sqrt{2} \frac{V_n}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega}{tg\varphi} t}$$

从这两个电流分量式中可以看出, 分量值的大小皆与晶闸管的延迟角 α 和电动机的功率因数角 φ 有关, 下面分三种情况讨论它们之间的关系。

①若晶闸管在 $\alpha = \varphi$ 时被触发, 暂态分量 $i_2 = 0$, 负载电流即为:

$$i = i_1 = \sqrt{2} \frac{V_n}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

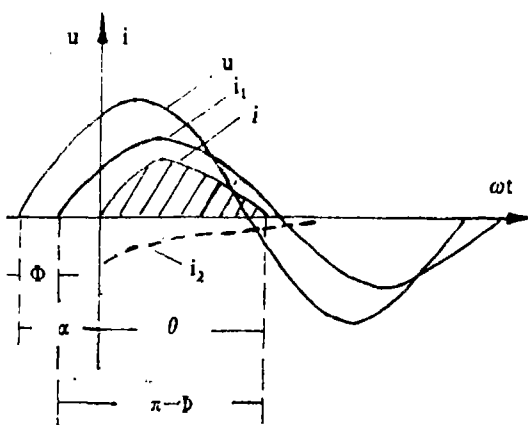


图2

从图 1 中可以看出, 这种情况下负载电流为连续的正弦波, 晶闸管的导通角 $\theta = 180^\circ$ 。因此晶闸管对电动机的输入电流失去了控制作用, 而且晶闸管控制的电压达到最大, 这种情况下消耗能量多, 没有节能的效果。

②若晶闸管在 $\alpha < \varphi$ 时被触发, 被控的电压电流波形如图 3 所示。负载电流 i 在正半周时, 晶闸管的导通角 θ 大于 π , 并且在 $(\pi + \alpha)$ 期间出现第二个触发脉冲时, 晶闸管尚处于导通状态。故第二个触发脉冲就无实际效果, 只有等到再次出现正半周和来脉冲时, 才能使晶闸管导通。这样重复上述过程, 使负载上得到的将是极不对称的电压、电流波形, 因而负载上出现极大的直流分量。如果电机绕组电感系数 L 远远大于其内阻 R 时 (实际 $L \gg R$), 还会出现最大电流近似为强制分量电流幅值的二倍值, 故此, 不允许在 $\alpha < \varphi$ 时触发晶闸管工作。

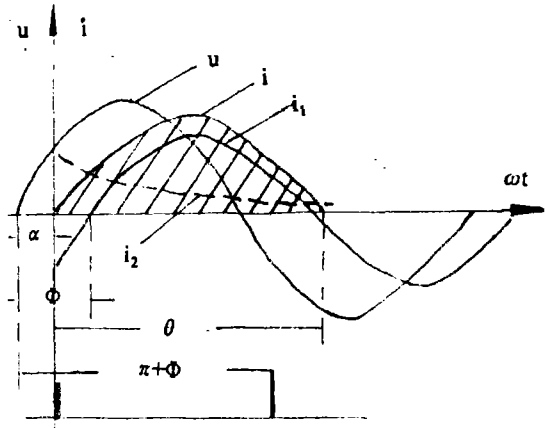


图 3

③若晶闸管在 $\alpha > \varphi$ 时被触发。

因 $i = I_1 + I_2$ 图 2 所示

且 当 $\omega t = \theta$ 时 负载电流将下降到零, 故有:

$$\sin(\theta + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{\theta}{\tau\omega}}$$

经运算得:

$$\lg \alpha = \frac{\sin(\theta - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{\theta}{\tau\omega}}}{\cos(\theta - \varphi) - \cos \varphi e^{-\frac{\theta}{\tau\omega}}}$$

此式即为 α 、 φ 、 θ 三角的关系式。

当 φ 为某一常数时, 即可求出不同角 θ 的导通角 θ 值。例如,

当 $\varphi = 45^\circ$ 时

若 $\alpha = 89.3^\circ$

则 $\theta = 130^\circ$

以此类推, 可画出如图 4 所示, $\varphi = 45^\circ$ 时的三角关系曲线图。因此, 无论功率因数角 φ 为何值时, 只要满足

$$\alpha > \varphi$$

就有导通角 $\theta < 180^\circ$

的结论。这样负载电流 i 的波形, 永为正负对称的间断波。由于上下正负对称, 合成后直流分量就等于零。因此, α 大于 φ 时触发晶闸管导通, 是晶闸管控制异步电动机正常运行节电的条件。

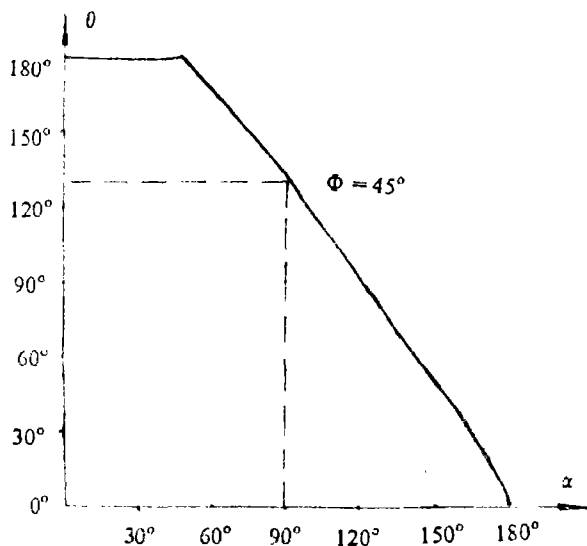


图 4

4 结束语

异步电动机晶闸管控制运行, 要达到节约电能的目的, 必须同时具备两方面的条件, 即电动机运行在空载和轻载工况下 (负载率在 30% 以下为轻载); 另一个方面晶闸管控制系统中, 晶闸管必须在大于 φ 时被触发。而不是任何降压都能达到节电之目的。

参 考 文 献

- (1) 袁昭锬编著. 电力甄子技术与节能. 1989年机械工业出版社.
- (2) 广东省兴宁电器厂. 电动机多功能节电器说明书. 1989年.
- (3) 邱关源编. 电路. 1982年. 人民教育出版社.
- (4) 王敏. 重载运行电动机的降损分析. 1989年. 电工技术第八期.
- (5) 罗肇伦. 异步电动机在运行中为什么会出现功率因数低的现象. 电工技术. 1990年5月

Studies on SCR-Controlled Electricity --saving Technique of Asynchronous Electric Motor

Shi Yufa

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: The article analyses the relations among active dissipation, power factor and input voltage of asynchronous electric motor in operation, explains the electricity-saving Principle of the operative asynchronous electric motor when its voltage is reduced, and works out its applied condition under SCR-controlled triggered by specific delay angle.

Keywords: Percentage of load, active dissipation, power factor, delay angle.