

异步电动机非额定运行机械功率变化规律的研究*

曹玉泉¹, 高 微¹, 颜伟中²

(1 大庆石油学院 自动控制系, 黑龙江 大庆 163318; 2 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

[摘 要] 对异步电动机非额定运行时的机械功率与额定功率的关系进行了研究, 得出了由额定转矩 T_N 和额定转差率 s_N 或电动机转速 n_N 计算异步电动机非额定运行机械功率的公式, 并提出了出现最大机械功率时, 实际转矩与额定转矩的比值。

[关键词] 异步电动机; 非额定运行; 机械功率

[中图分类号] TM 343

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)04-0093-04

异步电动机是工农业生产中应用极为广泛的电力拖动设备。图1是以 $T = C_t \frac{sR_2 U_1^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2}$ 画出的其固有机械特性曲线^[1], 即 $n = f(T)$ 或 $s = f(T)$ 曲线。异步电动机在额定状态下运行时, 将工作在特性曲线上的 Q_N 点, 此时其输出的机械功率 P_N 、输出机械转矩 T_N 和转子转速 n_N ^[2] 或额定转差率 s_N 之间满足下述关系

$$P_N = T_N \frac{2\pi n_N}{60} = T_N \frac{2\pi}{60} (1 - s_N) n_0 \quad (1)$$

式中, n_0 为电动机的同步转速(r/min)。对一台特定的电动机, n_0 , n_N (s_N), T_N 和 P_N 均已知。

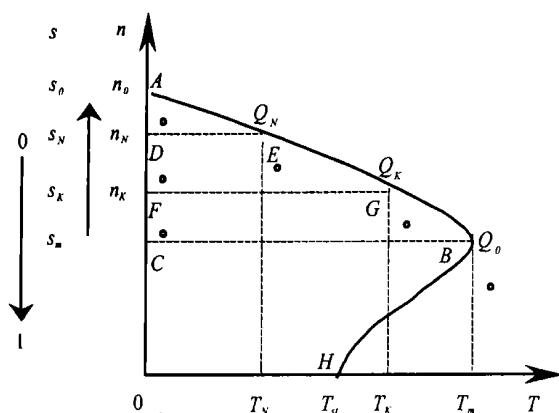


图1 异步电动机机械特性曲线

Fig. 1 Machine characteristic of asynchronous motor

在生产实践中, 为满足生产工艺的需要或由于电压、频率并非为额定值, 绝大多数的异步电动机都在偏离 Q_N 点的非额定状态下运行, 此时电动机轴上的机械功率 P_K 与轴的角速度 Ω 及机械转矩 T 之间的关系由下式确定^[3]

$$P_K = T \cdot \Omega = T \frac{2\pi n}{60} \quad (2)$$

电动机轻载时转矩减小, $T < T_N$, 由图1可知, 此时电动机转速升高, $n > n_N$; 当电动机过载时, $T > T_N$, 电动机转速 n 下降, $n < n_N$, 均难以由 T 与 n 的乘积直观确定 P_K 的变化趋势。尽管生产实践已经表明, 负载转矩改变时, 机械功率有相应的变化趋势, 但电机类教材和专著, 仍缺乏以电动机额定参数 T_N 和 n_N 或 s_N 为基础, 在非额定状态下运行时异步电动机机械功率的计算公式。为此, 本研究以电动机额定电气参数为依据, 分析得出了任一转速时, 计算电动机机械功率的普遍公式, 作为对现有计算公式(1)的补充和完善, 同时解决电动机与负载对轴联接时电动机机械功率无法直接测得的问题。

1 异步电动机非额定运行的机械功率

对图1所示的机械特性曲线, AB 段为稳定工作区。而曲线 HB 段, 因 $\frac{dT}{dn} > 0$, 是电动机不稳定运行区间, 仅与电动机起动过程有关, 不予研究。为简化计算常把 AB 段近似看成直线, 这对 $0 < s < s_m$ 时

* [收稿日期] 2003-03-28

[基金项目] 黑龙江省工业指导计划项目(96省工指62)

[作者简介] 曹玉泉(1945-), 男, 黑龙江泰来人, 教授, 主要从事电机拖动和电力电子技术研究。

的机械特性来说, 误差不算太大^[2]。因此可以认为, $\triangle ABC$ 为直角三角形, AB 段是其斜边。于是, 可认为电动机运行时, 机械转矩 $T_K = kT_N$ (k 为转矩改变系数, 无量纲, 且 $0 < k < \lambda$, λ 为电动机过载系数)。设电动机运行在图 1 曲线上非额定状态的 Q_K 点, 可知 $\triangle ADE$ 与 $\triangle AFG$ 是相似形, 故可得

$$\frac{AF}{AD} = \frac{FG}{DE}$$

由于边长 AF 等于转差率 s_K , AD 等于转差率 s_N , DE 等于转矩 T_N , FG 等于转矩 kT_N , 故得

$$\frac{s_K}{s_N} = \frac{kT_N}{T_N}$$

因此

$$s_K = ks_N \quad (3)$$

显然, k 也是转差率改变系数。非额定运行时, $T_K = kT_N$, $s_K = ks_N$, $n_K = (1 - ks_N) \cdot n_0$; 由式(2)可得, 非额定运行时电动机的机械功率 P_K 为

$$P_K = kT_N \frac{2\pi n_K}{60} = kT_N \frac{2\pi}{60} (1 - ks_N) n_0 \quad (4)$$

由于转矩改变系数 k 不如电动机转速 n_K 易于测量, 而由式(3)可知

$$k = \frac{s_K (n_0 - n_K) / n_0}{s_N (n_0 - n_N) / n_0} = \frac{n_0 - n_K}{n_0 - n_N}$$

把上式代入式(4)后可得

$$P_K = \frac{n_0 - n_K}{n_0 - n_N} n_K T_N \frac{2\pi}{60} \quad (5)$$

式(5)与式(4)等效, 故由转速 n_K 和给定的电动机参数, 便可计算任一转速下的 P_K 值。

2 转矩改变对机械功率变化的影响

由式(1)和式(4)可得, 电动机非额定运行时, P_K 与 P_N 的差 ΔP 为

$$\Delta P = P_K - P_N =$$

$$(k - k^2 s_N + s_N - 1) T_N \frac{2\pi}{60} n_0 \quad (6)$$

对一台特定的电动机, 其 T_N 和 n_0 都是确定的数值^[4], 故功率差 ΔP 的正负, 可由式(6)的括号部分(Δ)来确定

$$\Delta = k - k^2 s_N + s_N - 1 = (k - 1) [1 - (k + 1) s_N] \quad (7)$$

由于 $k < \lambda$, 因此当 $k = \lambda$ 时, 式(7)中的 $(k + 1) s_N$ 值最大, $1 - (k + 1) s_N$ 的值最小; 若对任何异步电动机均存在

$$1 - (\lambda + 1) s_N > 0$$

$$\text{即} \quad \lambda < \frac{1}{s_N} - 1 \quad (8)$$

则 Δ , 即 ΔP 的正负, 可只由式(7)中的 $(k - 1)$ 来确定。由于临界转差率 s_m 与 s_N 和 λ 具有 $s_m = s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$ 的关系^[2], 即

$$\frac{1}{s_N} = \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}}{s_m} \quad (9)$$

众所周知 $s_m < 1$, 则当 $s_m = 1$ 时, $1/s_N$ 最小, 此时

$$\frac{1}{s_N} = \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \quad (10)$$

一般异步电动机的 $\lambda = 1.6 \sim 2.2$; 起重冶金机械用电动机的 λ 值较大, 可达 $2.2 \sim 3.71$ ^[2], 故可知对任何一台异步电动机, 均有 $\sqrt{\lambda^2 - 1} > 1$ 的结论, 即 $\sqrt{\lambda^2 - 1} - 1 > 0$ 。由式(8)可得

$$\lambda < \frac{1}{s_N} - 1 = \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} - 1 \quad (11)$$

即式(7)中的 $[1 - (k + 1) s_N] > 0$, 因此, 当 $k < 1$ 时, $k - 1 < 0$, Δ 即 $\Delta P < 0$, 说明转矩减小时, 虽然转速升高, 但机械功率减小; 当 $k > 1$ 时, $k - 1 > 0$, Δ 即 $\Delta P > 0$, 说明转矩增大时, 虽然转速降低, 但机械功率增大。显然转矩的改变是影响机械功率变化的主要因素。

3 机械功率变化与额定转差率的关系

电动机在非额定状态下运行时, 机械功率 P_K 的变化亦可由功率变化系数 P_K/P_N 来判断, 此时, 由 $P_K/P_N < 1$ 和 $P_K/P_N > 1$, 可以确定 P_K 的变化趋势。

$$\frac{P_K}{P_N} = \frac{k(1 - ks_N)}{1 - s_N} = \frac{1}{1 - s_N} (k - k^2 s_N) \quad (12)$$

对于具有额定转差率 s_N 的已知电动机, 由式(12)知, P_K/P_N 是转矩系数 k 的函数, 则 P_K/P_N 的一阶导数为

$$\left(\frac{P_K}{P_N} \right)' = \frac{1}{1 - s_N} (1 - 2ks_N) \quad (13)$$

$$\text{显然, 当} \quad k = \frac{1}{2s_N} \quad (14)$$

时, $(P_K/P_N)' = 0$; P_K/P_N 取得极值。故知, 在 $k = \frac{1}{2s_N}$ 时, P_K/P_N 取得极大值, 即

$$\left(\frac{P_K}{P_N} \right)_{\max} = \frac{1}{4s_N (1 - s_N)} \quad (15)$$

上述结论与工程实践相符, 并同时解决了异步电动机非额定状态运行时, 转矩和转速同时向相反

方向变化的情况下, 机械功率变化趋势不直观的问题。

4 计算实例

以 Y315M 2-2 型电动机和 Y2R 112M 型电动机为例^[5], Y315M 2-2 型电动机的 $P_N = 160\text{ kW}$, $n_0 = 3\,000\text{ r/m in}$, $n_N = 2\,980\text{ r/m in}$, $\lambda = 2.2$, $s_N = 0.007$; YZR 112M 型电机的标准负载持续率 $FS = 15\%$, 其 $P_N = 2.2\text{ kW}$ ^[5], $n_0 = 1\,000\text{ r/m in}$, $n_N = 725\text{ r/m in}$, $\lambda = 2.5$, $s_N = 0.275$; 利用 (12) 式研究转矩系数 k 改变时, P_K/P_N 的变化规律。 k 为给定值, 为方便计, k 依次取 0.1, 0.2, …, 为反映 P_K/P_N 随 k 的变化趋势, P_K/P_N 的计算值精确到小数点后 4 位。

4.1 当 $s_N = 0.007$ 时的 P_K/P_N

当 $s_N = 0.007$ 时, 对应于不同的转矩系数 k , P_K/P_N 的变化如表 1 所示。

表 1 当 $s_N = 0.007$ 时的 P_K/P_N 值($\lambda = 2.2$)
Table 1 Data of P_K/P_N as $s_N = 0.007$ ($\lambda = 2.2$)

k	P_K/P_N	k	P_K/P_N
0.1	0.100 6	1.3	1.297 3
0.2	0.201 1	1.4	1.396 1
0.3	0.301 5	1.5	1.494 7
0.4	0.401 7	1.6	1.593 2
0.5	0.501 8	1.7	1.691 6
0.6	0.601 7	1.8	1.789 8
0.7	0.701 5	1.9	1.887 9
0.8	0.801 1	2.0	1.985 9
0.9	0.900 6	2.1	2.083 7
1.0	1.000 0	2.2	2.181 4
1.1	1.099 2	(2.3)	2.278 9
1.2	1.198 3	(2.4)	2.376 3

表 1 数据表明, P_K/P_N 与 k 具有近似成正比的变化规律, 这是由于 s_N 较小, $k s_N$ 对 P_K 的影响不大, k (转矩 T_K) 是影响 P_K 变化的主要因素。由表 1 数据画出 P_K/P_N 随 k 变化的特性曲线如图 2 所示。

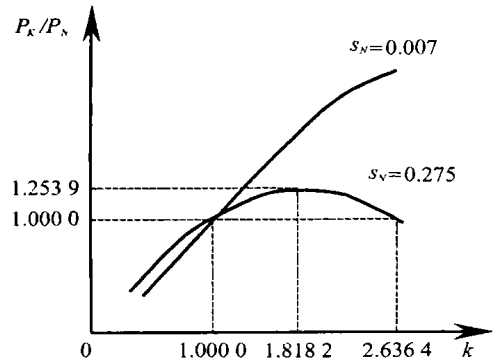


图 2 P_K/P_N 随转矩系数 k 的变化曲线
Fig 2 Curve of P_K/P_N with torque changing

由式 (14) 知, 对转差率 $s_N = 0.007$ 的异步电动机, 当 $k = \frac{1}{2 \times 0.007} = 71$ 时, P_K/P_N 取得极大值。因 $k > \lambda$, 显然不合实际, 故 P_K/P_N 随 k 变化的曲线在 $0 \sim \lambda$ 的区间内没有拐点。

4.2 当 $s_N = 0.275$ 时的 P_K/P_N

当 $s_N = 0.275$ 时, 对应于不同的转矩系数 k , P_K/P_N 的变化如表 2 所示。

表 2 当 $s_N = 0.275$ 时的 P_K/P_N 值($\lambda = 2.5$)
Table 2 Data of P_K/P_N as $s_N = 0.275$ ($\lambda = 2.5$)

k	P_K/P_N	k	P_K/P_N
0.1	0.134 1	1.4	1.187 6
0.2	0.260 7	1.5	1.215 5
0.3	0.380 0	1.6	1.235 9
0.4	0.491 0	1.7	1.248 6
0.5	0.594 8	1.8	1.253 8
0.6	0.691 0	1.9	1.251 4
0.7	0.779 7	2.0	1.241 4
0.8	0.860 7	2.1	1.223 8
0.9	0.934 1	2.2	1.198 6
1.0	1.000 0	2.3	1.165 9
1.1	1.058 3	2.4	1.125 5
1.2	1.109 0	2.5	1.077 6

以表 2 数据为基础, 可以画出 P_K/P_N 随 k 改变时的特性曲线(图 2)。由图 2 可见, 由于 s_N 较大, 其对 P_K 的影响不能忽略, 因此 P_K/P_N 与 k 之间已明显不成线性关系。由式 (14) 知, 当 $s_N = 0.275$, $k = 1.8182$ 时, 此时 $0 < k < \lambda$ 存在拐点。由式 (15) 得, P_K/P_N 取得极值为 1.253 9。不难理解, s_N 为 0.007 ~ 0.275 时的异步电动机, 在非额定运行时 P_K/P_N 特性曲线将落在图 2 所示的 2 条曲线之间。

5 结 论

- 1) 异步电动机工作在非额定条件下, 其机械功率可由式 (4) 或式 (5) 确定。
- 2) 转矩减小 ($k < 1$) 或转速升高 ($n_K > n_N$) 时, 电动机机械功率小于额定功率; 转矩增大 ($k > 1$) 或转速降低 ($n_K < n_N$) 时, 电动机机械功率大于额定功率。
- 3) 转矩改变时, 异步电动机机械功率取得极大值的条件由式 (14) 确定; 对转差率 s_N 较大的电动机, 在 $0 < k < \lambda$ 时, P_K/P_N 可能取得极大值, 其值可由式 (15) 确定。

[参考文献]

- [1] 秦曾煌 电工技术[M]. 第 5 版 北京: 高等教育出版社, 1999
- [2] 李发海, 王 岩 电机与拖动基础[M]. 第 2 版 北京: 清华大学出版社, 1997
- [3] 屈维谦 异步机转速公式及转差率的讨论[J]. 变频器世界, 2003, (4): 19- 21
- [4] 朱鹏程, 康 勇, 张 坚 异步电机直接转矩控制系统研究[J]. 电力电子技术, 2003, (1): 44- 46
- [5] 《新编实用电子电工手册》编写组 新编实用电子电工手册[M]. 北京: 科学普及出版社, 1991

Study on change regulation of machine power of non-rating operating asynchronous motor

CAO Yu-quan¹, GAO Wei¹, YAN Wei-zhong²

(1 Department of Automation and Control Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2 Electrical Engineering and Automation School, Harbin University of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: In this paper, the relation between the machine power of non-rating operating asynchronous motor and its rated power is studied, the formula to calculate the machine power by the rated torque T_N and rated slip s_N (or the motor speed n_N) is given, the ratio of actual torque to rated torque with the biggest machine power is defined

Key words: asynchronous motor; non-rating operation; machine power

(上接第 92 页)

Growth and water consumption characteristics of Chinese pine under soil drought stress

YANG Jian-wei^{1, 2}, LIANG Zong-sou¹, HAN Rui-lan¹, WANG Pei-zhen¹

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry,

Chinese Academy of Science, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Nanyang Normal College, Nanyang, Henan 473061, China)

Abstract: Under three soil water levels, which are fitted soil water content, medium drought and serious drought, and account for about 70%, 55% and 40% of field capacity (θ) respectively, we studied Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*)'s water consumption and water use characteristics. The result showed that water potential, water content, growth rate decreased significantly with the soil water content decrease. The period of fast growth and maximal biomass accumulation of Chinese pine were mainly in April and May. Total water consumption and biomass and growth were all fitted soil water contents > medium drought > serious drought. But total water use efficiency was highest at medium drought level, lowest at serious drought level. For three soil water contents, the highest water consumption in a month of Chinese pine was in May and August. The highest water consumption of ten days in a month was in the first ten days of July. The highest water consumption day was in July 5. The changes of water consumption in a day were different at three levels of soil water content. Superoxide dismutase (SOD) activity of Chinese pine went up under medium drought and serious drought but kept short time in serious drought. K^+ content of Chinese pine was higher in the last growth stage under three treatments of soil water content. It showed the relationships were bigger between K^+ content and drought resistant adaptability of Chinese pine.

Key words: Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*); soil drought; seedling growth; water use efficiency