

文章编号:1672-6197(2007)05-0104-04

电机温升估算的简化公式

李汝山

(山东理工大学 电气与工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 根据电机的通风散热条件,用与电机发热密切有关的两个参数给出实用的简化计算公式,并用此公式计算了电机连续和断续负载温升的两个实例.

关键词: 温升; 线负荷; 电流密度; 热负荷

中图分类号: TM301.4⁺¹

文献标识码: A

A simplified formula for motor temperature rising estimation

LI Ru-shan

(School of Electrical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: According to the ventilation and heat dispersion of the motor, this paper takes two parameters that are closely related with the heating of the motor to work out a practical simplified calculative formula, and further gets it verified with two examples under continuous and intermittent duty respectively.

Key words: temperature rise; line load; current density; thermal load

电机的运转总会在电机各部分产生能量损耗,这些损耗最后都将转化为热能,例如电机定子、转子线圈的电流热损耗,定子铁芯损耗,通风和磨擦损耗等.

在恒定负载时,经过一定的时间后,电机各部分基本上都达到了稳定的温度.此温度不应该超过使用绝缘材料所允许的极限温度,否则会损害电机的寿命和可靠性.理论分析证明:绝缘材料在运行时的温度每升高 8℃,其寿命将缩短一半^[1-3].

电机发热,特别是线圈发热情况的预计在设计 and 计算中是一个重要的部分.尽管有了计算机的帮助,但对温升的精确计算仍然是难以做到的.目前在一定程度上还是依靠经验数值.

在修理电机时,人们往往很少去考虑电机的温升.这样做有时就会出现问题的.在线圈数据改变时如线圈数目或导体截面改变及在绕制改变极数、频率或电压的线圈时,预先考虑电机的温升是必要的.这就要求有一个简化的计算方法或者说是一种估算方法.

1 对电机温升的估算

现在对温升的估算通常用电机的线负荷和电流密度的乘积来衡量.

电机的线负荷 A (沿着定子内圆每厘米长度内的电流数)为

收稿日期: 2007-04-06

作者简介: 李汝山(1956-)男,高级实验师

$$A = \frac{2 \cdot W \cdot m \cdot I}{D} \quad (\text{A/cm}) \quad (1)$$

式中: W 为每相的线圈匝数; m 为相数; I 为相电流; D 为定子内圆直径。

电流密度 J (电流强度 I 与导体截面 S 的比值) 为

$$J = \frac{I}{S} \quad (\text{A/mm}^2) \quad (2)$$

定子线圈直线部分的铜损耗为

$$Q_{cu} = I^2 \cdot m \cdot 2 \cdot W \cdot \frac{L}{S} \quad (\text{W}) \quad (3)$$

式中: L 为定子线芯长度; ρ 为导体电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。

热负荷 q :

$$q = \frac{Q_{cu}}{D \cdot L} = A \cdot \frac{2 \cdot W \cdot m \cdot I}{D} \cdot \frac{L}{S} \cdot \frac{1}{L} = A \cdot J \quad (4)$$

热负荷 q 也称作热流密度。它表示定子内圆单位表面积所散发出去的损耗瓦数。

上式假设了定子线圈直线部分的铜损耗全部通过定子内圆表面散发出去。

定子内圆每平方厘米所散发出去的损耗瓦数称作单位热损耗 (W/cm^2)。

公式 (4) 中电阻率是一个常数。由此得出结论, 即热负荷与电机的线负荷和电流密度的乘积成正比, 因此 q 是绕组发热的量度。借助于 q 的帮助, 对于同类电机, 同样的通风散热条件, 在相同的转速下, 发热的换算是非常精确的。在使用上述公式时要注意电机的通风散热条件。

对于通风电机, 略去其它对定子线圈发热有影响的损耗是允许的。机械损耗、转子电流热损耗、定子线圈端部电流热损耗、铁芯中的部分损耗和附加损耗大部分被冷却空气带走, 它们对定子线圈的发热影响较小。

对于外部通风的封闭电机, 绝大部分的转子电流热损耗通过空气隙传导给定子, 因此它对定子线圈发热的影响显著。转子电流的热损耗, 线圈端部的电流热损耗以及附加损耗都与电流有密切关系, 同样可以用热负荷 q 来表示。

2 考虑转子电流热损耗时电机温升的估算

滑环式或鼠笼式转子在额定负载时的电流热损耗

$$Q_{cu2} = (P_2 + P_m) \cdot \frac{S}{1 - S} \quad (5)$$

式中: P_2 为额定功率; P_m 为摩擦和通风损耗; S 为额定负载时的转差率; $S = \frac{n_s - n}{n_s}$, 其中 n_s 为同步转速, n 为额定转速)。

机械损耗 P_m 和 P_2 相比较小, 额定负载时的转差率 S 也较小, 因此

$$Q_{cu2} \approx P_2 \cdot S \quad (6)$$

由转子引起定子内圆表面的单位热损耗

$$Q_{cu2} = \frac{Q_{cu2}}{D \cdot L} = \frac{P_2 \cdot S}{D \cdot L} \quad (7)$$

假定转子的电流热损耗通过空气隙完全传导到定子铁芯上, 此时定子内圆表面总的单位热损耗

$$Q_{cu} = Q_{cu1} + Q_{cu2} \quad (8)$$

3 实例

例 1 一台三相交流异步电动机, 型号为 4A200L 4Y3, 功率 45kW, 转速 1475r/min, $U_N = 380/660\text{V}$, $I_N = 82.6/47.7\text{A}$, $\cos \phi = 0.85$, $D_a = 34.9\text{cm}$, $D = 23.8\text{cm}$, $L = 21.5\text{cm}$, $Z_1 = 48$, $Z_2 = 38$, 绕组节距: 10 (1~11), 双层绕组, 一只线圈的匝数 $W_1 = 12$, 并绕导体数 $n = 3$, 导体直径 $d = 1.32\text{mm}$, 并联支路数 $a = 2$, 绝缘等级 F (155), 效率 $\eta = 92\%$ 。

1) 当额定负载增加 15% 时, 线圈是否需要变化?

2) 为达到相应的起动力矩和最大力矩, 如何改绕新线圈? 怎么估算新线圈的温升?

求解过程:

(1) 对于额定负载

$$A = \frac{I_\phi \cdot 2 \cdot W_1 \cdot Z_1}{D \cdot a} = \frac{47.7 \times 2 \times 12 \times 48}{23.8 \times 2} = 367.5 \quad (\text{A/cm})$$

$$J = \frac{I_\phi}{n \cdot a \cdot \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{47.7}{3 \times 2 \times \frac{\pi \times 1.32^2}{4}} = 5.8 \quad (\text{A/mm}^2)$$

$$A \cdot J = 367.5 \times 5.8 = 2131 \quad (\text{A}^2/\text{mm}^2 \cdot \text{cm})$$

对于过负载 15%:

过负载 15%, 即 115% 的额定负载。可以这样假定, 过负载 15%, 即电流增加 15%, 电流的线负荷和电流密度也增加 15%。 $A \cdot j$ 提高了 $1.15^2 - 1 = 0.32$, 即 32%。于是

$$(A \cdot j) = A \cdot j \times 1.15^2 = 2131 \times 1.32 = 2818 \quad (\text{A}^2/\text{mm}^2 \cdot \text{cm})$$

电机过负载 15 %时的温升

$$\frac{(A \cdot J)}{A \cdot J} \cdot T = \frac{2818}{2131} \times 75^{\circ} = 99$$

电机额定负载时的温升 T 是 75 , 周围环境温度 40 , 线圈的温度就是 115 . 由于该电机使用 F 级 (155) 绝缘, 此时线圈温度是 139 , 所以过负载 15 %时线圈不用更换.

(2) 配制新线圈, 估算新线圈的温升:

额定功率的提高或长期过负载可通过减少线圈匝数和加大导体截面来解决.

若线圈匝数从 12 减到 11, 激磁电流会大大增加, 功率因数显著降低. 线圈匝数从 12 到 11 的变化就象电网电压从 380V 提高到 $U = \frac{12}{11} \times 380$

= 450V 一样. 激磁电流可能达到原来的 3 至 4 倍. 针对上述情况, 可用 4 路并联 23 匝代替 2 路并联 12 匝.

等效的电网电压

$$U = 380 \times 24 / 23 = 396 (V)$$

$$I_0 = I_0 \times (396 / 380) = 1.04 I_0$$

激磁电流大约只提高 4 % 左右.

原来一个槽内导体的总截面

$$q_{cu} = 2 \cdot W_1 \cdot n \cdot \cdot d^2 / 4 = 2 \times 12 \times 3 \times 1.32^2 / 4 = 98.53 (mm^2)$$

用下述公式确定新采用线圈的导体直径 d_x

$$q_{cu} = 2 \times 23 \times 2 \cdot d_x^2 / 4 = 98.53 (mm^2)$$
$$d_x = 1.168 (mm)$$

表 1 表线圈数据及 A · j 数值

负载	功率/ kW	相电流/ A	线圈数据	A	j	A · j
100 %	45	47.7	10 - 2 - 12 - 3 ×1.32 , a = 2	367.5	5.8	2131
115 %	51.75	54.9	10 - 2 - 23 - 2 ×1.18 , a = 4	405.3	6.27	2541

注: 此时用 $n = 2$ 代替 $n = 3$ 并绕.

查表取导体直径 (不带绝缘) 的近似值 1.18 mm. 现在新线圈的数据是

$$10 - 2 - 23 - 2 \times 1.18$$

接法: $-380V, Y - 660V$.

表 1 给出了新线圈和原来线圈的对照数据.

额定负载温升是 75 , 线圈重绕后过负载 15 %的温升是

$$T_{115} = T_{100} \times 2541 / 2131 = 89^{\circ}$$

线圈温度 $89 + 40 = 129$

可见更换新线圈后线圈发热比原来减少, 温升降低 10 左右. 而起动和最大力矩均提高到相应功率的数值.

在配制新线圈时, 一定要考虑到原电机磁路的饱和程度. 这可通过测定电机的空载电流来确定. 空载电流一般为额定电流的 20 % ~ 50 %, 若接近上限, 电机的磁路饱和程度就高. 配制新线圈时需格外注意.

例 2 鼠笼转子电流热损耗对定子线圈发热的影响.

对于脉动负载的传动 (如偏心式压力机和空气压缩机) 或者断续传动, 高转差率电机具有一定的优越性. 高转差率通常采用电阻转子来达到. (电阻转子的鼠笼绕组由铝合金或青铜条构成) 在

采用电阻转子时, 必须考虑转子电流的热损耗.

定子线圈的发热主要由两个损耗源提供, 即定子和转子的热损耗. 以下讨论两个问题.

1) 普通电机和高转差率电机比较两种电机绕组发热的估算.

2) 高转差率电机所允许连续负载的确定. 普通电机和高转差率电机的有关数据列于表 2. 普通电机采用了例 1 的数据.

(1) 普通电机连续负载功率的计算:

为了计算定子线圈的单位热损耗, 必须确定电阻率. 假定标准温度 115 作为线圈的温度, 按下列计算:

$$\rho_{115} = \rho_{20} \cdot \frac{235 + 115}{235 + 20} = 1/57 \times 1.3 =$$

$$0.024 \quad 1/40 (\cdot mm^2 / m)$$

定子内圆表面定子线圈的单位损耗

$$Q_{cu1} = A \cdot j \cdot \cdot \times 10^{-2} =$$

$$2131 \times 1/40 \times 10^{-2} = 0.53 (W / cm^2)$$

用公式 (6) 计算转子电流的热损耗.

用公式 (7) 计算转子电流的单位热损耗.

用公式 (8) 计算定子内圆总的单位热损耗.

所有计算结果列于表 3. 用完全相同的方法再计算电阻转子的各种热损耗, 结果也列于表 3.



表 2 普通电机和高转差率电机数据对照表

	电机尺寸	
	4A200L4 Y3	4AC200L4 Y3
额定电压 V	380/ 660	380/ 660
功率 P ₂ kW	45	40
转速转/ 分	1475	1413
额定电流 A	82. 6/ 47. 7	73. 4/ 42. 4
定子转芯		
外圆直径 D/ acm	34. 9	
内圆直径 D/ cm	23. 8	
铁心长度 L/ cm	21. 5	
槽数 z ₁	48	
转子	普通铸铝转子	电阻转子
槽数 z ₂	38	
线圈数据		
节距 Y	10	10
匝数 W ₁	12	12
导体直径 d/ mm	1. 32	
并联导体数 n	3	3
并联支路数 a	2	2
接法	/ Y	

普通电机的温升

$T_A = 115 - 40 = 75$

按单位热耗的比例算出高转差率电机的温升

$T_{AC} = 75 \times 1.86 / 0.98 = 143$

线圈温度 $t_{AC} = 143 + 40 = 183$

表 3 计算结果

	4A200L4 Y3	4AC200L4 Y3
定子		
电流密度 J/ A · mm ⁻²	5. 8	5. 16
线负荷 A/ A · cm ⁻¹	367. 5	326. 5
A · J/ A · mm ⁻² · cm ⁻¹	2131	1685
单位电流热损耗 Q _{cu1} / W · cm ⁻²	0. 53	0. 421
转子		
额定负载时的转差率 S	0. 016	0. 058
转子电流的热损耗 Q _{cu2}	720	2 320
转子单位热损耗 Q _{cu2} / W · cm ⁻²	0. 45	1. 44
总的单位热损耗 Q _{cu} = Q _{cu1} + Q _{cu2} / W · cm ⁻²	0. 98	1. 86

从以上分析可知. 若将 40kW 断续传动的高转差率电机使用在同样功率连续转动的负载上, 电机的温升将会超过极限温度, 损坏电机. 对于高转差

率电机, 由于在连续传动时电阻率是一个常数, 线圈上较高的温度是可以预料到的. 因此高转差率电机铭牌上的功率不适用于连续负载.

(2)高转差率电机所允许连续负载功率的计算:

假定高转差率电机在不满载时的连续功率 P_{2x}和普通电机在满载时的连续功率 40W 使电机线圈的发热情况是一样的, 则两种情况下总的单位热损耗应该是一样的.

损耗和功率的平方成正比, 电流和功率的关系是线性的, 所以

$Q_{cuX} = (P_{2x} / p_2)^2 \times 1.86$

对于普通电机

$Q_{cu} = 0.98 (W/cm^2)$

从公式 $Q_{cu} = Q_{cuX}$ 中得出不满载时的连续功率

$p_{2x} = \sqrt{0.98 / 1.86} \times 40 = 29.04 (kW)$

高转差率电机所允许的持续功率不得超过 30kW.

4 结束语

电机的发热和温升是电机正常工作时必然出现的问题, 利用线负荷 A 和电流密度 j 这两个与电机发热密切相关的参数判断电机的发热情况, 特别是利用推导出的计算温升的简单公式, 对电机温升进行估算基本上是正确的, 具有一定的工程价值和实用价值.

笔者对近年来生产的多台电机进行分析和统计, 得出以下数据, 对 E 级绝缘的封闭式小型异步电动机采用铜线时 A · j = 1 000 ~ 1 500; 采用铝线时 A · j = 600 ~ 1 000; 对 B 级绝缘的防护式中型异步电机, 采用铜线时 A · j = 1 500 ~ 2 500; 采用铝线时 A · j = 1 500 ~ 2 000. 以上数值可供参考.

参考文献:

[1] Elektrische Maschinen 64 Jahrgang[J]. und Pflaum Verlag M nchen und Heidelberg. 1995, (5): 7-10.
[2] 张尔海. 直流力矩电动机的温升和温升测试[J]. 微特电机 2005, (1): 43.
[3] Von Prof. Dr.-Ing. Habil. Germar Muller[M]. Elektrische Maschinen VEB Verlag Technik 1997.