

小形短時間定格誘導電動機の体格縮少限界について

藤 田 宏

Size reduction ratio and limit of short time running duty induction motor

Hiroshi. Fujita

This paper shows the method which decides a size of short time running duty induction motor from continuous running one which is same capacity, and shows there must be size reduction limit to keep the maximum-torque required.

ま え が き

誘導電動機（以下、IM と略記する）の設計について多くの文献が発表されているが、いずれも連続定格IMを対象としており、短時間定格IMに関するものは温度上昇特性を概念的に述べたものが多く、具体的に設計資料となる研究発表はない。その意味に於て連続定格機より短時間定格の理由で体格を縮少した場合、定格時間と体格縮少可能割合及び縮少限界を求めてみた。

1. 電動機構成要素の体格重量に及ぼす影響

IMの構成要素は鉄心、巻線、外枠、蓋、軸が主要部分でIM重量の大部分を占めている。IMの軽量化に当り重量決定の決定的要素となるのは鉄心寸法である。鉄心寸法を減少させるために積代方向に減少すると重量の軽減は外枠及び軸の減少長さだけ軽減されるが他の要素は変化しない。一方鉄心内径を減少すると巻線は巻線端が短くなり、外枠は減少分だけ直径が縮少される。同様に蓋は直径の縮少分と巻線端の縮少分だけ減少する。故に縮少は直径方向で行なう方が効果的である。

一般にその方が経費が安く、過負荷耐量が大きく且つ力率が良いと云はれている。⁽¹⁾

2. 短時間定格IMの体格と特性

短時間定格IMは連続定格IMの場合と異なり温度上昇値が使用範囲内で飽和値に達するものでなく、定格時間内に規定の温度上昇値を越えなければ良い。従ってIM構成各要素の単位体積（単位重量）当りの発熱量を多くとることが出来る。しかし、どの部分に発熱量を増加させて縮少するかが問題である。体格の縮

少を行なうとそれに従い最大出力及び最大トルクが低下する。従ってIMの重要な特性である最大トルクを所要の値に保とうとすると縮少に限界を生ずる。即ち或る程度までは温度上昇値を規格一杯の高い値に近づけて縮少できるが、それを越えて縮少することは温度上昇値から見た限界よりも最大トルクによる限界のため不可能となる。このことは定格時間が短時間になる程体格を小さく出来るとは云うものの或る限界を越えた短時間定格のものについては体格を縮少することはできなくなり温度上昇に余裕のあるものとなる。

3. 巻線縮少に伴う温度上昇⁽²⁾

IMの体格を短時間定格の理由で巻線を縮少して軽量化すると、当然電流密度が増大し単位体積当りの熱損失が増加する。縮少前の温度上昇値を θ 、最高温度上昇（飽和値）値を θ_m 、単位時間導体発熱量を Q 、溝放熱面積を F 、導体重量を G 、熱放散係数を h 、電流密度を ΔA 、導体断面面積を S 、導体固有抵抗を ρ 、導体の長さを l 、導体の比重を g 、全負荷電流を I 、とすると、

$$Q = \Delta A^2 S l \rho = \Delta A^2 \frac{G}{g} \rho \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\theta_m = \frac{\Delta A^2 G \rho}{F h g} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\theta = \frac{\Delta A^2 G \rho}{F h g} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{CG}\right) \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

軽量化するために巻線部分及びそれに伴う体格を直径方向で縮少するのであるから、縮少時の電流密度を ΔA_s 、導体重量を G_s 、放熱面積を F_s 、縮少時の温度上昇値を θ_s とすると

$$\theta_s = \Delta A_s^2 \frac{G_s \rho}{F_s h g} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\frac{CG_s}{F_s h}}\right) \right\} \dots\dots\dots(4)$$

ここで F_s や G_s を使用する代りに溝（巻線）縮少係数 σ を使用し

$$\frac{G_s}{G} = \left(\frac{F_s}{F}\right)^2 = \sigma$$

また $CG/Fh = T$ とおくと

$$\theta_s = \Delta A_s^2 \frac{\sqrt{\sigma} G \rho}{F h} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\sqrt{\sigma} T}\right) \right\} \dots\dots\dots(5)$$

ΔA_s は縮少後の全負荷電流（算出方法後述する）を I' とすると

$$\Delta A_s = \Delta A I' / \sigma I \dots\dots\dots(6)$$

従って縮少時の温度上昇 θ_s を縮少係数を用いて表すと

$$\theta_s = \left(\frac{\Delta A I'}{\sigma I}\right)^2 \frac{\sqrt{\sigma} G \rho}{F h} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\sqrt{\sigma} T}\right) \right\} \dots\dots\dots(7)$$

となる。Tは縮少前の温度上昇時定数である。

4. 巻線縮少に伴う回路定数と特性の変化

i. 励磁電流の増加 ⁽²⁾

巻線を縮少することは溝寸法を縮少することである。従ってその分だけ固定子内径が縮少される図-1の如く溝の肩巾をa, 歯の巾をbとすると溝巾は $\sqrt{\sigma}$ だけ減少し溝ピッチが $\sqrt{\sigma} a + b$ になる。

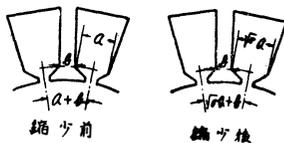


図-1

縮少前の空隙磁束密度を B_g 縮少後に B_{gs} になったとすると

$$B_{gs} = B_g \frac{a+b}{\sqrt{\sigma} a+b} \dots\dots\dots(8)$$

従って縮少前の励磁電流を I_m 縮少後の励磁電流を I_{ms} とすると（但し空隙長を変えないものとする）。

$$I_{ms} = I_m \frac{a+b}{\sqrt{\sigma} a+b} \dots\dots\dots(9)$$

縮少により鉄損，機械損にわずかの変動があるが励磁電流に比べて小さいので変動を無視すると縮少後の無負荷電流 i_{os} 及び無負荷力率 $\cos\varphi_{os}$ は縮少前のそれ等の値をそれぞれ i_o , $\cos\varphi_o$ とすると

$$i_{os} = \sqrt{(i_o \cos\varphi_o)^2 + \left(i_o \sin\varphi_o \frac{a+b}{\sqrt{\sigma} a+b}\right)^2} \dots\dots\dots(10)$$

$$\cos\varphi_{os} = \frac{\cos\varphi_o}{\sqrt{\cos^2\varphi_o + \left(\sin^2\varphi_o \frac{a+b}{\sqrt{\sigma} a+b}\right)^2}} \dots\dots\dots(11)$$

ii. 巻線縮少に伴う回路定数の変化

縮少前の一次抵抗を r_1 二次抵抗（一次換算値）を r_2' 一次リアクタンスを x_1 二次リアクタンス（一次換算値）を x_2' とすると，縮少により r_1 及び r_2' は縮少係数にほぼ逆比例して増加するから，縮少前の合成抵抗を R 縮少後の合成抵抗を R_s とすると，

$$R_s = \frac{R}{\sigma} = \frac{r_1 + r_2'}{\sigma} \dots\dots\dots(12)$$

x_1 x_2' は溝が相似形に縮少されても固定子内径の縮少によって高調波リアクタンスが減少し，かご形回転子では巻線端リアクタンスが減少する。これ等のリアクタンスは何れも極ピッチに比例するから ⁽³⁾ 一次の溝リアクタンスを x_{1s} 巻線端リアクタンスを x_{1e} 高調波リアクタンスを x_{1h} 二次のリアクタンス（一次換算値）をそれぞれ x'_{2s} x'_{2e} x'_{2h} とすると縮少後の一次リアクタンス X_1 及び二次合成リアクタンス（一次換算値） X'_2 は

かご形 IM では

$$X_1 = x_{1s} + x_{1e} + x_{1h} \frac{\sqrt{\sigma} a+b}{a+b} \dots\dots\dots(13)$$

$$X'_2 = x'_{2s} + (x'_{2e} + x'_{2h}) \frac{\sqrt{\sigma} a+b}{a+b} \dots\dots\dots(14)$$

巻線後 IM では X_1 は(13)式に同じだが X'_2 は

$$X'_2 = x'_{2s} + x'_{2e} + x'_{2h} \frac{\sqrt{\sigma} a+b}{a+b} \dots\dots\dots(15)$$

に変化する。従って縮少前の合成リアクタンスを X 縮少後の合成リアクタンスを X_s とすると，かご形 IM の場合は

$$X_s = X - (x_{1h} + x'_{2e} + x'_{2h}) \left(1 - \frac{\sqrt{\sigma} a+b}{a+b}\right) \dots\dots\dots(16)$$

巻線形 IM の場合は

$$X_s = X - (x_{1h} + x'_{2h}) \left(1 - \frac{\sqrt{\sigma} a+b}{a+b}\right) \dots\dots\dots(17)$$

に減少する。 ⁽²⁾

iii. 巻線縮少に伴う特性の変化 ⁽²⁾

巻線を縮少した場合の特性の変化は回路定数が求まれば円線図より容易に得られる。IMに於て最大トルク及び最大出力，起動電流は重要な特性であり規格値に入っていないなければならない。これ等の値が如何に変化するか求めると，最大トルク T_m ($N-m$) はかご形では

$$T_m = \frac{m_1 V_1^2}{2\omega_0 \left[\frac{r_1}{\sigma} + \left\{ \left(\frac{r_1}{\sigma} \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{r_1}{\sigma} \right)^2 + \{X - (x_{1h} + x'_{e2} + x'_{2h}) \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma a+b}{a+b}} \right)\}^2} \right\}^2 \right]} \dots\dots\dots(18)$$

巻線形では

$$T_m = \frac{m_1 V_1^2}{2\omega_0 \left[\frac{r_1}{\sigma} + \sqrt{\left(\frac{r_1}{\sigma} \right)^2 + \{X - (x_{1h} + x'_{2h}) \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma a+b}{a+b}} \right)\}^2} \right]} \dots\dots\dots(19)$$

最大出力 P_m (W) は、かご形 IM では

$$P_m = \frac{m_1 V_1^2}{2 \left[\frac{r_1 + r_2'}{\sigma} + \sqrt{\left(\frac{r_1 + r_2'}{\sigma} \right)^2 + \{X - (x_{1h} + x'_{2e} + x'_{2h}) \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma a+b}{a+b}} \right)\}^2} \right]} \dots\dots\dots(20)$$

巻線形 IM の場合は

$$P_m = \frac{m_1 V_1^2}{2 \left[\frac{r_1 + r_2'}{\sigma} + \sqrt{\left(\frac{r_1 + r_2'}{\sigma} \right)^2 + \{X - (x_{1h} + x'_{2h}) \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma a+b}{a+b}} \right)\}^2} \right]} \dots\dots\dots(21)$$

これ等の値をσごとに求めてみると図-2 のようになり、巻線のみを縮小して体格を縮小すると最大トルク及び最大出力は縮小に伴ない随時低下することがわかる。これでは縮小の意味がない。そこでこれ等の値を所要の値に保つ必要がある。その方法について項をあらためて説明するが、その前に磁気装荷負担部分の縮小について検討してみる。

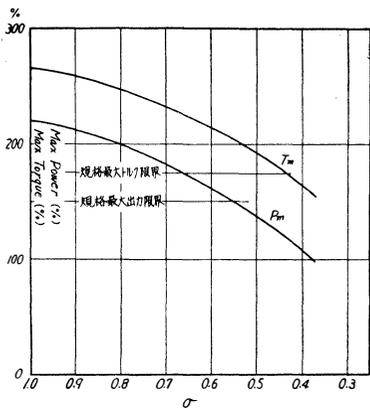


図-2 σごとの T_mP_m の変化
(閉鎖通風かご形 IM2.2KW-4P)

5. 磁気装荷負担部分の縮小に対する検討

磁気装荷負担部分を縮小することは鉄心磁束密度を増加させる事である。この縮小の影響は歯に大きく現れる、磁気装荷を一定とすれば磁路断面積の縮小に逆比例して磁束密度が増加する。通常歯の平均磁束密度は 1~1.3Wb の高い磁束密度を有しており B-H 曲線の上昇から飽和にかかった付近にあるため、わずかの磁束密度の増加に対しても励磁電流が著しく増大する。通常飽和係数の小数部の大部分が歯の励磁起磁力に当ることからも歯の縮小は短時間定格の理由によるといえども好ましくない。従って体格の縮小は巻線のみによって行ない磁気装荷負担部分で行わない方がいい、即ち短時間定格 IM の体格縮小は巻線で行ない。鉄心磁束密度は連続定格 IM と同程度に取る方が好ましい。従って温度上昇は連続定格 IM に比して巻線温度は急上昇するが鉄心はかなり低い温度上昇に止る。この事は表-1 の実績値からも知ることが出来る。⁽²⁾

表-1 連続定格機と短時間定格機の温度上昇比較

温度 上昇部分	30 分 定格-6P				連続 定格-6P			
	0.4KW	0.75	1.5	2.2	0.4	0.75	1.5	2.2
固定子巻線	30°C	36.5	45.5	38.2	20	19	19	26.5
固定子鉄心	17.5°C	23.0	22.5	23.0	17	19.5	22	26

6. 所要最大トルクを得るための回路定数の変更とその限界

前述の如く巻線電流密度を増し、しかも磁気装荷を

一定として IM' を縮小すると縮小に伴ない最大トルクも低下する。それでは縮小の意味はない。所要トルクは縮小によっても確保しなければならぬ。そのため

巻数を減じて回路定数を減少する。即ち固定子巻数を減ずると回路リアクタンス及び二次抵抗（一次換算値）はほぼ巻数の2乗に比例して減少する。また一次抵抗はほぼ巻数に比例して減少する。従って所要最大トルクを得るためには或る巻数だけ減じればよい。その場合の巻数の減少割合をkとし所要最大トルクをT_M (18)(19)式の値をT_mとすればkは(22)式を満足する値でなければならない。

$$\frac{T_M}{T_m} = \frac{\frac{r_1}{\sigma} + \sqrt{\left(\frac{r_1}{\sigma}\right)^2 + X_s^2}}{\frac{r_1}{\sigma} k + \sqrt{\left(\frac{r_1}{\sigma} k\right)^2 + k^4 X_s^2}} \dots\dots\dots(22)$$

しかし工作上巻数の減少は溝巾をそれだけ減少できることを意味し、一方磁気装荷は増加し(1/k)倍になる。ここで前節で述べたように歯の部分の磁束密度を変えないとすると歯の巾は(b/k)に増加されねばならない。ここで溝巾は巻数減少分だけ巾を減ずることが出来るから巻線に必要な溝巾は(√σ ak)。鉄心内径をそのままにしてこれ等の条件を満足する場合のみ縮少が成立する。即ち歯の巾を(b/k)にして(√σ ak)なる溝巾がとれるか否かがその成立の境界となる。即ちその判別は(24)式で行われる。

$$\frac{b}{k} + \sqrt{\sigma} ka \leq \sqrt{\sigma} a + b \dots\dots\dots(23)$$

$$\sqrt{\sigma} a + \left(1 - \frac{1}{k}\right)b - \sqrt{\sigma} ka \geq 0 \dots\dots\dots(24)$$

$$I_o = \sqrt{(i_{oc} \cos \varphi)^2 + \left\{ i_o \sin \varphi_o \left(\frac{a+b}{\sqrt{\sigma} a+b} \right) \frac{1}{k^2} \right\}^2} \dots\dots\dots(25)$$

$$\cos \varphi_o = \frac{\cos \varphi_o}{\sqrt{\cos^2 \varphi_o + \left\{ \sin \varphi_o \left(\frac{a+b}{\sqrt{\sigma} a+b} \right) \frac{1}{k^2} \right\}^2}} \dots\dots\dots(26)$$

抵抗値は(22)式が更に(27)式の如くなり、リアクタンスは(23)(24)式の如く更に変化する。

$$r_s = \frac{kr_1 + k^2 r'_2}{\sigma} \dots\dots\dots(27)$$

かご形 IM のリアクタンス

$$X_s = \left\{ X - (x_{1h} + x'_{2e} + x'_{2b}) \left(1 - \frac{\sqrt{\sigma} a+b}{a+b} \right) \right\} k^2 \dots\dots\dots(28)$$

巻線形の場合のリアクタンス

$$X_s = \left\{ X - (x_{1h} + x'_{2b}) \left(1 - \frac{\sqrt{\sigma} a+b}{a+b} \right) \right\} k^2 \dots\dots\dots(29)$$

従ってこれ等の値より円線図法により最終的縮少時の全負荷電流を容易に求めることが出来る。その値が前述(6)式に於けるI'になる。

7. 定格時間と体格縮少割合及び縮少限界の関係

この式を満足するkの値がとれない場合は最大トルクを確保して縮少することは出来ない。従って最大トルクよりみた縮少限界は(22)式と(24)式より定まる。但しT_mが所要最大トルク以上ある範囲に於てはこの式は成立しないが、云うまでもなくその範囲は検討の不必要な領域である。この関係を閉鎖通風型 IM.2.2KW-4Pについて計算してみると図-3の如くになりT_m>T_Mの部分は検討不要な部分でT_m'=T_Mの部分は最大トルクを確保して縮少出来る部分でありT_m'<T_Mの部分は最大トルクを確保して縮少出来ない領域でありσ_aが縮少限界を示している。

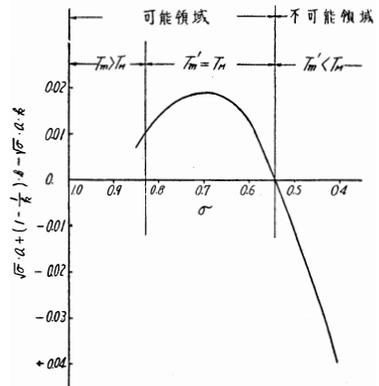


図-3 縮少可能性判別図

なお、この場合の回路定数及び無負荷特性の変化をみると、

(6)式を用いて図-4を作成し所定の温度上昇値θ_aに達する時間とσとの関係を図-4より座標を変えて図-5を得ることが出来る。この図の上に図の如くσ_aをとると、最大トルクを保持して連続定格IMより短時間定格の理由で体格を縮少すると図-5の如き関係で溝部分の寸法が縮少されるが、T_a時間以下の定格になるとσ_a以下に縮少することは不可能となる。従ってT_a時間以下の定格ではそれ以上縮少する事は不可能でありその点の縮少率はσ_aである。なお、σと固定子内径との関係は、縮少前をD、縮少後をD'とする

$$D' = \frac{\sqrt{\sigma} a+b}{a+b} D \dots\dots\dots(30)$$

になるから定格時間と固定子内径の関係は図-5の

σ を(9)式を用いてDにおきかえれば図-6の如くにして得られる。

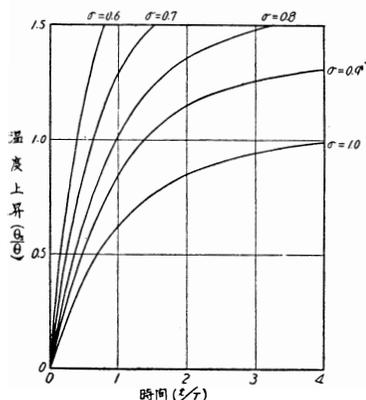


図-4 縮少率と温度上昇

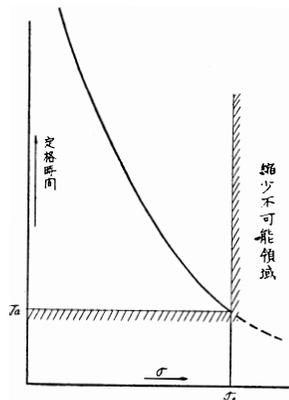


図-5 縮少率と縮少限界

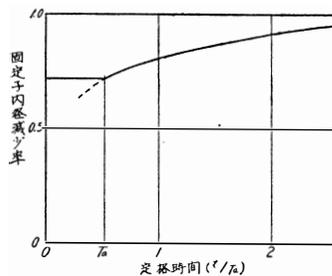


図-6 固定子出径の減少

結論

短時間定格 IM の体格は同容量の連続定格 IM の体格と特性が判れば、上述の方法で容易に求められる。短時間定格 IM の体格は或る程度以下の時間定格になるとそれ以上縮少することは最大トルク維持のため不可能となる。その限界も同様にして求められる。なお、この方法を用うれば連続定格 IM の軽量化の検討にも有効である。終りに、この研究に際し御指導を載いた上野享教授及び齊藤仁代助教授に厚く感謝の意を表する次第です。

参考文献

- (1) 電気学会 電機設計概論
- (2) 藤田, 小形短時間定格 IM の体格縮少限界について, 昭 38 年電気三学会北陸連合大会論文集
- (3) M. Liwshitz, Elektrische Maschine III.

(昭和38.10.31受付)