

磁気飽和の影響を利用した誘導電動機の起 動トルク精密算定法

藤 田 宏

Precision Procedure to calculate a starting torque of induction motor.

Hiroshi FUJITA

If a induction motor be locked in several voltages, its impedance decreases in proportion as locked voltage increases, because its magnetic circuits are magnetized conspicuously by locked current. And the vertexes of these impedance vectors make a linear locus.

The author has verified this disposition from the theory and some experiments, and has developed the new precision procedure to calculate a starting torque of induction motor from the results of locked tests in two low voltages by utilizing this disposition.

The author has compared the results from this procedure with those from existing method in actual surveied values, and has known this procedure is exceedingly better method than existing ones.

1. ま え が き

誘導電動機の特長において起動トルク特性は最も重要な特性の一つであり、起動時の機械にかかる衝撃を知る上において正確に知る必要がある。現在起動トルクの算定には低電圧による拘束試験値から求めた結果を用いて電圧比例法によって起動電流を求め、その値を用いて起動トルクの算定を行なっているため実際の起動トルクより小さくなって求まる。

これは起動電流による磁気回路の磁気飽和によるリアクタンスの減少を考慮に入れていないからである。筆者はこの点に着目して起動時の磁気飽和を考慮に入れ正確に起動トルクの算定を行なえる方法を開発し実験値と比較し好結果を得たので報告する。

2. 拘束電圧と回路定数の変化

誘導電動機の拘束時の等価回路は鳳氏の理論に従えば図-1のように示すことができる。

この回路に印加する電圧を0から定格電圧まで徐々に上昇すると回路定数にいかなる変化が生ずるか検討する。

<1> X_1 , X_2 の変化について

磁気飽和の高い半閉溝または全閉溝を有する誘導電

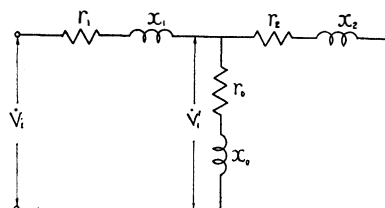


図-1 誘導電動機の拘束時の等価回路

動機においては歯の顎部分の漏洩磁路で起動時の起動電流によって磁化されるため非常に飽和する。すなわち拘束電圧を大きくするに従ってこの飽和の程度を増し飽和が大きくなればこのリアクタンスは減少する。

このことは拘束電圧を大きくするに従って回路リアクタンス X_1 , X_2 が減少することを意味している。

<2> 拘束電圧と X_0 の変化について

誘導電動機の等価回路は図-1のように示されるが、通常の誘導電動機においては $Z_1 = r_1 + jx_1$, $Z_2 = r_2 + jx_2$, $Z_0 = r_0 + jx_0$ とすれば、 $Z_1 \approx Z_2$, $Z_0 \gg Z_2$ であるから拘束時に励磁インピーダンスの両端にかかる電圧 V_1' は $V_1' \approx V_1/2$ である。通常電気機器においてこの程度の電圧範囲では磁気飽和の影響のあらわれてこないのが普通である。このように考えれば拘束時に関する限りでは V_1 が定格電圧以下であれば X_0 は定

数であると看すことができる。

<3> r_1, r_2, r_0 の変化について

r_1, r_2 については磁化に全く無関係であるから拘束電圧のいかにかわらず定数である。 r_0 は鉄損分に相当するものであるが、全体からみてこの損失は微小であり、 V_1/r_0 は小さく無視できる程小さいからこの値も定数とみなしても全体におよぼす影響はほとんどない。

<4> 拘束時の等価回路

回路定数について以上のように考えれば、拘束時の等価回路は一次端子電圧が定格電圧以下の範囲においては印加する電圧によって変化するのは x_1, x_2 ののみと考えることができるから、拘束電圧による磁気飽和を考慮に入れた誘導電動機の等回路は図-2のようにあらわすことができる。

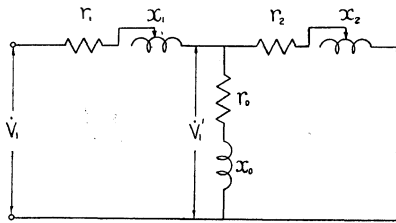


図-2 磁気飽和を考慮に入れた拘束時の誘導電動機の等価回路

3. 拘束電圧と拘束インピーダンスベクトル軌跡

図-2 の r_0, x_0, r_2, x_2 を直列回路に換算すると $1/(r_0 + jx_0) = g_0 - jb_0$ とすれば、その場合の抵抗を r_2' リアクタンスを x_2' とするとこれらの値は(1), (2)式のようになり⁽¹⁾、その等価回路は図-3のように示すことができる。

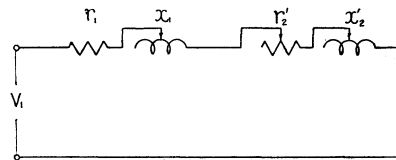


図-3 簡単にした拘束時の誘導電動機の等価回路

$$r_2' = \frac{g_0(r_2^2 + x_2^2) + r_2}{(g_0 r_2 + b_0 x_2 + 1)^2 + (g_0 x_2 - b_0 r_2)^2} \dots\dots(1)$$

$$x_2' = \frac{b_0(r_2^2 + x_2^2) + x_2}{(g_0 r_2 + b_0 r_2 + 1)^2 + (g_0 x_2 - b_0 r_2)^2} \dots\dots(2)$$

ここで $r_2' + jx_2'$ のベクトル項の軌跡が x_2 に関してどのように変化するか求めてみると(1), (2)式において $(g_0 r_2 + b_0 x_2 + 1)^2 \gg (g_0 x_2 - b_0 r_2)^2$ であるので(1), (2)式

は次の(3)(4)式のように示すことができる。

$$r_2' \approx \frac{g_0 r_2^2 + g_0 x_2^2 + r_2}{(g_0 r_2 + b_0 x_2 + 1)^2} \dots\dots(3)$$

$$x_2' \approx \frac{b_0 r_2^2 + g_0 x_2^2 + x_2}{(g_0 r_2 + b_0 x_2 + 1)^2} \dots\dots(4)$$

x_2 が Δx 変化した場合の r_2' および x_2' の変化量を $\Delta r_2', \Delta x_2'$ とすればこれらの値は(5), (6)式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta r_2' &= \left[\frac{d}{dx_2} \frac{g_0 r_2^2 + g_0 x_2^2 + r_2}{(g_0 r_2 + b_0 x_2 + 1)^2} \right] \cdot \Delta x \\ &= \frac{2(g_0 r_2 + 1)(g_0 x_2 - b_0 r_2)}{(g_0 r_2 + b_0 x_2 + 1)^3} \cdot \Delta x \dots\dots(5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta x_2' &= \left[\frac{d}{dx_2} \frac{b_0 r_2^2 + g_0 x_2^2 + x_2}{(g_0 r_2 + b_0 x_2 + 1)^2} \right] \cdot \Delta x \\ &= \frac{2b_0 r_2(g_0 x_2 - b_0 r_2) + (g_0 r_2 + 1)}{(g_0 r_2 + b_0 x_2 + 1)^3} \cdot \Delta x \dots\dots(6) \end{aligned}$$

ここで x_2 が Δx 変化した場合の任意の x_2 の時の傾斜を求めると(5), (6)式より(7)式のように与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x_2'}{\Delta r_2'} &= \frac{2b_0 r_2(g_0 x_2 - b_0 r_2) + (g_0 r_2 + 1)}{2(g_0 r_2 + 1)(g_0 x_2 - b_0 r_2)} \\ &= \frac{b_0 r_2}{g_0 r_2 + 1} + \frac{1}{2(g_0 x_2 - b_0 r_2)} \dots\dots(7) \end{aligned}$$

ここで x_2 を磁気飽和の影響をうけていない時の2次リアクタンスとし磁気飽和により x_2 がK倍(ただし常に $K < 1$) 変化したとすると(7)式は更に(8)式のように示すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x_2'}{\Delta r_2'} &= \frac{b_0 r_2}{g_0 r_2 + 1} + \frac{1}{2(Kg_0 x_2 - b_0 r_2)} \\ &\approx \text{const} \dots\dots(8) \end{aligned}$$

第2項の分母について検討してみると通常の誘導電動機においては $g_0 x_2 \ll b_0 r_2$ であり、またKは1からせいぜい0.8程度まで変化する程度と考えられる。このように考えれば $Kg_0 x_2$ において $K=1$ としても全体におよぼす影響は無視できる程小である。従って(8)式は実用領域においてはほとんど定数であるとみなしうる。このことは $r_2' + jx_2'$ ベクトル項の軌跡の傾斜は

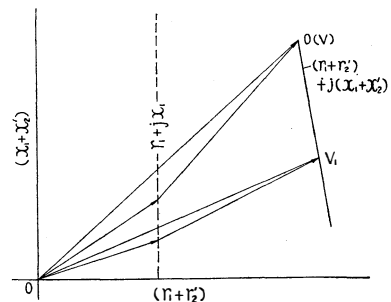


図-4 拘束電圧による拘束インピーダンスベクトル頂の変化軌跡(理論)

軌跡上の全ゆる点ではほぼ一定であるとみなしうることになる。従って「 $r_2' + jx_2'$ 」のベクトル頂の軌跡は実用領域においては直線に近似である」といえる。

ここで x_1 も x_2 に比例して変化するとすれば $(r_1 + r_2') + j(x_1 + x_2)$ もまた図-4のように直線軌跡を画いて変化すると考えることができる。これについて竹内寿太郎博士が GE 製 0.75KW-4P-220V-60c/s について拘束試験を行なわれたデータ⁽²⁾および筆者が日立製50W-4P-220V-60c/s について行った実験結果からこれらの関係を求めてみると図-5のようになった。この結果よりこの考え方の正しいことが立証される。

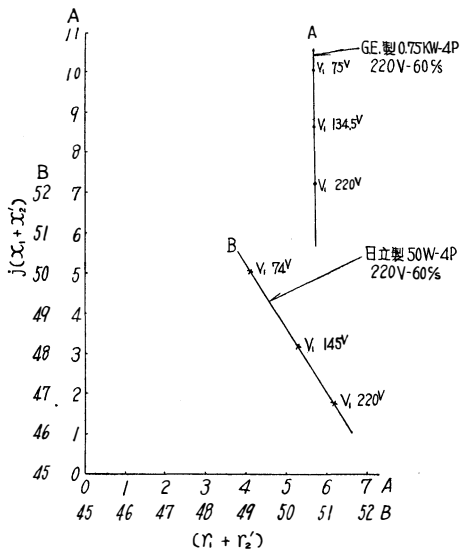


図-5 拘束電圧による拘束インピーダンスベクトル頂の変化軌跡 (実測値)

4. 拘束電圧と拘束電流ベクトル軌跡

実用領域では拘束電圧による拘束インピーダンスベクトル頂の軌跡は直線に近似であることが明らかとなったが、このようなインピーダンス軌跡をたどる場合のアドミッタンスベクトル軌跡は周知のように図-6に示すごとく $\angle \alpha = \angle \beta$ で原点を通る円となる。従って拘束電流ベクトル I_s は $I_s = E Y_s$ であるから I_s ベクトル頂の軌跡もまた $\angle \alpha = \angle \beta$ で原点を通る円となる⁽³⁾。

このことは種々の電圧で拘束試験を行なった場合の値を用いて電圧比例法によって定格電圧印加時の拘束電流ベクトルを求めると、それ等の値は拘束電圧によって異なり、この方法で求めた推定拘束電流ベクトル頂の軌跡は原点を通る円となることを意味している。

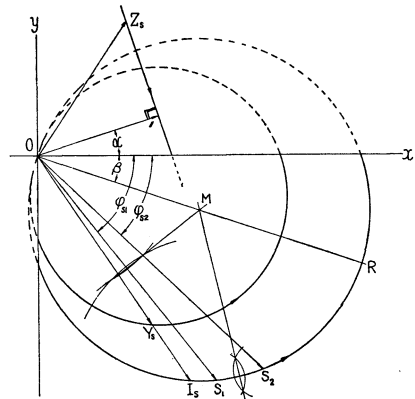


図-6 拘束電圧による拘束電流ベクトル軌跡

5. 拘束電流ベクトル軌跡の算定作区法⁽⁴⁾

以上より拘束電圧による磁気飽和を考慮に入れた場合の全電圧印加時の推定拘束電流ベクトル軌跡は試験値より次のようにして求められる。

すなわち、 V_{S1} 、 V_{S2} の2点で拘束試験を行ないその時の拘束電流を I_{S1} 、 I_{S2} 拘束損失を W_{S1} 、 W_{S2} 電圧比例法で求めた定格電圧印加時の推定拘束電流を I'_{S1} 、 I'_{S2} その力率角を φ_{S1} 、 φ_{S2} 定格電圧を V_1 とすれば

$$I'_{S1} = I_{S1} (V_1 / V_{S1}) \dots\dots\dots (9)$$

$$I'_{S2} = I_{S2} ((V_1 / V_{S2})) \dots\dots\dots (10)$$

$$\cos \varphi_{S1} = W_{S1} / \sqrt{3} I_{S1} V_{S1} \dots\dots\dots (11)$$

$$\cos \varphi_{S2} = W_{S2} / \sqrt{3} I_{S2} V_{S2} \dots\dots\dots (12)$$

となり $I'_{S1} = \vec{OS}_1$ 、 $I'_{S2} = \vec{OS}_2$ とおけば拘束電流ベクトル頂の軌跡は上述よりこれらのベクトル頂および原点を通る円となるのであるから \vec{OS}_1 、 \vec{OS}_2 の垂直二等分線の交点Mを中心として半径 \vec{MO} なる円弧を描けばこの円弧が拘束電流ベクトル頂の軌跡となる。

6. 起動時の拘束電流ベクトルについて

現在 JEC-37-1961 に起動電流推奨推定法として対数比例法を用いて次の(13)、(14)式より起動電流を求める方法を述べているが⁽⁵⁾、この方法は定格電圧印加時の拘束電流に相当しその絶対値のみについて定めてお

$$A = \log(I_{S2} / I_{S1}) / \log(V_{S2} / V_{S1}) \dots\dots\dots (13)$$

$$|I_s| = I_{S1} (V_1 / V_{S1})^A \dots\dots\dots (14)$$

り、拘束電流 I_s の絶対値に関する限りではかなり正確な値とされている。しかしその力率角には全くふれていない。前述のように電圧比例法で推定した全電圧印加時の拘束電流ベクトル頂の軌跡は I'_{S1} 、 I'_{S2} のベクトル頂 S_1 、 S_2 および原点0を通る円となり、一方

(14)式より全電圧印加時の I_s の絶対値を正確に求めることができることが判ったから、この両者より正確に I_s ベクトルを求めることが可能となる。すなわち図-7のように $S_1, S_2, 0$ を通る円と 0 を中心として

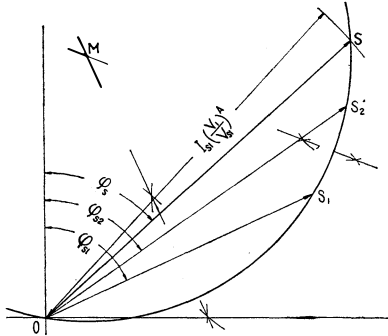


図-7 推定拘束電流ベクトル軌跡と全電圧印加時の拘束電流ベクトル

(14)式で求めた $|I_s|$ を半径とする円の交点 S を求めれば定格電圧印加時の拘束電流ベクトルとなり、また $\angle SOV$ がその力率角となって求まる。

7. 起動トルク精密算定法⁽⁶⁾

現在起動トルクの算定には電圧比例法によって求めた電流値をもって起動トルクを算定するため、磁気飽和に起因する起動トルクの増加に対する考慮は全くされていない。このため起動トルクは実際より小さくなって求まる傾向がある。

上述の理論に従えばこの欠点を補うためには磁気飽和を考慮に入れた I_s ベクトルを用いて従来の円線図法と同様な方法で起動トルクを算定すれば正確に起動トルクを求め得ることになる。すなわち図-8のように \vec{OS}_1 と $I_n = \vec{ON}$ より現行手法による円線図を作図

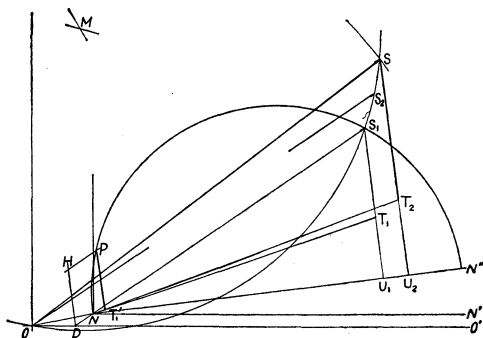


図-8 起動トルク精密算定作図法

して100%トルクに当る \vec{T}_1P を求める。次に前述の理

論に従って $O S_1 S_2$ の3点を通る円と半径 $|I_s|$ なる円との交点より S を求める。

S より $\vec{NN'}$ に垂線を下しその足を U_2 とし \vec{SU}_2 上に次の(15)式によって T_2 点を定めれば(16)式によって起動トルクを求めることができる。

$$\vec{ST}_2 = I_s \cos \phi_s - I_n \cos \phi_n - (I_s^2 - I_n^2) \sqrt{3} r_1 / V_1 \dots\dots\dots(15)$$

$$T_s(\%) = (\vec{ST}_2 / PT_1) \times 100 \dots\dots\dots(16)$$

8. 実験結果

以上の手法によって求めた値と現行手法による値を実測値と比較すると表-1のような値を得た。なお表中 50W-4P はブローニーブレーキ法により実測した値であり、7.5KW-4P および11KW-4P は松下電器産業株式会社にて直記式トルク実測装置で測定していただいたものである。これ等の値より本手法は現行法に比べてはるかに精度の高いことがわかる。

表-1 本手法と現行法で算定した起動トルクと実測値との比較

機種	実測値	本法による値	本法の誤差	現行法による値	現行法の誤差
50W-4P 普通かご形	380%	376%	-1.1%	310%	-18.4%
7.5KW -4P 二重かご形	298	298	0	272	-8.8
11KW -4P 二重かご形	294	278.5	-5.2	250	-18.3

9. 結論

以上筆者の考案した起動トルク精密算定法について述べたが、この手法によれば誘導電動機の最も重要な特性の一つである起動トルクの精密算定ができることが判った。また手法としても比較的簡単であることから実用上有効に使用できるものと思う。

参考文献

- (1) 小沢省吾 誘導電動機特講 36P (1959)
- (2) 竹内寿太郎 電学誌 No 408P 491 (1922)
- (3) 電気学会編 電気回路論 P49 (1952)
- (4) 藤田 昭40年電気北陸連大 論番12 (1965)
- (5) JEC-37-1961 (1961)
- (6) 藤田 昭40年電気北陸連大 論番13 (1965)

(昭和40.10.30受付)