

コンデンサモータの 定常特性計算プログラム

Programming for Calculation of Characteristic
of Condenser-Motor at Normal Operation

鈴木 正見^{※1}
Masami Suzuki
村瀬 正敬^{※2}
Masataka Murase
五十嵐英一^{※1}
Hidekazu Igarashi
児玉 誠^{※3}
Makoto Kodama
伊藤 嘉章^{※3}
Yoshiaki Ito

1 まえがき

モータ開発時のコスト低減や開発時間短縮のためには、試作回数を減らすことが重要である。試作回数低減の有効な手段として、設計時にモータの特性解析を行い、仕様を満足するモータであるか否かを推定する方法が挙げられる。

モータの特性解析手法には、等価回路法による定常特性解析や、 $d-q$ ベクトル法による瞬時特性解析が広く用いられている。また最近では有限要素法による磁場解析なども、用いられることが多くなった。これらの解析手法は、それぞれに優れた特長を有するので、設計対象とするモータの用途などを考慮して、各手法を選択あるいは組合せて用いることが必要となる。

コンデンサモータは高度な制御性を要求されることが少なく、定常特性解析のみで仕様を満足する性能が得られるか判断できる場合が多い。

定常特性解析は他の解析手法に比較すればシンプルな解析手法であり、瞬時特性解析や磁場解析がコンピュータ支援なくしては解析が不可能であるのに対し、等価回路定数の計算や定常特性解析の計算は、手作業でもある程度可能である。しかし、設計値や解析条件を調整しながら計算を繰り返すことになるため、設計者の負担が大きくなる。

そこで、コンデンサモータ設計支援のために、設計値より回路定数を求め、等価回路法により定常特性を計算するプログラムを作成したので報告する。

2 プログラムの構成

コンデンサモータの定常特性計算プログラムは図1の各処理により構成されている。

設計値入力処理では、コンソール上に順次設計データの入力要求が現れるようにした。オペレータはこの指示に従いデータをキー入力するようになっている。入力データは次の回路定数計算処理に渡され、1次・2次の各回路定数が計算される。求められた回路定数が次の特性計算処理に渡される。

特性計算処理では、さらに計算条件の入力を要求するので、ここで、供給電圧・周波数やコンデンサ容量などの条件を入力し特性計算を行わせる。

計算結果は計算結果出力処理に渡され、ファイルとして出力される。ファイル形式は、「Excel」などの表計算ソフト

トで出力データが容易に加工できるように、CSV形式のファイル（カンマ区切りテキストファイル）としている。



図1 プログラムの流れ図

3 設計値入力処理

モータ設計値の入力処理では、モータ設計経験の浅い者のために若干のオペレータ支援機能を持たせている。オペレータ支援機能として、巻線などの線種データベースと巻線占積率計算機能がある。

線種データベース機能は入力された巻線の導体径と種別から、仕上り外径や導体の抵抗率を自動的に選び出し回路定数計算データとする機能で、これによりオペレータの巻線データ入力作業の負担を軽減させている。

巻線占積率計算機能は、巻数・スロット面積などから占積率を計算し、入力された巻数が製作可能範囲かを判断し、不可能と判断した場合には設計変更の要求メッセージを出力する機能である。

また、過去に設計された一部のモータについては設計値データをプロトタイプデータとして用意し、設計変更の場合は、これらをデフォルト値として利用できるようにしている。

※1 機器開発事業部 商品開発部 開発2G
※2 機器開発事業部 商品開発部 開発1G

※3 機電事業部 電機部 設計G

4 回路定数計算処理

図2に誘導電動機の基本的な等価回路を示す。回路定数計算処理では設計データより等価回路上の各定数(1)1次抵抗, (2)2次抵抗, (3)励磁リアクタンス, (4)1次・2次漏れリアクタンスを求めている。回路定数計算に用いた式は参考文献⁽¹⁾に記載された式を用いている。詳細については、そちらを参照されたい。なお、(3)と(4)の各リアクタンスについては、電源周波数 f の関数式で示す。

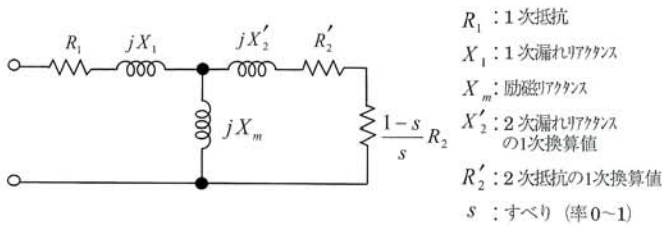


図2 誘導電動機の等価回路

4.1 1次抵抗(固定子巻線抵抗)の計算

固定子巻線抵抗は(1)式で求めている。

$$R_1 = \rho_1 \frac{L_1}{A_1} \quad \text{.....(1)}$$

ただし ρ_1 : 固定子巻線の導体の抵抗率
 L_1 : 固定子巻線の長さ
 A_1 : 固定子巻線の断面積

ρ_1, A_1 は線種とサイズにより定まる。 L_1 はモータ設計寸法より(2)式で求めている。

$$L_1 = \frac{C}{q} 2 \cdot (L_a + L_{ca} \cdot \gamma) \quad \text{.....(2)}$$

ただし, C : 全巻数 q : 並列数
 L_a : 積厚 L_{ca} : 周方向平均巻線距離
 γ : 実験的係数

γ はコイルエンドのオーバーハングを考慮した実験的係数である。

L_{ca} は分布巻されている巻線の周方向の平均距離である。

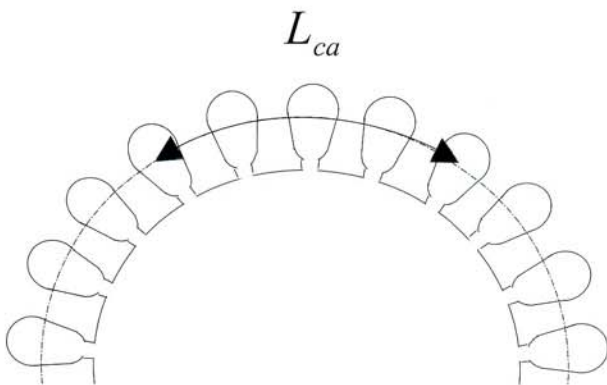


図3 周方向平均巻線距離

4.2 2次抵抗(回転子導体抵抗)の計算

回転子側が巻線構造であれば、回転子巻線の抵抗は固定子巻線の抵抗と同様の計算により求めることができる。しかし、小形誘導機は一般的に回転子側がカゴ型構造となっているので、別の手段で求める必要がある。ここでは、2次側のトータルの銅損より、(3)式で2次抵抗を求めている。

$$R_2 = \frac{P_{rpp}}{I_2^2} \quad \text{.....(3)}$$

$$P_{rpp} = P_{rb} + P_{rr} \quad \text{.....(4)}$$

ただし, P_{rpp} : トータル銅損 I_2 : 2次電流

P_{rb} : バーの銅損 P_{rr} : エンドリングの銅損

また、参考文献⁽¹⁾より、バーの銅損 ($I^2 R$ 損失) とエンドリングの銅損は(5)式と(6)式で求まる。

$$P_{rb} = (Ck_w \cdot I_2)^2 \cdot \frac{m \cdot R_b}{S_2} \quad \text{.....(5)}$$

$$P_{rr} = \left(\frac{I_2 Ck_w}{\pi \cdot P} \right)^2 \cdot 2m \cdot R_r \quad \text{.....(6)}$$

ただし, Ck_w : 有効巻数 S_2 : 回転子スロット数

m : 相数 R_b : バー1本あたりの抵抗

P : 極数 R_r : エンドリングの抵抗

4.3 励磁リアクタンスの計算

単相の励磁リアクタンスは、導体の誘導電圧と電流から、以下の様に与えられる。なお、誘導電圧は、磁束の関数として、参考文献⁽¹⁾に表記されている。

$$X_m = 2\pi \cdot f \cdot (Ck_w)^2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.0255 A_g}{P \cdot g_e \cdot S F_m} \quad \text{.....(7)}$$

ただし, f : 電源周波数
 (今回は $f=60$ [H z])

A_g : 断面積

$S F_m$: 飽和係数

$g_e = g \cdot K_1 \cdot K_2$

K_1, K_2 : ロータ及びステータのカッター係数

g : ギャップ長

(参考文献1では、インチ単位で表記されている)

4.4 漏れリアクタンスの計算

1次および2次の漏れリアクタンスは、モータの様々な部分の漏れリアクタンスを考慮して、参考文献⁽¹⁾により以下の様に与えられる。なお、ジグザグ漏れリアクタンスとベルト漏れリアクタンス、スキュー漏れリアクタンスは、1次側と2次側に等分配にしたので、それぞれ $1/2$ とな

っている。

$$X_1 = X_{slots} + X_{end} + \frac{X_{zz} + X_{belt} + X_{skew}}{2} \dots\dots\dots(8)$$

$$X_2 = X_{slotr} + \frac{X_{zz} + X_{belt} + X_{skew}}{2} \dots\dots\dots(9)$$

- ただし、 X_{slots} : スロット漏れリアクタンス
- X_{end} : コイルエンド漏れリアクタンス
- X_{zz} : ジグザグ漏れリアクタンス
- X_{belt} : ベルト漏れリアクタンス
- X_{skew} : スキュー漏れリアクタンス

a. 1次スロット漏れリアクタンス

1次スロット漏れリアクタンスは、巻数等のコイルに関する条件が考慮され、以下の様与えられる。

$$X_{slots} = [2\pi f (Ck_w)^2 10^{-1}] \left(2\mu_0 \frac{L_a}{S_1} k_{s1} C_x \right) \dots\dots\dots(10)$$

- ただし、 μ_0 : 透磁率
- S_1 : 固定子スロット数
- k_{s1} : スロットコンスタント
(スロットの形状で決る)
- C_x : スロット漏れ分布係数
(参考文献⁽¹⁾では、インチ単位で表記されている)

b. 2次スロット漏れリアクタンス

2次のスロット漏れリアクタンスも、コイルに関する条件が考慮され、以下の様与えられる。

$$X_{slotr} = [2\pi f (Ck_w)^2 10^{-1}] \left(2\mu_0 \frac{L_a}{S_1} \left(k_{s1} C_x + \frac{S_1}{S_2} k_{s2} \right) \right) \dots\dots\dots(11)$$

- ただし、 k_{s2} : 回転子スロット数
(参考文献⁽¹⁾では、インチ単位で表記されている)

c. ジグザグ漏れリアクタンス

ジグザグ漏れリアクタンスは、ロータとステータの歯の形状を考慮に入れて、以下の様与えられる。

$$X_{zz} = 2\pi \cdot f \cdot Ck_w^2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.08386 L_a}{S_1 g} \cdot \frac{(t_{10} + t_{20})^2}{4 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2)} \dots\dots\dots(12)$$

- ただし、 t_{10} : ステータ歯チップ幅
- t_{20} : ロータ歯チップ幅
- λ_1 : ステータ歯ピッチ
- λ_2 : ロータ歯ピッチ
(参考文献⁽¹⁾では、インチ単位で表記されている)

d. コイルエンド漏れリアクタンス

コイルエンド漏れリアクタンスは、コイルエンドの寸法

などが反映されて、以下の様与えられる。

$$X_{end} = 4\pi \cdot f \cdot Ck_w^2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{L_{ca} \cdot m}{25.4 P} \dots\dots\dots(13)$$

(参考文献⁽¹⁾では、インチ単位で表記されている)

e. ベルト漏れリアクタンス

ベルト漏れリアクタンスは、2つの相のコイル間での漏れリアクタンスであり、スロット数や極数からの実験値(参考文献⁽¹⁾の特性グラフ： k_B)を参照して、以下の様与えられる。

$$X_{belt} = 2\pi \cdot f \cdot Ck_w^2 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{0.00118 m \cdot k_B \cdot A_g}{g \cdot SF_m \cdot P} \right) \dots\dots\dots(14)$$

- ただし、 k_B : ベルト漏れ定数
(参考文献⁽¹⁾では、インチ単位で表記されている)

f. スキュー漏れリアクタンス

スキュー漏れリアクタンスは、スロットに対して斜めに入っているスキューあたりのズレに関することや、スキュー角について実験値(参考文献⁽¹⁾の特性グラフ： C_{sk})を考慮して、以下の様与えられる。

$$X_{skew} = (1 - C_{sk}^2) \cdot \left(1 - \frac{P}{100} \right) \cdot X_m \dots\dots\dots(15)$$

- ただし、 C_{sk} : スキュー係数

5 特性計算処理

特性計算処理では、前項で得られた回路定数を用いて、定常特性の計算を行っている。特性計算処理に用いたコンデンサモータの等価回路と計算方法を簡単に述べる。

前提条件として、モータの主巻線と補助巻線は互いに電気角で90°の位置に巻かれており、また機械損は無視できるものとする。

図4はコンデンサモータの補助巻線の電圧と回路定数を、主巻線と補助巻線の有効巻数比を用いて換算することにより、不平衡インピーダンスが接続された、対称な平衡二相電動機としてモデル化したものである⁽²⁾⁽³⁾。

図4のモデルを、さらに2電動機説に従い正相分電動機と逆相分電動機に分けて扱うことができる。図5の(a)から(d)はそれぞれ主巻線に対する正相分と逆相分、および補助巻線に対する正相分と逆相分に分けて表わしたものである。

図中の正相分電圧 V_p と逆相分電圧 V_N は、図6の電圧ベクトル図より式(16)と式(17)で求める。

$$\dot{V}_p = (\dot{V}_M - j\dot{V}'_A) / 2 \dots\dots\dots(16)$$

$$\dot{V}_N = (\dot{V}_M + j\dot{V}'_A) / 2 \dots\dots\dots(17)$$

s (すべり) と回転数は(18)式の関係にある。

$$s = \left(60 - \frac{N}{60} \frac{P}{2}\right) / 60 \quad \dots\dots(18)$$

図5より、 \dot{Z}_P, \dot{Z}_N は(19)式(20)式で表されるように、s (すべり) の関数である。

$$\dot{Z}_P = \left(-X'_2 X_m + j \frac{R'_2}{s} X_m\right) / \left\{ \frac{R'_2}{s} + j(X'_2 - X_m) \right\} \quad \dots\dots(19)$$

$$\dot{Z}_N = \left(-X'_2 X_m + j \frac{R'_2}{2-s} X_m\right) / \left\{ \frac{R'_2}{2-s} + j(X'_2 + X_m) \right\} \quad \dots\dots(20)$$

\dot{I}_{1P} と \dot{I}_{1N} は(21)式(22)式となる。

$$\dot{I}_{1P} = \frac{\dot{V}_M \{ \dot{Z}_{A1} + \dot{Z}_N - j(\dot{Z}_{M1} + \dot{Z}_N) / a \}}{(\dot{Z}_{M1} + \dot{Z}_P)(\dot{Z}_{A1} + \dot{Z}_N) + (\dot{Z}_{A1} + \dot{Z}_P)(\dot{Z}_{M1} + \dot{Z}_N)} \quad \dots\dots(21)$$

$$\dot{I}_{1N} = \frac{\dot{V}_M \{ \dot{Z}_{A1} + \dot{Z}_P + j(\dot{Z}_{M1} + \dot{Z}_P) / a \}}{(\dot{Z}_{M1} + \dot{Z}_P)(\dot{Z}_{A1} + \dot{Z}_N) + (\dot{Z}_{A1} + \dot{Z}_P)(\dot{Z}_{M1} + \dot{Z}_N)} \quad \dots\dots(22)$$

定常トルク T_C は、2次側で消費される正相分電力から、逆相分電力を差し引いた値に比例するので、式(23)で求められる。

$$T_C = \frac{P}{2\pi f} \cdot (|\dot{I}_{1P}|^2 R_P - |\dot{I}_{1N}|^2 R_N) \quad \dots\dots(23)$$

ただし、

- P : 極数 f : 電源周波数 \dot{I}_{1P} : 正相分電流 \dot{I}_{1N} : 逆相分電流
- R_P : 主巻線に換算した2次側正相分インピーダンスの抵抗分
- R_N : 主巻線に換算した2次側逆相分インピーダンスの抵抗分

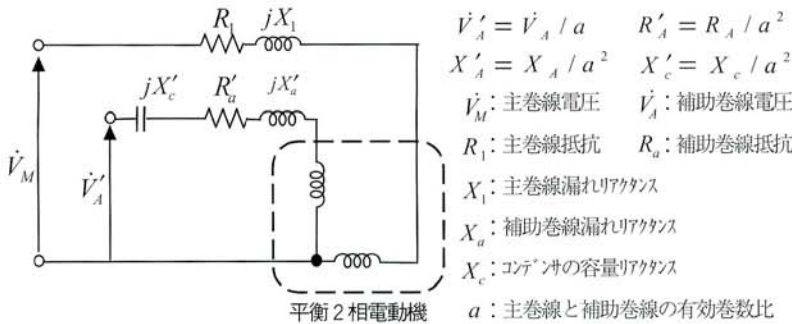


図4 コンデンサモータの平衡2相電動機への変換モデル

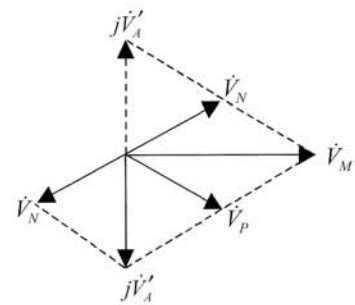
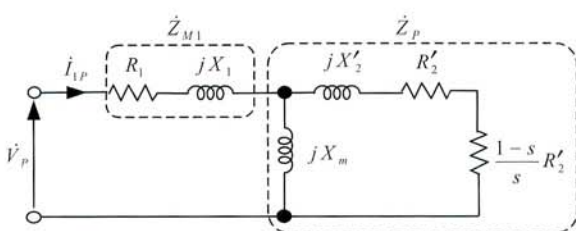
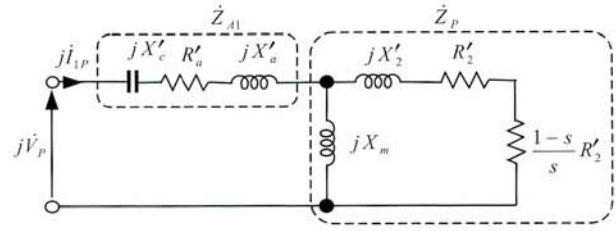


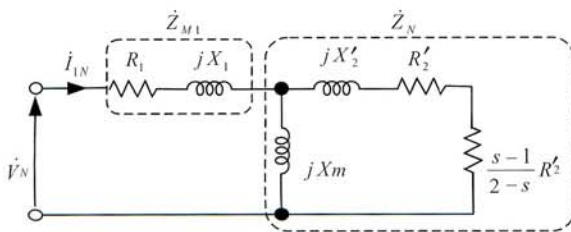
図6 電圧ベクトル図



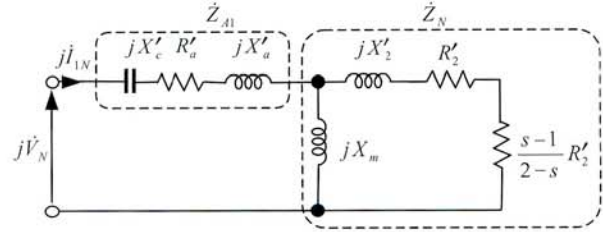
(a) 主巻線相 正相分



(c) 補助巻線相 正相分



(b) 主巻線相 逆相分



(d) 補助巻線相 逆相分

\dot{V}_P : 正相分電圧 \dot{V}_N : 逆相分電圧 \dot{I}_{1P} : 正相分電流 \dot{I}_{1N} : 逆相分電流 R_1 : 主巻線抵抗 X_1 : 主巻線漏れリアクタンス R'_2 : 主巻線に換算した2次1相の抵抗 X'_2 : 主巻線に換算した2次1相の漏れリアクタンス X_m : 励磁リアクタンス R'_a : 主巻線に換算した補助巻線抵抗 X'_a : 主巻線に換算した補助巻線リアクタンス X'_c : 主巻線に換算したコンデンサ容量リアクタンス s : すべり (率: 0-1) \dot{Z}_{M1} : 主巻線のインピーダンス \dot{Z}_{A1} : 主巻線に換算した補助巻線とコンデンサの合成インピーダンス \dot{Z}_P : 主巻線に換算した2次側正相分インピーダンス \dot{Z}_N : 主巻線に換算した2次側逆相分インピーダンス

図5 コンデンサモータの等価回路

(16)式～(23)式を用いて回転数-トルク特性を求めている。

入力電力と軸出力はそれぞれ(24)式と(25)式で表せる。

$$P_m = \left| \dot{V}_M \bar{I}_M \right| + \left| \dot{V}_A \bar{I}_A \right| \quad \dots\dots(24)$$

$$P_{out} = 2\pi T_c N / 60 \quad \dots\dots(25)$$

ただし、

N : 回転数 \bar{I}_M : 主巻線電流 \bar{I}_M の共役 \bar{I}_A : 補助巻線電流 \bar{I}_A の共役

うず電流損 P_e とヒステリシス損 P_h は(26)式と(27)式で表せる⁽⁶⁾。

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \quad \dots\dots(26)$$

$$P_h = K_h f B_m^2 \quad \dots\dots(27)$$

ただし、 B_m : 磁束密度ピーク値 f : 電源周波数

K_e, K_h : 材料の特性より求まる係数(カタログ値より算出)

効率 η は(28)式で求めている。

$$\eta = P_{out} / (P_m + P_e + P_h) \quad \dots\dots(28)$$

6 実測値と計算結果の比較

今回製作した特性計算プログラムの妥当性を確認するために、当社製コンデンサモータ2機種についてプログラムによる計算結果と実機特性試験の結果の比較を行った。使用したモータ2機種の仕様を表1に示す。

図7と図9はモータ1とモータ2の回転数-トルク特性で、図8と図10はモータ1とモータ2の回転数-効率特性である。図中記載の「実測値」は実機モータの特性試験結果であり、「計算値」は特性計算プログラムによる計算結果である。

図7と図8より、モータ1のトルク特性・効率特性の実測値と計算値は、若干の差異はあるが、良く一致している。最大トルク点や最大効率点もほぼ同等の値となっている。

また、回転数0[r/m]でのトルク、すなわち始動トルクも良く一致しており、これらの値が正確に得られることは、モータ設計時に有益な情報となる。

	モータ1	モータ2
極数	6	4
入力電圧	200V	200V
定格出力	500W	270W
コンデンサ容量	30 μ F	14 μ F

表1 モータ仕様

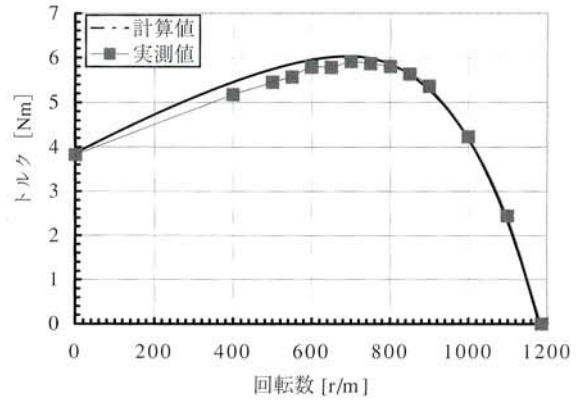


図7 モータ1 回転数-トルク特性

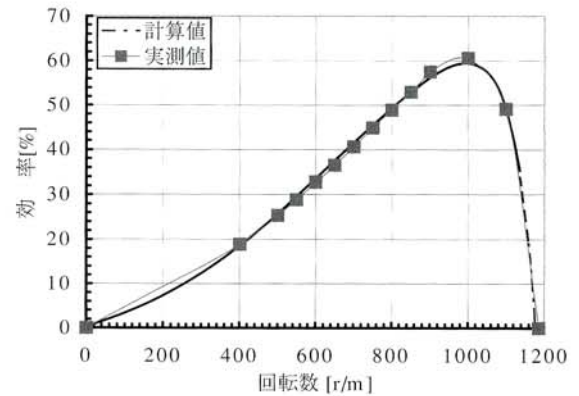


図8 モータ1 回転数-効率特性

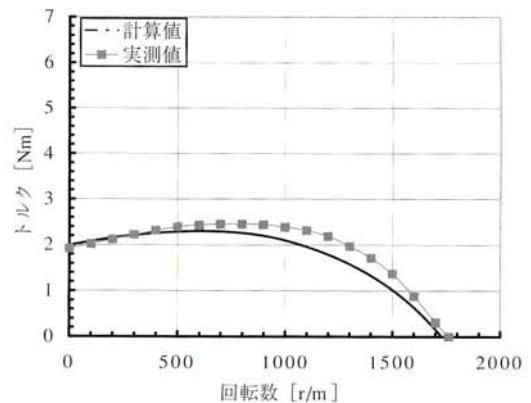


図9 モータ2 回転数-トルク特性

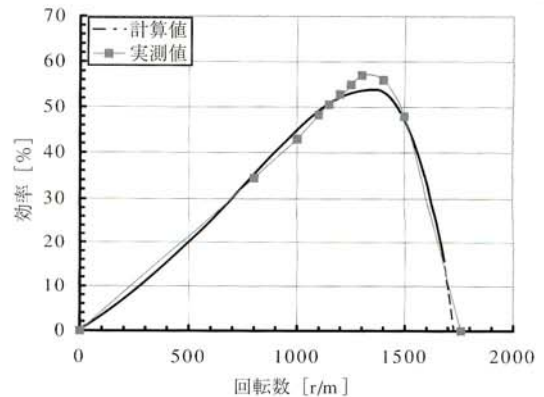


図10 モータ2 回転数-効率特性

図9と図10より、モータ2のトルク特性・モータ効率特性の実測値と計算値の差は、モータ1の結果と比較して大きくなっている。

図9のトルク特性では、実測値に対して計算値は低トルク特性を示している。また最大トルク発生速度が実測値より低い回転域にあり、トルクカーブもなだらかである。

図10より、実際の効率に対して計算結果では低効率を示している。これらの結果から、実際の1次・2次抵抗値が特性計算プログラムでの1次・2次抵抗計算値より小さかったと考えられる。

表2はモータ1とモータ2の1次巻線抵抗の回路定数計算処理での計算結果と実測値である(ただし、20℃換算値)。図より、モータ1の計算値と実測値は良く一致している。しかし、モータ2では、計算値に対して実測値が15%程度小さい値となった。

図11は図9と同様に、モータ2の回転数-トルク特性の計算結果と実測値である。ただし、計算結果は1次巻線抵抗値を実測値と一致するように補正し、さらに、2次抵抗も15%低い値になるよう補正して計算を行わせた結果である。

図より、補正前に比べ計算値と実測値の差が、全回転域で縮まる結果が得られた。また最大トルク点も、800回転で2.5[Nm]のあたりにあり、計算値と実測値が一致している。図12は図11と同じ補正を行った回転数-効率特性の計算結果と実測値である。図11では、実測値に比較して計算結果では最大効率がかなり低い結果であったのに対して、図12では高めの計算結果となった。また、高回転域で実測値との差が大きくなっている。実機モータでは、今回の特性計算プログラムで未考慮の摩擦ロスや軸の偏心によるロスなどの機械損が存在し、機械損は回転数に比例するので、これらの影響が考えられる。

7 考察

前項の結果より、体格や極数、巻線仕様などの差異が抵抗値の推定誤差量に影響していると考えられる。そこで、

		実測値	計算値
モータ1 巻線抵抗	主巻線	5.28 [Ω]	5.28 [Ω]
	補助巻線	4.85 [Ω]	4.80 [Ω]
モータ2 巻線抵抗	主巻線	6.86 [Ω]	8.00 [Ω]
	補助巻線	9.55 [Ω]	11.61 [Ω]

表2 1次巻線抵抗 (20℃換算値)

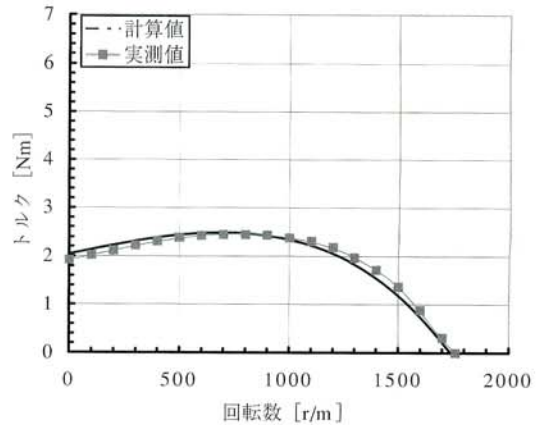


図11 モータ2 回転数-トルク特性(抵抗値補正)

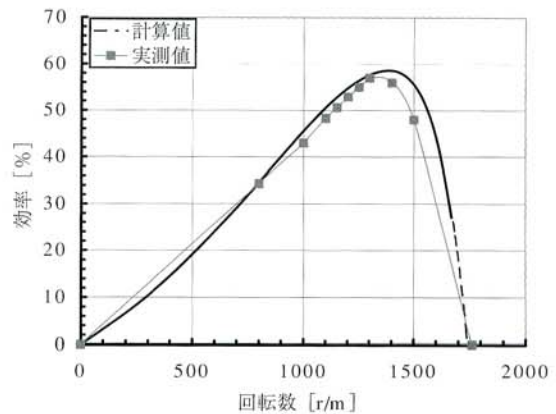


図12 モータ2 回転数-効率特性(抵抗値補正)

体格・極数・巻線仕様の異なるモータについて、実測値と特性計算プログラムの計算結果との比較データを蓄積し、実験的補正係数を求めることにより、より実用的な計算プログラムとすることが期待できる。さらに、蓄積した比較データから誤差要因の解析を行い、解析結果を基に正確な回路定数を求められるプログラムとすることができるとも可能性がある。

また、構造寸法誤差が回路定数計算値に与える影響や、1次・2次巻線の温度上昇による抵抗値変化の影響が特性の差として現れてくる。さらに、機械損による影響も特性の差として現れてくる。これら、さまざまな変動要因を考慮に入れ、それぞれの変動による特性の推定変化範囲を示せる計算が行えるように機能拡張していくことも重要な課題である。

8 あとがき

モータ設計値より得られる情報を基にモータの等価回路定数を求め、この回路定数を用いた等価回路により、コンデンサモータの特性計算を行うプログラムを作成した。当社製コンデンサモータ2機種について、トルクおよび効率の計算結果と実測値について比較を行い、その結果、回路定数計算誤差の修正のため、モータの種類により若干の補正が必要となるが良好な結果を得た。

実験的補正係数の付加、あるいは、誤差要因の解析による計算式の改良により、より正確な特性計算が可能となるようにしていきたい。

さらに、

- ・さまざまな要因による、特性の推定変動幅が得られる機能追加。
- ・精度向上の方法として、モータ設計時のCADデータから得られるスロット形状を基に巻線長を求めたり2次側のカゴ構造をより正確に得て2次抵抗を求めるプログラムを組込む。
- ・有限要素法による磁場解析データを利用してインダクタンス値を求める。
- ・熱解析データを基に1次抵抗・2次抵抗の補正を行う。
- ・特性計算プログラムの操作性を向上させるために、入出力機能のビジュアル化。

などの機能拡張についても検討したいと考える。

参考文献

- (1)C.G.Veinott: Theory and Design of Small Induction Motors McGraw-Hill Book Co.,Inc (1959)
- (2)三宅:『小形ACモータの設計と制御』総合電子出版社(1984.5)
- (3)石黒, 他:『単相誘導電動機とその応用』オーム社(1965.5)
- (4)坪島, 他:『電動機の制御と応用』東京電機大学出版局(1969.11)
- (5)村瀬, 荒川, 鈴木:「コンデンサモータの可変速駆動における脈動トルク低減と効率改善」愛知電機技報 No. 22 (1999.3)
- (6)難波江, 他:『電気学会大学講座 電気機器学』電気学会(1994.3)

筆者紹介



鈴木 正見

機器開発事業部 商品開発部 主査
モータの開発および設計に従事



村瀬 正敬

機器開発事業部 商品開発部 主任
モータの開発および設計に従事



五十嵐 英一

機器開発事業部 商品開発部
モータの開発および設計に従事



兎玉 誠

機電事業部 電機部 設計G
モータの量産設計に従事



伊藤 嘉章

機電事業部 電機部 設計G
モータの量産設計に従事