

誘導電動機の各種試験と回路定数

ビジロ補足資料

兵庫職業能力開発促進センター ビル設備サービス科

2024年7月更新

もくじ

1. 誘導電動機の等価回路	2
2. 各種試験による回路定数の導出.....	3
2.1. 固定子巻線抵抗	4
2.2. 拘束試験	5
2.3. 無負荷試験.....	7
3. 等価回路と銘板値.....	8
4. 特性曲線	9

1. 誘導電動機の等価回路

等価回路は、電気回路的に分断され磁気回路として結合している一次側と二次側を、一つの電気回路で示すものである。等価回路にはT型とL型があり、図1のT型等価回路は厳密性の高い分、計算が複雑になる。一方、図2のL型等価回路は、「励磁電流が電機子電流全体に対して十分小さければ、一次側の r_1 、 x_1 の電圧降下の影響は低く、励磁回路の位置を変えても計算に大きな結果の差は出ない」という考えの元に採用されている等価回路であり、これを用いると計算が大変シンプルにできる。

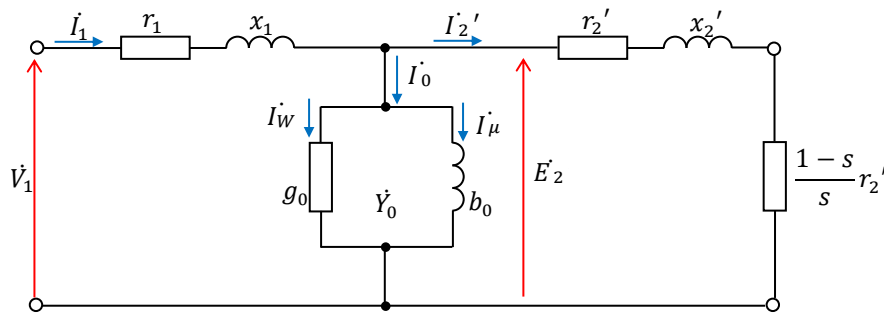


図1 T型等価回路

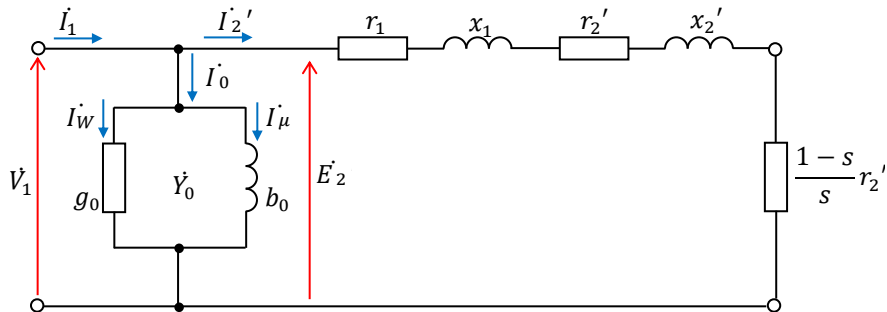


図2 L型等価回路

並列回路の計算においてアドミタンスを使えば分母や分子を簡単にする事ができ、間違いが少なくなるという利点がある。アドミタンスとはインピーダンスの逆数で、インピーダンスは電流の流れにくさを表し、アドミタンスは電流の流れやすさを表す。アドミタンスの記号は \dot{Y} 単位は[S]ジーメンズという。同様に抵抗の逆数をコンダクタンス g [S]、リアクタンスの逆数をサセプタンス b [S]という。電流を求める際は、電圧をアドミタンスで割るのではなく、電圧にアドミタンスを掛けなければならない。

$$I_0 = \dot{V}_1 \times \dot{Y}_0$$

2. 各種試験による回路定数の導出

誘導電動機の検査成績表（14 ページ）と固定子巻線の結線方法および機械損（軸受の摩擦や冷却ファンによる損失）が分かれば、回路定数を計算により求めることができる。

誘導電動機検査成績表【富士電機株式会社 MLH8075M】

巻線抵抗 [Ω] 固定子 Y結線	周囲温度 [°C]	周波数 [Hz]	無負荷試験			拘束試験			極数
			電圧[V]	電流[A]	入力[W]	電圧[V]	電流[A]	入力[W]	
10.27	14.0	60	200	0.860	53	36.8	1.7	70	2

機械損【富士電機株式会社 MLH8075M】

機械損[W]	
50Hz 時	60Hz 時
14	20

※固定子巻線の結線方法および機械損はメーカーへ問い合わせ確認した。機械損は電圧を段階的に変えて実施する無負荷試験によって求めることもできる。

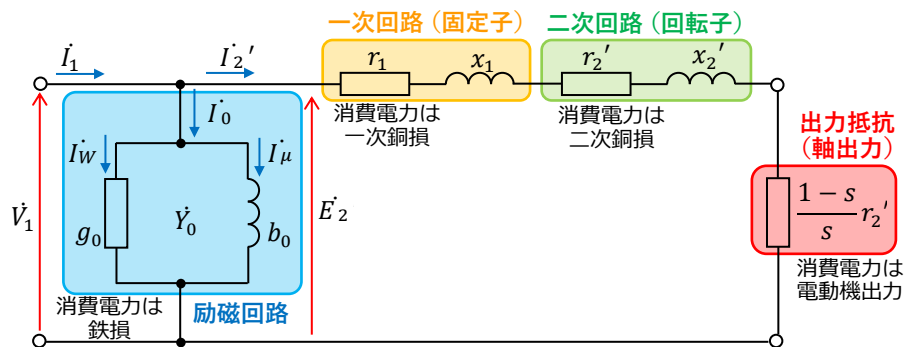


図3 L型等価回路と各種損失

V_1 : 一次相電圧、 I_1 : 一次全電流、 r_1 : 固定子巻線抵抗、 x_1 : 固定子漏れリアクタンス
 I_2' : 二次電流（一次負荷電流）、 r_2' : 回転子巻線抵抗、 x_2' : 回転子漏れリアクタンス
 I_0 : 励磁電流、 Y_0 : 励磁アドミタンス、 g_0 : 励磁コンダクタンス、 b_0 : 励磁サセプタンス
 $\frac{1-s}{s}r_2'$: 出力抵抗

2.1. 固定子巻線抵抗

巻線抵抗を端子間で測定し、平均したもの。巻線抵抗値は値が小さいため、温度による変化が大きい。そのため、抵抗値を基準温度に換算する必要がある。一般用低圧三相かご形誘導電動機では耐熱クラスに、E・B・Fの3種があり、JIS C 4210で温度上昇限度が規定されている。E種・0.4kWの誘導電動機の温度上昇限度は75°Cである（B種：80°C、F種：105°C）。

換算式の「234.5」は、0°Cの銅の抵抗温度係数0.004264の逆数 $1/0.004264 \approx 234.5$ である。

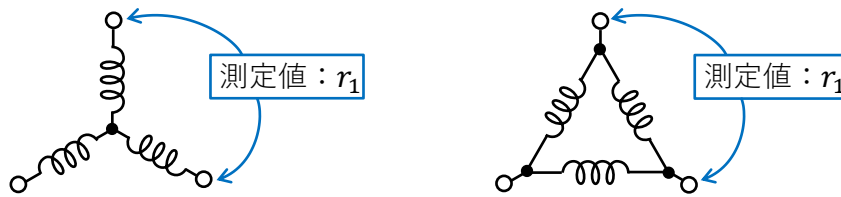


図4 固定子巻線抵抗

$$r_T = r_1 \times \frac{234.5 + T}{234.5 + t}$$

r_1 : 測定した抵抗[Ω]

r_T : 基準抵抗[Ω]

T : 基準温度[°C]

t : 測定時の温度[°C]

教材で使用する電動機【MLH8075M】は、固定子巻線がY結線になっているため、測定値を1/2倍にして一相分の巻線抵抗値を求める。△結線の場合は測定値を2/3倍にする（図4）。また、測定時の周囲温度は14°Cなので、基準温度75°Cに換算する。

$$\text{一相分の抵抗は } \frac{10.27}{2} = 5.135 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$r_T = 5.135 \times \frac{234.5 + 75}{234.5 + 14} = 6.3955 \text{ [}\Omega\text{]}$$

2.2. 拘束試験

拘束試験は電動機の軸が回転しないように固定した状態で電圧を徐々に上げていき、一次電流が定格電流 (1.7A) になった時の諸量を読み取る。電動機に加える電圧が定格電圧に比べ小さいので、励磁回路にはほとんど電流が流れない。したがって励磁回路が無視でき、図5の等価回路として考える。また、軸は拘束状態にあり、すべり $s=1$ であるため、電動機出力を表す負荷抵抗は 0Ω (短絡状態) となる。

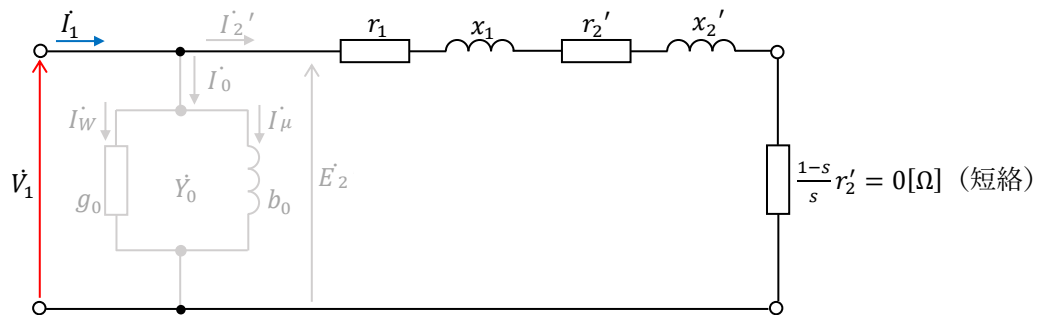


図5 拘束試験の等価回路

拘束試験		
電圧[V]	電流[A]	入力[W]
36.8	1.7	70

拘束試験の電圧は線間電圧なので、相電圧に換算する。

$$\frac{36.8}{\sqrt{3}} = 21.246[\text{V}]$$

拘束試験の入力は一次巻線抵抗と二次巻線抵抗の消費電力となる。単相分の等価回路なので、70[W]の1/3で23.333[W]

$$I_1^2 \cdot (r_1 + r_2') = (1.7)^2 \cdot (r_1 + r_2') = 23.333[\text{W}]$$

$$r_2' = \frac{23.333}{(1.7)^2} - r_1 = \frac{23.333}{(1.7)^2} - 6.396 = 1.678[\Omega]$$

$$z = \frac{21.246}{1.7} = 12.498[\Omega]$$

$$z = \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

$$12.498 = \sqrt{(6.396 + 1.678)^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

$$x_1 + x_2' = \sqrt{(12.498)^2 - (8.074)^2} = 9.540[\Omega]$$

なお、拘束試験時に電動機は回転していないので、機械損 = 0[W]である。

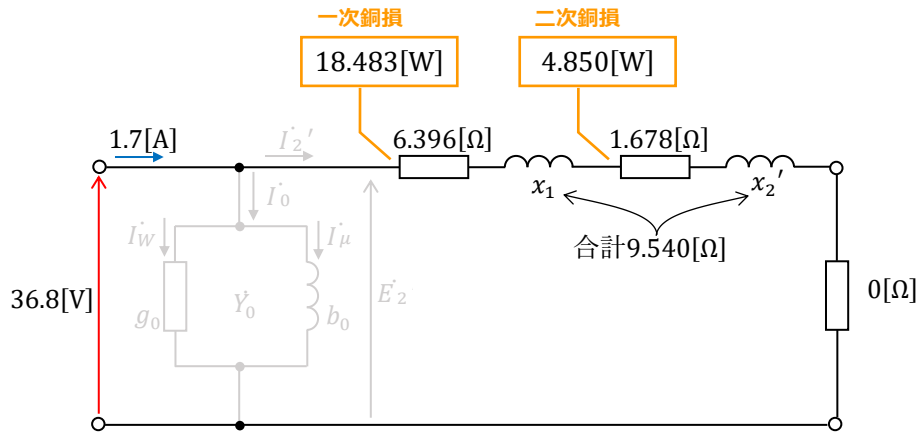


図 6 拘束試験による回路定数と諸量

拘束試験より、三相分の一次銅損、二次銅損はそれぞれ

$$\text{一次銅損} = 3 \cdot (1.7)^2 \cdot 6.396 = 3 \cdot 18.483 = 55.449[\text{W}]$$

$$\text{二次銅損} = 3 \cdot (1.7)^2 \cdot 1.687 = 3 \cdot 4.850 = 14.551[\text{W}]$$

となる。当然、合計は拘束試験の入力電力70[W]になる。

2.3. 無負荷試験

無負荷試験は電動機の軸に負荷を接続していない状態で、定格電圧を加えて行う。電動機は定格回転速度を超え、ほぼ同期速度で回転する。同期速度はすべり $s=0$ であるため、機械出力に相当する二次出力抵抗は ∞ となり、二次側に電流はほとんど流れない。つまり、励磁回路のみに電流が流れる。したがって図7の等価回路として考える。

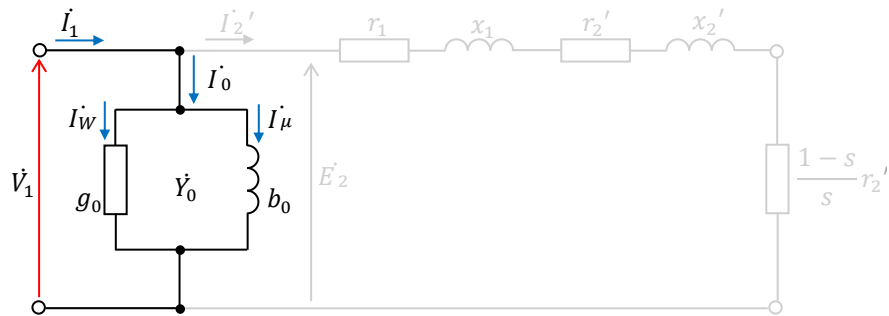


図7 無負荷試験の等価回路

無負荷試験		
電圧[V]	電流[A]	入力[W]
200	0.860	53

無負荷入力53[W]には機械損20[W]が含まれている。

無負荷損（鉄損） = $53 - 20 = 33$ [W]であり、単相分では $1/3$ なので、11[W]。

無負荷試験の電圧は線間電圧なので、相電圧に換算する。

$$\frac{200}{\sqrt{3}} = 115.470 \text{ [V]}$$

鉄損電流は

$$11 \text{ [W]} = 115.470 \text{ [V]} \cdot I_w$$

$$I_w = 0.0953 \text{ [A]}$$

励磁抵抗及び励磁コンダクタンスは

$$r_0 = 115.473 / 0.09529 = 1212.121 \text{ [\Omega]}$$

$$g_0 = 1/r_0 = 1/1211.806 = 0.000825 \text{ [S]}$$

磁化電流は

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_w^2} = \sqrt{0.860^2 - 0.09529^2} = \sqrt{0.7305} = 0.8547 \text{ [A]}$$

励磁リアクタンス及び励磁サセプタンスは

$$x_0 = 115.470 / 0.8547 = 135.099 \text{ [\Omega]}$$

$$b_0 = 1/x_0 = 1/135.104 = 0.00740 \text{ [S]}$$

励磁インピーダンス及び励磁アドミタンスは

$$Z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2} = \sqrt{1211.806^2 + 135.104^2} = 1219.627[\Omega]$$

$$Y_0 = 1/Z_0 = 1/1219.314 = 0.000820[\text{S}]$$

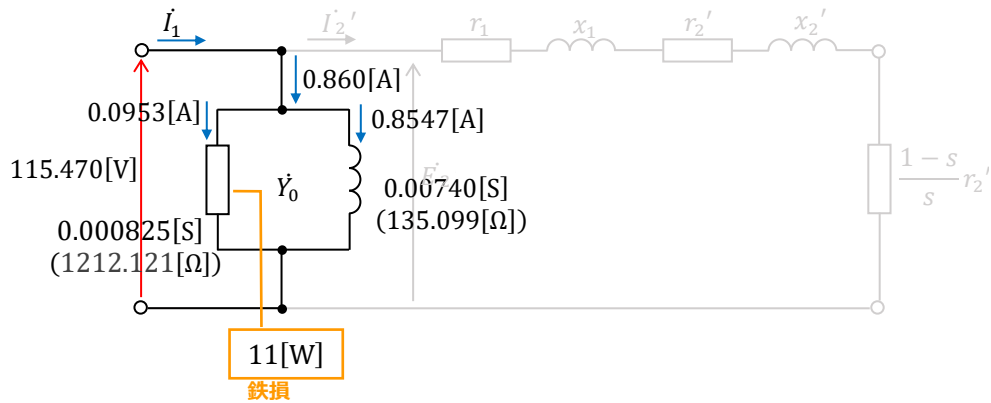


図8 無負荷試験による回路定数と諸量

3. 等価回路と銘板値

メーカーでは等価回路の計算のほか、実負荷での特性確認を行っている。最近ではモータの特性算定に等価回路法は使われておらず、高効率規制によって、より精度の高い実負荷法という方法が用いられている。そのため、銘板値との誤差は少なくなってきているが、試験成績表の等価回路データ（無負荷試験、拘束試験のデータ）は、あくまで同一設計機種代表値であり、機種ごとに差異があることを見越して名板値を決めている。そのような背景から、一般的に等価回路計算結果と銘板値には差が出る。

4. 特性曲線

第2章で求めた等価回路定数をもとにトルクおよび一次入力電流（全電流）を求める。

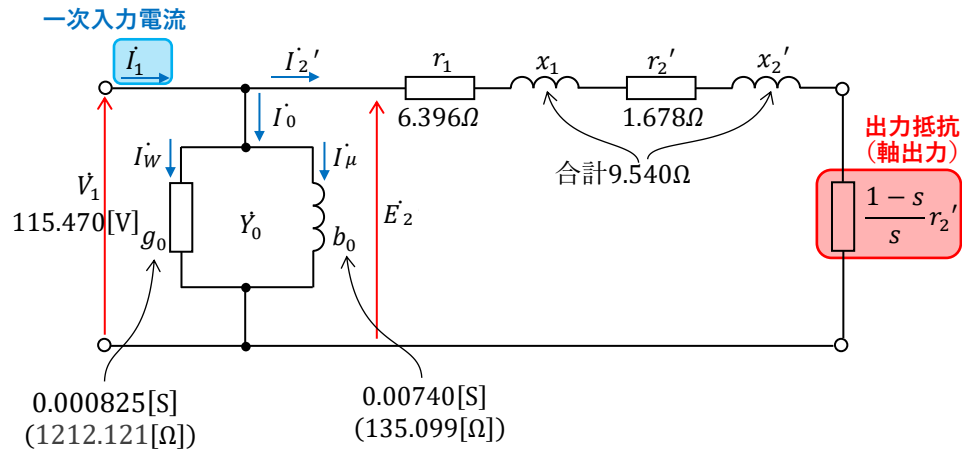


図9 等価回路定数

- \dot{V}_1 : 一次相電圧、 I_1 : 一次全電流、 r_1 : 固定子巻線抵抗、 x_1 : 固定子漏れリアクタンス
- I_2' : 二次電流（一次負荷電流）、 r_2' : 回転子巻線抵抗、 x_2' : 回転子漏れリアクタンス
- I_0 : 励磁電流、 Y_0 : 励磁アドミタンス、 g_0 : 励磁コンダクタンス、 b_0 : 励磁サセプタンス
- $\frac{1-s}{s}r_2'$: 出力抵抗

軸出力 P_m は電動機の角速度 ω_s とトルク τ の積で表される。 $P_m = \omega_s \times \tau$ より

$$\tau = \frac{P_m}{\omega_s}$$

軸出力は等価回路において出力抵抗の消費電力であるから、

$$P_m = 3 \times I_2'^2 \times \frac{1-s}{s} r_2'$$

二次電流 I_2' は等価回路より

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

$$I_2'^2 = \frac{V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

これを軸出力の式に代入すると

$$P_m = 3 \times I_2'^2 \times \frac{1-s}{s} r_2' = \frac{3V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \times \frac{1-s}{s} r_2'$$

すべり s の時の電動機の角速度は $\omega_s = \omega_0(1-s)$ となる。

この式において ω_0 [rad/s] は同期角速度であり、 $\omega_0 = 2\pi \times (N_s/60)$ である。

したがって

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P_m}{\omega_s} = \frac{\frac{3V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \times \frac{1-s}{s} r_2'}{\omega_0(1-s)} \\ &= \frac{3V_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\left\{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2\right\} \omega_0} \quad [N \cdot m] \end{aligned}$$

一次入力電流 I_1 は励磁電流 I_0 と二次電流 I_2' のベクトル和である。

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'$$

まずは、等価回路の合成アドミタンス Y を求める。等価回路より

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= \frac{1}{r_0} + \frac{1}{jx_0} + \frac{1}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right) + j(x_1 + x_2')} \\ &= \frac{1}{r_0} + \frac{r_1 + \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} - j \left\{ \frac{1}{x_0} + \frac{x_1 + x_2'}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \right\} \\ |\dot{Y}| &= \sqrt{\left\{ \frac{1}{r_0} + \frac{r_1 + \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{x_0} + \frac{x_1 + x_2'}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \right\}^2} \end{aligned}$$

したがって、一次入力電流 I_1 は

$$I_1 = V_1 \times |\dot{Y}| = V_1 \times \sqrt{\left\{ \frac{1}{r_0} + \frac{r_1 + \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{x_0} + \frac{x_1 + x_2'}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \right\}^2} \quad [A]$$

表計算ソフトにて回転速度（すべり）を変化させ、トルクおよび一次入力電流を計算で求めた。それに、検査成績表とビジロの測定結果を重ね、特性曲線を描いた。

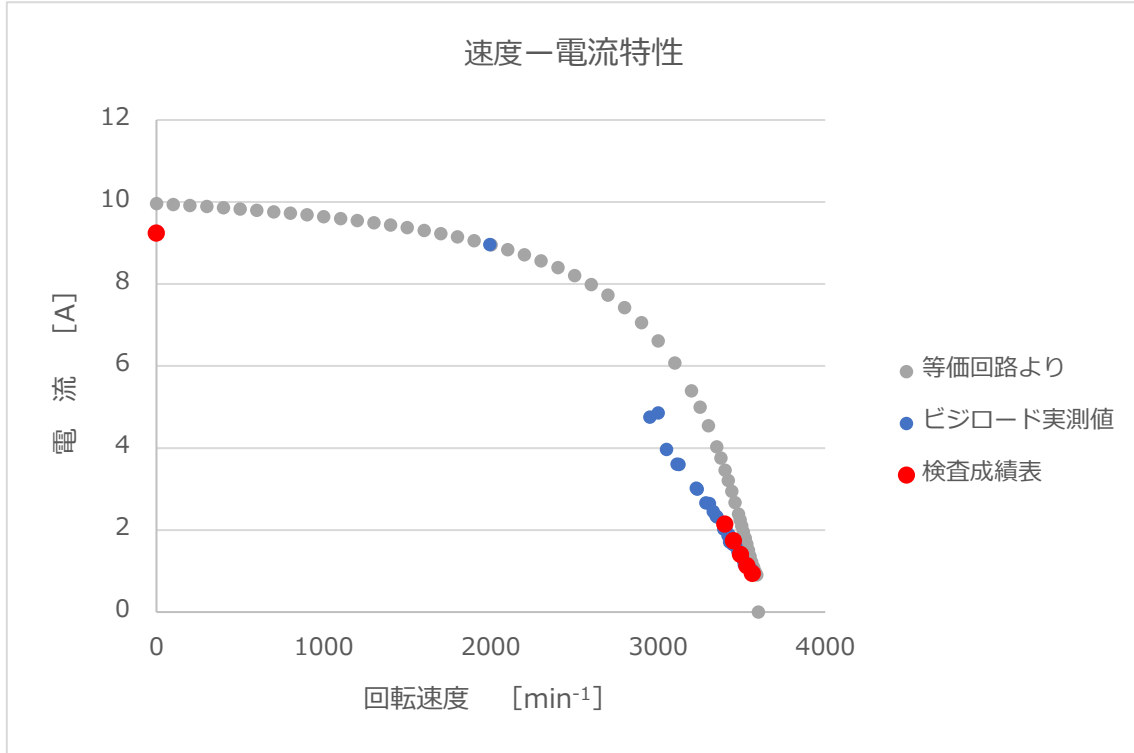
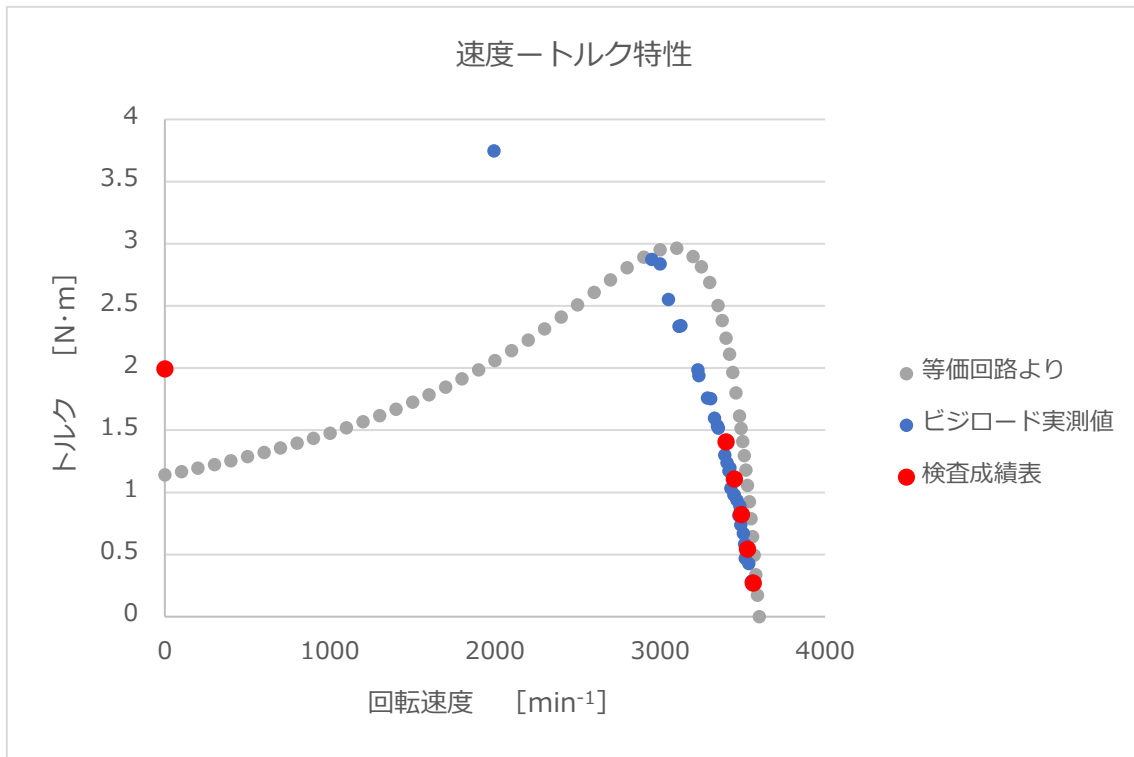


図 10 誘導電動機の特長曲線（速度-トルク、速度-電流）

図 10 はビジロ実測値をもとに描いた負荷特性である。(テキスト 16 ページ参照)

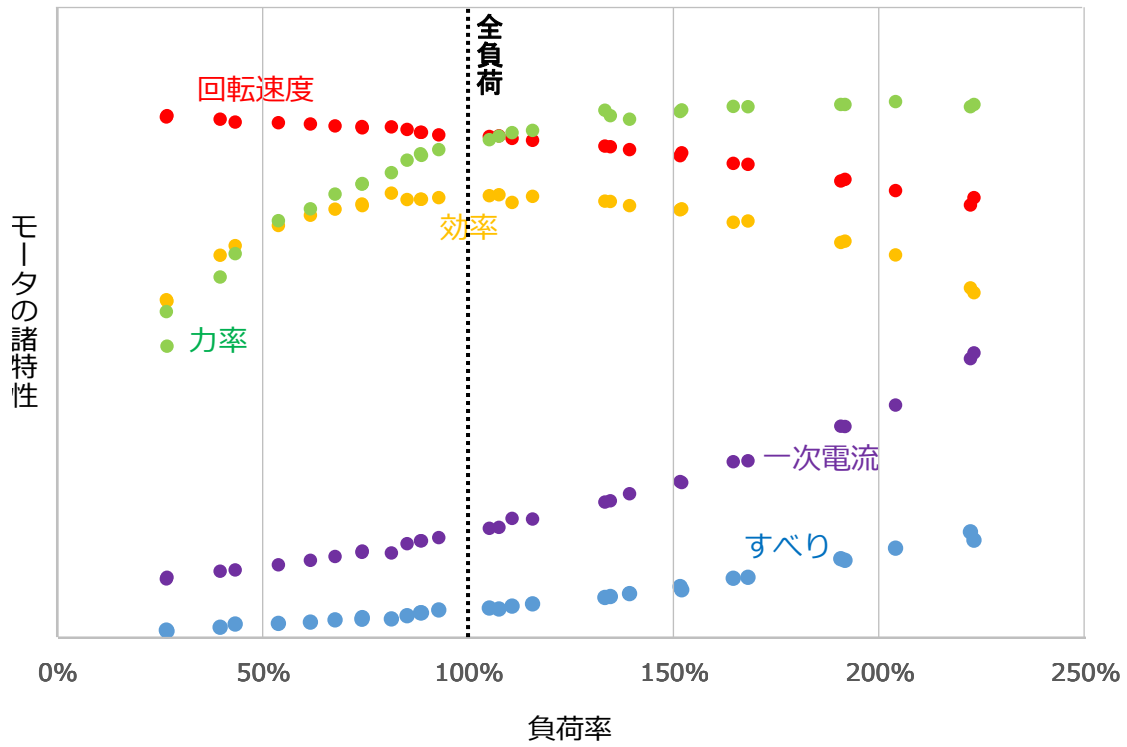


図 10 ビジロ実測値による負荷特性

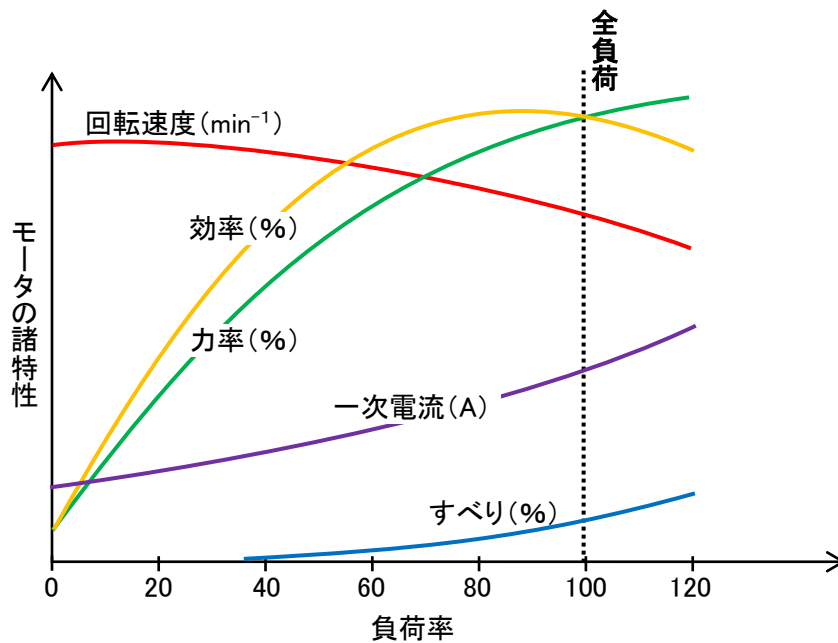


図 11 誘導電動機の一般的な負荷特性

実測データサンプル

表 1 実測データサンプル

オルタネータ 発電電圧	ハロゲンランプ (乗客数)	電源電圧 [V]	電動機電流 [A]	電動機入力 [W]	力率	回転速度 [min ⁻¹]
Low 約 12.8V	大人 0 子供 0	201.5	1.032	185	0.497	3559
	大人 0 子供 3	201.5	1.135	242	0.615	3536
	大人 0 子供 6	201.8	1.246	305	0.711	3512
	大人 0 子供 9	202.4	1.445	428	0.793	3483
	大人 3 子供 0	202.1	1.322	341	0.731	3503
	大人 3 子供 3	202.1	1.456	400	0.773	3485
	大人 3 子供 6	202.0	1.603	455	0.814	3465
	大人 3 子供 9	201.9	1.885	568	0.855	3423
	大人 6 子供 0	200.9	1.706	494	0.832	3428
	大人 6 子供 3	201.1	2.035	595	0.861	3405
	大人 6 子供 6	201.1	2.338	723	0.890	3347
	大人 6 子供 9	200.6	2.649	830	0.900	3306
	大人 9 子供 0	200.2	2.661	830	0.897	3286
	大人 9 子供 3	199.9	3.018	945	0.905	3228
	大人 9 子供 6	199.1	3.966	1249	0.914	3050
	大人 9 子供 9	198.5	4.757	1489	0.905	2950
High 約 14.8V	大人 0 子供 0	202.4	1.006	183	0.556	3552
	大人 0 子供 3	202.3	1.158	258	0.655	3515
	大人 0 子供 6	201.8	1.385	369	0.756	3489
	大人 0 子供 9	201.6	1.655	473	0.822	3447
	大人 3 子供 0	201.4	1.478	402	0.774	3476
	大人 3 子供 3	201.5	1.654	472	0.825	3447
	大人 3 子供 6	201.3	1.867	557	0.849	3417
	大人 3 子供 9	200.4	2.315	715	0.899	3353
	大人 6 子供 0	200.9	2.023	614	0.865	3392
	大人 6 子供 3	200.1	2.454	755	0.884	3329
	大人 6 子供 6	199.8	3.000	928	0.906	3234
	大人 6 子供 9	199.8	3.601	1133	0.909	3125
	大人 9 子供 0	198.9	3.608	1130	0.909	3114
	大人 9 子供 3	198.2	4.854	1515	0.909	3000
	大人 9 子供 6	194.9	8.96	2780	0.819	1994
大人 9 子供 9	—	—	—	—	—	

三相誘導電動機の検査成績表

誘導電動機検査成績表										品番コード MLH1244	
INSPECTION REPORT OF INDUCTION MOTOR											
掛注文主名 Customer					項目 Pos. No.					H0051	
客先番号 Cust's No.					製造番号 Work No.						
機番 Serial No.					試験日 Test date						
用途 Service					承認 Approved by					作成 A.SATOJI	
形式 Type		枠番 Fram		相数 Phase		出力 Out Put		極数 Poles			
MLH8075M		71M		3		0.4 kW		2			
電圧 Volt		周波数 Frequency		電流 Current		回転数 Revolution		耐熱クラス Insul.			
200/200-220 V		50/60 Hz		1.9/1.7-1.7 A		2900/3475-3500 min-1		120(E)			
定格 Rating		二次電圧 Sec. Volt		二次電流 Sec. Current		規格 Rule					
S1		V		A		JISC4210					
特性試験 Characteristics Test											
巻線抵抗 (Ω) Winding Resistance			周囲温度 Amb. Temp.		無負荷試験 No Load Test			拘束試験 Locked Rotor Test			極数 Poles
単相:主 1 Phase: Main		単相:補助 1 Phase: Aux.	Amb. Temp. (°C)	周波数 Frequency (Hz)	電圧(V) Volts	電流(A) Current	入力(W) Watts	電圧(V) Volts	電流(A) Current	入力(W) Watts	Poles
三相:固定子 3 Phase: Stator		三相:回転子 3Phase: Rotor									
10.27			14.0	50	200	1.21	79	36.0	1.9	86	2
10.27			14.0	60	200	0.860	53	36.8	1.7	70	2
10.27			14.0	60	220	1.02	70	36.8	1.7	70	2
負荷特性 Load Characteristics Test											
単相:(実負荷試験) 三相:(等価回路法による) 1 Phase: (Actual Load Test) 3 Phase: (Equivalent Circuit Method)											
		50 (Hz), 200 (V), 2 (P),			60 (Hz), 200 (V), 2 (P),						
負荷率 (%) Load	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
電流 (A) Current	1.27	1.42	1.64	1.93	2.29	0.942	1.13	1.40	1.74	2.14	
効率 (%) Efficiency	53.7	67.6	72.7	74.1	73.5	62.9	74.3	77.4	77.4	75.8	
力率 (%) Power factor	42.4	60.3	72.7	80.7	85.6	48.7	68.7	79.8	85.8	89.0	
滑り (%) Slip	0.90	1.79	2.77	3.90	5.21	0.99	1.92	2.95	4.14	5.55	
						0.82	1.57	2.30	3.20	4.32	
最大出力 (%) Max. Output		50 Hz 200 V		60 Hz 220 V		絶縁抵抗 Insul. Resistance		振動 (全振幅) Vibration (Peak to Peak)			
214		199		239		100 (MΩ)		μm			
最大トルク (%) Breakdown Torque		261		238		絶縁耐力 Dielectric Strength		外観・構造・寸法検査: 良			
225		180		220		1500 (V) for 1 min.		Inspection of Outer View Construction & Dimension: Good			
最小始動トルク (%) Locked Rotor Torque		225		180		220					
最大始動電流 (A) Locked Rotor Current		10.6		9.24		10.2					
TEMP. RISE TEST (TEMP. RISE BY THERMOMETER METHOD, K (AMB. TEMP. 14.0 °C))											
Hz	VOLT (V)	LOAD (%)	HOURS RUN	STATOR (R.M)	FRAME	ROTOR (R.M)	SLIP RING	BEARING DRIVE	ANTI-D.	POLE	
50	200	100	3	57.5	26.5	-	-	35.0	-	2	
Fuji Electric Co.,Ltd.			富士電機株式会社				811 502602 01				

図 12 検査成績表