

三相かご形誘導電動機の高効率化手法と 特性算定法に関する検討

廣塚 功*, 坪井 和男*, 松浦 秀実**, 水野 孝行**

Examination of the Higher Efficiency Technique and Characteristic Calculation Method of the Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor

Isao HIROTSUKA*, Kazuo TSUBOI*,
Hidemi MATSUURA** and Takayuki MIZUNO**

(Received Aug. 31, 2007)

Recently, higher efficiency is strongly desired for the three-phase squirrel-cage induction motor (IM). Therefore, induction motors are required to have smaller losses, which include iron loss, copper loss, mechanical loss and stray load loss (SLL).

In this paper, the losses for eight 2.2kW IMs, which are driven by either a sinusoidal wave source or PWM inverter, are measured by a method based on the segregated-loss method defined by the Standard of the Japanese Electrotechnical Committee (JEC), and calculated using the type-*T* equivalent circuit direct method and the quasi-sinusoidal wave method. As a result, the higher efficiency techniques of IM in four manufactures are clarified. Moreover, it is clearly shown that the SLL is much larger than the SLL of JEC, and the type-*T* equivalent circuit direct method and the quasi-sinusoidal wave method are simple and accurate methods for the characteristic calculation.

Keywords: induction motor, stray load loss, type-*T* equivalent circuit direct method, quasi-sinusoidal wave method, reverse rotation test

1. まえがき

近年、産業用機械における省エネルギー化は重要な課題となっており、三相かご形誘導電動機(以下、IM と略記)の高効率化、すなわち、低損失化が強く望まれている。IM の高効率化には、銅損、鉄損、機械損といった損失の低減はもとより、漂遊負荷損の正確な評価・低減が必要である。IM の損失に対して、損失を分類・考察した研究¹⁾および漂遊負荷損に対する詳細な検討²⁾も見られ、その基本的事項はかなり明確になってきている³⁾。しかし、漂遊負荷損の実態についてはいまだ不明瞭な点も多く、さらに詳細な検討が強く求められている。そこで、筆者らは、市販の汎用標準 IM の漂遊負荷損を含めた諸損失について詳細な検討を行うとともに、漂遊負荷損が特性算定結果に及ぼす影響について検討を行ってきた⁴⁾。

本論文では、これらの研究成果⁴⁾を取りまとめ、さらに整理・加筆し、市販されている 2.2kW-IM の損失の実態を実験的に明らかにするとともに、高効率化の手法を検討

した結果を述べている。さらに、筆者らの一人が提案した *T* 形等価回路直接法⁵⁾および擬似正弦波法⁶⁾は、漂遊負荷損を正確に評価できれば簡便かつ極めて高い精度で特性算定できる有用な方法であることなどを明らかにしている。

2. 供試機の仕様および実験方法

表 1 に供試機の仕様を示す。供試機として A~D 社製の標準 IM および高効率 IM の、都合 8 機種の IM を用いている。なお、A 社製高効率 IM は JIS C 4212¹⁰⁾施行前の高効率 IM、B~D 社製高効率 IM は JIS C 4212 規格対応形高効率 IM を用いている。

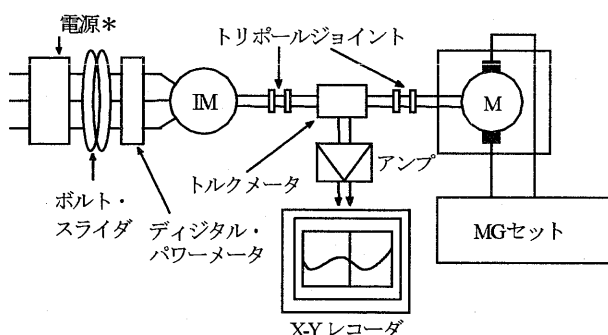
図 1 に実験装置の構成図を示す。電源には、正弦波駆動時ではノイズ遮断型定電圧装置、インバータ(以下、INV と略記)駆動時ではキャリア周波数を変更できる定格容量 5.5kVA、オールデジタル制御、正弦波近似 PWM 方式の三相汎用電圧形 INV を用いている。本実験においては、キャリア周波数を 3kHz(以下、INV_{3kHz} と略記) および 12kHz(以下、INV_{12kHz} と略記)としている。供試機を直流電気動力計に接続し、実負荷試験、動力計法に対する試験および逆回転試験を容易に行えるようにしている。トルクは、トルクメータにより検出し、アンプを介し X-Y レコーダ

* 電気システム工学科 (Department of Electrical Engineering)

** 甲府明電舎 (Kofu Meidensha Electric Mfg. Co., Ltd.)

表 1 供試機の仕様

製造会社	A 社		B 社		C 社		D 社	
	標準	高効率*	標準	高効率*	標準	高効率*	標準	高効率*
IM の種類								
定格電圧 [V]	220	220	220	220	220	220	220	220
定格電流 [A]	8.0	8.0	8.3	9.2	8.6	8.3	8.6	8.8
定格周波数 [Hz]	60	60	60	60	60	60	60	60
定格回転数 [min^{-1}]	1720	1720	1730	1740	1720	1735	1730	1730
極数	4	4	4	4	4	4	4	4
固定子スロット数	36	36	36	36	36	36	36	36
回転子スロット数	44	44	44	44	44	28	28	28
回転子の表面切削	無	有	無	有	有	有	有	有
固定子の巻線形式	単層同心巻	短節巻	同心振分巻	同心振分巻	単層同心巻	単層同心振分巻	単層同心振分巻	単層同心振分巻
一次巻線の巻数	—	—	20×2, 41	16×2, 33	42	39	45	39
一次巻線の線径 [mm]	$\phi 0.70$	$\phi 0.86$	$\phi 0.9$	$\phi 0.8,$ $\phi 0.75$	$\phi 0.95$	$\phi 0.85$	$\phi 0.95$	$\phi 0.7,$ $\phi 0.75$

*: JIS C 4212⁽¹¹⁾施行前の高効率 IM

※電源：正弦波駆動時にはノイズ遮断型定電圧装置，
INV駆動時には正弦波近似PWMインバータを使用

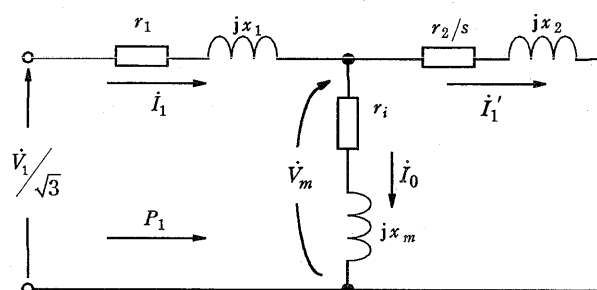
図1 実験装置の構成図

で直接記録している。正弦波電源およびキャリア周波数 3kHz の INV 電源のいずれの電源で駆動した場合であっても、印加電圧を定格電圧 220V、定格周波数 60Hz とした。

本論文では、漂遊負荷損を以下の 3 通りの方法で評価することとした。

- (1) JEC-2137⁽¹¹⁾の等価回路法により、定格出力時の漂遊負荷損を定格出力の 0.5% とする。この漂遊負荷損を G_{JEC} (W) とする。
- (2) JEC-2137 の動力計法により求めた漂遊負荷損を G_{dyn} (W) とする。動力計法においては、供試機の諸特性および漂遊負荷損を除いた損失を求めた後に G_{dyn} を算出している。従って、本論文では、この算出過程で得られた諸特性を実測値と称することとする。
- (3) ASA C 50.20 の逆回転法⁽¹²⁾により求めた漂遊負荷損を G_{rev} (W) とする。

特性算定には、正弦波駆動時では T 形等価回路直接法⁹⁾、INV 駆動時では擬似正弦波法⁹⁾を用いた。図 2 に T 形等価回路および擬似正弦波 T 形等価回路を示す。紙面の都合上、2 種類の方法を同一回路で表しているが、擬似正弦波法の場合、各諸量に電源電圧に含まれる時間高調波の影響を含ませている。 T 形等価回路直接法および擬似正弦波法は、巻線の温度換算、拘束試験時の励磁回路の補正、



等価回路中の文字の意味

	T 形等価回路直接法の場合	擬似正弦波法の場合
$\hat{V}_1$	一次線間電圧	整流形電圧計の指示値に対応する一次線間電圧
$\hat{i}_1$	入力線電流	可動鉄片形電流計の指示値に対応する入力線電流
$\hat{i}_1'$	二次電流	上記に対応する二次電流
$\hat{i}_0$	励磁電流	上記に対応する励磁電流
P_i	有効電力	DPM の指示値に対応する有効入力
r_1	一次巻線抵抗	一次巻線抵抗
r_2	二次抵抗	擬似正弦波二次抵抗
r_i	等価鉄損抵抗	擬似正弦波等価鉄損抵抗
$x_{1,2}$	一次、二次漏れリアクタンス	擬似正弦波一次、二次漏れリアクタンス
x_m	励磁リアクタンス	擬似正弦波励磁リアクタンス

図2 T 形等価回路

運転時の二次周波数に対応した二次抵抗の決定などを考慮して回路定数を定め、 T 形等価回路もしくは擬似正弦波 T 形等価回路そのものを用いて特性算定する方法である。 T 形等価回路直接法における漂遊負荷損は、[二次理論的出力の二乗]/[定格出力] の 0.5% として算出している。また、擬似正弦波法における漂遊負荷損は、有効トルク係数 K_t を用いて求めており、電源が正弦波である場合の空間

高調波に対する損失(空間高調波漂遊負荷損)と電源が INV であるために生じる時間高調波に対する損失(時間高調波損失)との和として算出している。この方法における定格出力時における漂遊負荷損は、JEC-2137 の等価回路法に準じて、定格出力の 0.5% である。しかし、小形機の漂遊負荷損は小さく見積もられすぎることが指摘されている¹³⁾。

そこで、特性算定精度の更なる向上のために、逆回転法による漂遊負荷損値そのものを、T 形等価回路直接法および擬似正弦波法に適用して特性算定を行う。すなわち、正弦波電源で逆回転試験を用い、定格出力時における漂遊負荷損を求め、定格出力に対する漂遊負荷損の割合 C_{SL} (%) を求める。 C_{SL} を用い、T 形等価回路直接法の場合には(1)式、擬似正弦波法の場合には(2)式として漂遊負荷損を求め、特性算定を行った。その効率の算定値を η_{rev} (%) とする。なお、T 形等価回路直接法および擬似正弦波法そのものでは $C_{SL}=0.5$ として漂遊負荷損を算出している。

$$\frac{(\text{理論的二次出力})^2}{\text{定格出力}} \times \frac{C_{SLL}}{100} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{(\text{理論的二次出力})^2}{\text{定格出力}} \times K_r \times \frac{C_{SLL}}{100} + (1-K_r) \times \text{Rated output} \dots\dots (2)$$

3. 実験結果と検討

3.1 漂遊負荷損の評価結果

表 2 に漂遊負荷損の測定結果および特性算定に用いる C_{SL} を示す。いずれの供試機においても正弦波駆動時および INV 駆動時における G_{JEC} は定格出力の 0.5% の 11W である。 G_{JEC} に対して G_{dyn} および G_{rev} は、正弦波駆動時において約 1~5 倍、INV_{3kHz} 駆動時において約 2~7 倍、INV_{12kHz} 駆動時において約 2~6 倍となった。また、漂遊負荷損の定格出力に対する割合は、正弦波駆動時には約 0.5~2.5%、INV_{3kHz} 駆動時には約 1.1~3.6%、INV_{12kHz} 駆動時には定格出力の約 1.1~3.1% であった。IM の特性算定法として最も幅広く利用されている JEC-2137 の等価回

路法での漂遊負荷損 G_{JEC} は小形機において小さく見積もられすぎていると指摘¹³⁾されており、いずれの電源で駆動した場合においても、その指摘と同様な結果となった。T 形等価回路直接法においても、 G_{JEC} に近い値となる。このことから、漂遊負荷損が T 形等価回路直接法および擬似正弦波法の特性算定精度に大きな影響を及ぼしていることは明らかであり、特性算定精度の向上には、駆動電源も考慮した漂遊負荷損のより正確な評価が必須となる。

そこで、本論文では、負荷装置を必要とせずを求めることができる G_{rev} の定格出力に対する割合を C_{SL} とし、T 形等価回路直接法および擬似正弦波法に適用することとした。

なお、 G_{dyn} と G_{rev} とには若干差異は、逆回転試験時には実負荷時に対して磁気飽和の程度が低い、励磁回路の影響を考慮していないなどに起因している¹²⁾。

3.2 等価回路定数から見た IM の高効率化の手法

表 3 に供試機の等価回路定数を示す。正弦波駆動時には T 形等価回路直接法、INV 駆動時には擬似正弦波法に従って求めた。

高効率 IM の一次巻線抵抗は、各社標準 IM に対し約 59~75% に低減されている。特に、A 社製高効率 IM の一次巻線抵抗は、同標準 IM に対し、一次巻線の線径を太くして約 59% に低減している。

高効率 IM の一次および二次漏れリアクタンスは、各社標準 IM に対しほとんどのメーカーにおいて低減されている。しかし、C 社製高効率 IM および D 社製高効率 IM の一次および二次漏れリアクタンスは、標準 IM とほぼ同じまたは増加している。INV 駆動時における擬似正弦波一次および二次漏れリアクタンスは、キャリア周波数の増加に伴い、増加する傾向にある。

高効率 IM の等価鉄損抵抗は、各社標準 IM に対し約 40~82% に低減されている。特に、A 社製高効率 IM および C 社製高効率 IM は、標準 IM に対し大幅に低減されている。これは、固定子体積を大きくすることにより鉄心中の磁束密度を下げ、さらに低損失の鉄心材料を採用したためと考えられる。

ほとんどの高効率 IM の励磁リアクタンスは、各社標準 IM に対し低減されている。これは、高効率 IM の一次巻線の巻数が、標準 IM に対し少なくなったためであると考えられる。しかし、C 社製高効率 IM の励磁リアクタンスは、一次巻線の巻数をほぼ同一としているため、標準 IM とほぼ同じ値となった。

T 形等価回路直接法および擬似正弦波法においては、二次抵抗を運転時の二次周波数に対応した二次抵抗とするため、周波数に依存しない直流分と周波数に依存する成分とに分離している。高効率 IM の直流分は、各社標準 IM に対し約 76~95% に低減されている。また、周波数に依存す

表 2 漂遊負荷損の測定結果

電源		A 社		B 社		C 社		D 社	
		標準	高効率	標準	高効率	標準	高効率	標準	高効率
正弦波	G_{JEC} (W)	11	11	11	11	11	11	11	11
	G_{dyn} (W)	38	24	29	52	34	28	34	11
	G_{rev} (W)	42	24	30	39	55	38	38	23
	C_{SLL} (%)	1.91	1.09	1.36	1.77	2.50	1.73	1.73	1.05
INV _{3kHz}	G_{JEC} (W)	11	11	11	11	11	11	11	11
	G_{dyn} (W)	57	76	50	67	61	38	62	32
	G_{rev} (W)	46	30	35	42	56	43	43	25
	C_{SLL} (%)	2.09	1.36	1.59	1.91	2.55	1.95	1.95	1.14
INV _{12kHz}	G_{JEC} (W)	11	11	11	11	11	11	11	11
	G_{dyn} (W)	54	69	41	52	56	31	52	25
	G_{rev} (W)	49	30	34	41	54	44	44	25
	C_{SLL} (%)	2.23	1.36	1.55	1.86	2.45	2.00	2.00	1.14

表 3 等価回路定数

電源		A 社		B 社		C 社		D 社	
		標準	高効率	標準	高効率	標準	高効率	標準	高効率
正弦波	r_1	0.923	0.541	0.69	0.441	0.700	0.431	0.733	0.528
	$x_1 = x_2$	1.330	1.053	1.158	0.846	1.281	1.408	1.373	1.305
	r_j	2.169	1.102	1.715	1.044	4.142	1.641	1.862	1.169
	x_m	34.24	29.38	27.75	21.55	32.17	32.15	27.83	26.65
	r_2	0.524+ 0.271 s	0.499+ 0.174 s	0.536+ 0.216 s	0.405+ 0.194 s	0.582+ 0.234 s	0.496+ 0.250 s	0.479+ 0.258 s	0.407+ 0.211 s
INV 3kHz	r_1	0.924	0.541	0.690	0.441	0.700	0.431	0.733	0.528
	$x_1 = x_2$	1.396	1.107	1.199	0.871	1.325	1.467	1.429	1.359
	r_j	2.432	1.218	1.972	1.269	4.667	1.89	2.125	1.376
	x_m	34.48	29.40	28.24	22.00	32.29	31.84	28.09	26.97
	r_2	0.555+ 0.271 s	0.526+ 0.174 s	0.555+ 0.216 s	0.413+ 0.194 s	0.607+ 0.234 s	0.505+ 0.250 s	0.508+ 0.258 s	0.419+ 0.211 s
INV 12kHz	K_τ	0.984	0.981	0.988	0.993	0.984	0.995	0.983	0.990
	r_1	0.923	0.541	0.690	0.441	0.700	0.431	0.733	0.528
	$x_1 = x_2$	1.453	1.122	1.236	0.911	1.372	1.510	1.474	1.404
	r_j	2.329	1.115	1.915	1.183	4.454	1.808	2.046	1.305
	x_m	35.31	29.96	29.13	22.27	30.00	32.38	28.84	27.32
INV 12kHz	r_2	0.554+ 0.271 s	0.521+ 0.174 s	0.553+ 0.216 s	0.410+ 0.194 s	0.600+ 0.234 s	0.503+ 0.250 s	0.497+ 0.258 s	0.418+ 0.211 s
	K_τ	0.986	0.984	0.990	0.996	0.993	0.997	0.990	0.992

る成分は、各社標準 IM に対し約 46~107%であり、供試機によって大きく異なる結果となった。

高効率 IM の有効トルク係数は、各社標準 IM とほぼ同じ値であった。有効トルク係数は、拘束試験時の一次電流と巻線温度が等しいとした時の正弦波駆動時に対する INV 駆動時の入力比であり、正弦波駆動時に対して、INV 駆動時に有効トルクとして寄与する割合を示している。INV 駆動時の入力比は、正弦波駆動時の入力に INV の高調波損失を付加した値となるため、有効トルク係数は理論上、1 以下となる。標準 IM、高効率 IM のいずれの供試機においても INV 駆動時のキャリア周波数を高くすると 1 に近くなる傾向にある。すなわち、特性に及ぼす時間高調波の影響が少なくなる傾向にある。C 社製高効率 IM の有効トルク係数は、INV 駆動時キャリア周波数 3kHz で 0.995、INV 駆動時キャリア周波数 12kHz で 0.997 となり、供試機の中で最も 1 に近い値となった。C 社製高効率 IM の一次および二次漏れリアクタンスは、最も大きくなった。これにより高調波電流が抑制され、時間高調波の影響を低減していると考えられる。

以上のように、等価回路定数の面から各社の高効率化の手法を明らかにすることができた。

3.3 特性評価結果から見た IM の高効率化の手法

表 4 に、一例として、B 社製および D 社製 IM の諸特性の実測結果および算定結果を示す。

ほとんどの高効率 IM の実負荷試験時の温度は、各社標準 IM に対し低下している。これは、一次電流を低減したことや冷却ファンを取り付けたためである。しかし、B 社製高効率 IM の実負荷試験時の温度は、B 社製高効率 IM の

表 4 諸特性の実測結果と算定結果例

電源		B 社				D 社			
		標準		高効率		標準		高効率	
正弦波		実測	算定	実測	算定	実測	算定	実測	算定
		温度(°C)		65.3		72.9		59.4	
		一次電流(A)		8.21		8.29		8.96	
		回転数(min ⁻¹)		1729		1734		1744	
		力率(%)		83.0		81.2		74.9	
INV 3kHz		効率(%)		84.7		84.9		86.0	
		温度(°C)		65.4		78.7		64.7	
		一次電流(A)		8.44		8.37		9.04	
		回転数(min ⁻¹)		1727		1730		1743	
		力率(%)		82.4		81.8		75.5	
INV 12kHz		効率(%)		83.1		83.5		84.6	
		温度(°C)		66.2		75.5		60.1	
		一次電流(A)		8.50		8.28		9.08	
		回転数(min ⁻¹)		1724		1730		1741	
		力率(%)		81.4		82.2		74.6	
INV 12kHz		効率(%)		83.4		84.0		85.2	
		温度(°C)		66.2		75.5		60.1	
		一次電流(A)		8.50		8.28		9.08	
		回転数(min ⁻¹)		1724		1730		1741	
		力率(%)		81.4		82.2		74.6	

一次電流が標準 IM より大きいと、標準 IM より高くなったものと考えられる。

各社高効率 IM の一次電流は、標準 IM に対し B 社製高効率 IM を除き低減されている。これにより、実負荷試験時の温度上昇を抑え、一次抵抗損の低減およびコイル絶縁の長寿命化を図ることができる。B 社製高効率 IM においては、他の供試機より全インピーダンスが約 0.2~1.8Ω 低いため、一次電流が大きくなっている。なお、正弦波駆動時および INV 駆動時における一次電流の誤差率は、約 0.3~4.2%と良好に算定されている。

各社高効率 IM の回転数は、標準 IM に対し約 8~27min⁻¹ 高くなり、いずれも良好に算定できた。同一出力とすると回転数はトルクに反比例し、トルクは二次電流の関数となる。このことから、高効率 IM は回転数を高くすることで、二次電流を小さく抑え、二次抵抗損を低減している。

各社高効率 IM の力率は、標準 IM に対し約 3.0~8.1%程度低下している。この原因として、高効率 IM の抵抗分の低減割合がリアクタンス分の低減割合に比べて大きくなったためと考えられる。

各社高効率 IM の効率は、標準 IM に対し約 0.6~8.0%改善されている。また、正弦波駆動時に対する INV 駆動時の効率は、0.7~2.9%低下している。この原因は、INV の出力電圧に含まれる多数の時間高調波により高調波損失が増加し、効率が低下したものである。また、INV 駆動時の効率はキャリア周波数の増加に伴い、正弦波駆動時の効率に近づく傾向にある。この原因として、キャリア周波数の増加に伴い、INV の出力電圧波形に低次の時間高調波成分が少なくなるためである。正弦波駆動時および INV 駆動時における効率の誤差は、約 1%以下であり、ほとんど場合、算定値の効率は実測値に比べ高めに算定された。

以上のように、正弦波駆動時においては T 形等価回路直接法、INV 駆動時においては擬似正弦波法を用い、漂遊負荷損の評価を工夫することで、簡便かつ実用上精度よく IM の特性算定を行うことができることを示すことができた。

図3に供試機の損失の実測結果を示す。

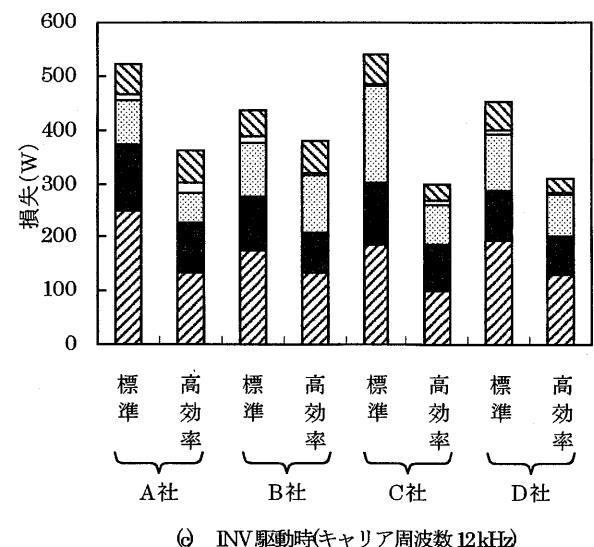
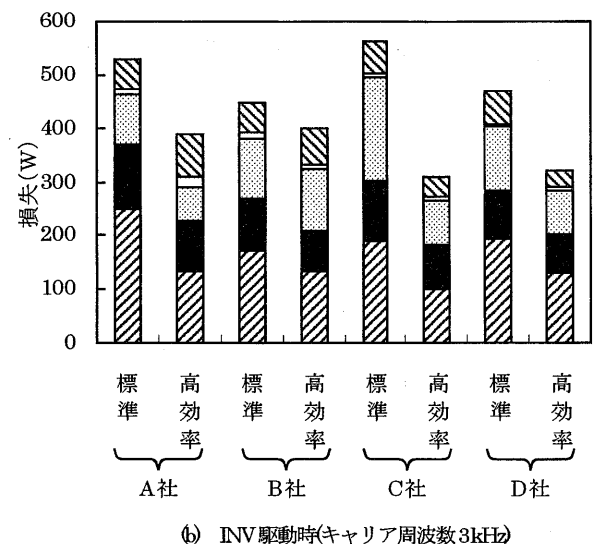
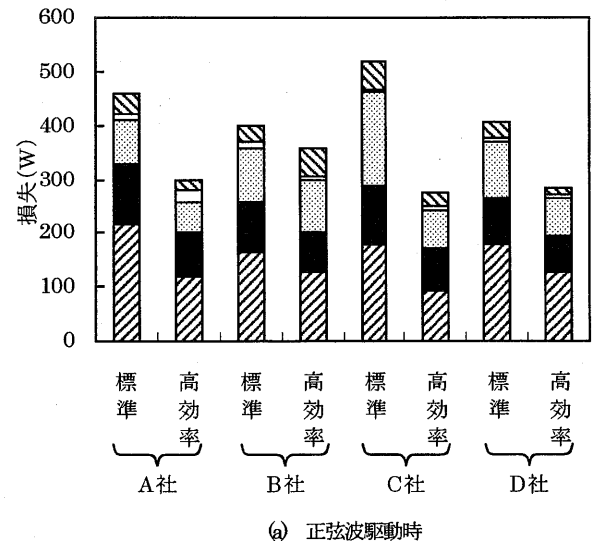
各社高効率 IM の一次抵抗損は、標準 IM に対し 50～80%に低減されており、特に A 社製および C 社製高効率 IM では約 50%に低減されている。A 社製高効率 IM の場合、表 1 および表 3 に示したように、巻線径を太くして、C 社製高効率 IM の場合、コイルエンド長を短くして、それぞれ r_1 を約 60%に低減しているためである。

各社高効率 IM の二次抵抗損は、標準 IM に対し 70～80%に低減されている。二次抵抗損とは、一次抵抗損と同じく二次導体に二次電流が流れることにより発生するジュール熱損失であり、出力を同一とすると回転数と二次電流とは反比例する。前述のように、各社高効率 IM の回転数は、標準 IM より高くなっているため、二次電流が減少し、二次抵抗損を低減しているものと考えられる。特に、D 社製高効率 IM の二次抵抗損は、最も低くなっている。これは、D 社製高効率 IM の定格負荷時における回転数が他の供試機に比べ高く、二次抵抗が他の供試機に対して最も小さくなっているためである。

A 社製および D 社製高効率 IM の鉄損は、標準 IM に対し約 70%、B 社製の場合、ほぼ同じ、D 社製の場合、約 40%であり、各社全く異なる値となった。鉄損の低減策として、低損失の鉄心材料を使用すること、鉄心の積厚を薄形化しうず電流損を低減させること、固定子鉄心の体積を大きくすることにより、磁束密度を低減させることなどが挙げられる。いずれの高効率 IM においても標準 IM より固定子および回転子鉄心の体積を大きくしていることを確認しており、 r_1 も低減されている。A 社製高効率 IM の場合、固定子鉄心体積が最も大きいので、鉄損が最も小さくなったものと考えられる。また、C 社製高効率 IM の場合、一次電流が最も小さく、一次巻線の巻数も少ないためであると考えられる。なお、B 社製高効率 IM の鉄損が低減していない理由はさらに検討を要するものと考えている。

各社 IM の機械損は非常に小さく、定格出力の 0.2～0.8%であった。A 社製および C 社製高効率 IM の場合、標準 IM より機械損が増大している。これは、上述のように、鉄損低減のために回転子鉄心体積、すなわち回転子重量の増加により軸受の摩擦損が増大したためであると考えられる。一方、B 社製高効率 IM ではファンの小型化等により機械損を低減したものと考えられる。

高効率 IM の漂遊負荷損は、B 社製高効率 IM を除き、標準 IM より低減されているが、定格出力の 1～3%となっている。しかし、D 社製高効率 IM では、正弦波駆動時で定



: 鉄損 : 機械損 : 漂遊負荷損
 : 一次抵抗損 : 二次抵抗損

図3 損失分析結果

格出力の 0.5%であった。D 社製高効率 IM では、回転子スロット数を固定子スロット数の 0.78 倍とすることにより、回転子導体の横流損を低減¹⁹⁾させた結果であると考えられる。

正弦波駆動時に対して INV 駆動時において各損失は、機械損を除いて増加している、すなわち、効率が低下している。これは、INV の出力電圧に含まれる多数の時間高調波により高調波損失が増加したためである。また、INV 駆動時においてキャリア周波数の増加に伴い、機械損を除く各損失が正弦波駆動時の値に近づく傾向にある。これは、キャリア周波数の増加に伴い、INV の出力電圧波形に低次の時間高調波成分が少なくなるためである。

以上のように、動力計法により各損失を求め、各社の高効率化手法の一部を明らかにすることができた。しかし、例えば、一次抵抗損を低減するため、一次巻線の断面積を増加させるために固定子スロットの断面積を増加させると、固定子鉄心の体積が減少する。この結果、鉄損の増加につながるなど、損失低減の方法をすべて取り入れることは極めて困難であり、いかにして損失配分を適正化し全損失の最小化を図るかという点など、なお詳細な検討が必要と考えられる。

4. あとがき

本論文では、4 社、8 機種種の供試 2.2kW IM の諸特性を詳細に求め、各社の高効率化の手法の一部を明らかにするとともに、簡便かつ高い精度の特性算定法について検討した。その結果得られた主要な結論は以下のようである。

- (1) 高効率 IM と標準 IM とを、諸特性および等価回路定数のみならず構造も含めて比較し、IM の高効率化の手法の一部を明らかにした。すなわち、固定子巻線、固定子および回転子鉄心、冷却ファンなどといった IM の各部における工夫箇所、さらに、これらの配分の重要性を明らかにした。
- (2) JEC-2137 で定義されている漂遊負荷損は小さすぎる機種が多かった。すなわち、本論文で用いた IM の漂遊負荷損は、定格出力時において、定格出力の約 1~3% であった。
- (3) 正弦波駆動時における漂遊負荷損を求め、これを T 形等価回路直接法および擬似正弦波法に適用した特性算定法を用いれば、簡便かつ実用上十分な精度の特性算定が可能であることを明らかにした。また、時間高調波の影響を含む INV 駆動時においても、正弦波駆動時で求めた漂遊負荷損を擬似正弦波法に適用することで高い精度の特性算定ができた。

本論文がこの種の研究開発に何らかの寄与ができれば幸いである。

最後に、膨大かつ詳細な実験および緻密なデータ整理にご協力頂いた中部大学工学研究科博士前期課程電気工学専攻 平手宏昌氏(現、愛知エレクトリック(株))をはじめ、中部大学工学部電気システム工学科卒業研究生諸氏に深甚なる感謝の意を表します。

なお、本論文の一部は、科研費(18560289)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 例えば, P. L. Alger : "Induction Machines", Gordon and Breach Science Pub. (1970)
- 2) 誘導機専門委員会 : 「誘導機の漂遊負荷損」 電気学会技術報告, 58 (1963-8)
- 3) 交流機の損失評価技術調査専門委員会 : 「誘導機と同期機の損失評価技術」 電気学会技術報告, 967 (2004-8)
- 4) 高橋洋介・廣塚功・坪井和男・中村雅憲 : 「三相かご形誘導電動機の漂遊負荷損の実態に関する実験的検討 (第 5 報) - 四通りの算出法における正弦波駆動時とインバータ駆動時との比較 -」 回転機研資 RM-02-23 (2002-5)
- 5) 高橋洋介・坪井和男・廣塚功・中村雅憲 : 「三相かご形誘導電動機の漂遊負荷損が特性算定結果に及ぼす影響」 回転機研資 RM-02-122 (2002-10)
- 6) 平手宏昌・坪井和男・廣塚功・中村雅憲 : 「三相かご形誘導電動機の特性算定法の改善に関する検討 (第 3 報)」 電気学会回転機研資 RM-04-114 (2004-10)
- 7) H. Hirate, K. Tsuboi, I. Hirotsuka, M. Nakamura : "Effects of the Stray Load Loss on Performance Calculation for a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor" ICEMS 2004, PJ-7 (2004-11)
- 8) 坪井和男・山本竜彦 : 「普通かご形誘導電動機の運転特性算定のための定数決定法」 回転機研資 RM-86-15 (1986-4)
- 9) 坪井和男・山本竜彦・日比野定良 : 「擬似正弦波法による正弦波 PWM インバータ駆動誘導電動機の運転特性の算定」, 電学論 107D, No.10, pp.1213 (1987-10)
- 10) 日本工業標準調査会 : 「JIS C 4212 : 2000 高効率三相かご形誘導電動機」 日本規格協会
- 11) 電気規格調査会 : 「JEC-2137-2000 誘導機」 電気書院
- 12) Theodore.H.Morgan, William.E.Brown, Arthur J.Schumer : "Reverse-Rotation Test Determination of Stray Load Loss in Induction Machines" AIEE Transaction, 58, 319 (1939-7)
- 13) 誘導電動機の特性試験法調査専門委員会 : 「誘導電動機の新特性算定法の提案」 電気学会技術報告, 435 (1992-9)
- 14) 堀孝正 : 「パワーエレクトロニクス」 オーム社 (1996-12)