

小型三相インダクションモーター

FH シリーズの高効率化技術

本間 正

High-efficiency technology for the **FH** Series small three-phase induction motor

Tadashi HOMMA

With global warming, the environmental problems have become important action assignments, and the transition to the low-carbon society is being requested. It is assumed that the power consumption of electric motors occupies about 40% of the total power consumption in the world, and a promotion to high efficiency is requested for small electric motors, too. We lined up the **FH** Series of the high-power, high-efficiency three-phase induction motors corresponding to it. In this article, we introduce the loss analysis of the small three-phase induction motor, the high-efficiency technology that was adopted by the **FH** Series, and the characteristics comparison with the conventional products, etc.

1. はじめに

地球温暖化によって地球環境問題が重要な課題となっており、低炭素社会への移行が求められています。産業用モーターの電力消費は世界の総発電量の 30%~40%と見積もられています⁽¹⁾。出力 0.75kW~375kWの三相インダクションモーターでは、電力消費に大きな影響を与えているモーターの効率に対し、新たな効率クラス (IEC60030-20) や効率測定方法 (IEC60034-2-1) が国際規格として制定されました。この規格を活用し電力消費量を削減するために、産業用モーターの分野では世界的な最小エネルギー効率基準の運用が始まろうとしています。

小型モーターにおいても消費電力の削減が課題となっています。当社ではこれに対応し、高出力・高効率三相インダクションモーターの FH シリーズをラインアップしました。ここでは、小型三相インダクションモーターの損失の分析と、FH シリーズで採用した高効率化技術及び従来品との特性比較などを紹介します。



図1 FHシリーズ 端子箱タイプの外観

2. インダクションモーターの損失

2.1. モーターの構造と損失の分類

モーターとは、電気エネルギーを機械エネルギーに変換する電力機器です。モーターが電磁力によりトルクを発生するためには、ステータとロータが必要です (図2)。



図2 インダクションモーターの構造

エネルギーの変換が効率 100%であれば、電気エネルギー (入力) = 機械エネルギー (出力) になりますが、モーターの動作原理、構造及び使用する材料特性により回転中に以下のような損失が発生します。

- ・一次銅損 : ステータで発生
- ・二次銅損 : ロータで発生
- ・鉄損 : ステータ及びロータで発生
- ・機械損 : ボールベアリング等の機構部品で発生
- ・漂遊負荷損 : 上記以外の損失

各種損失を含めたエネルギーフローを図3に示します。

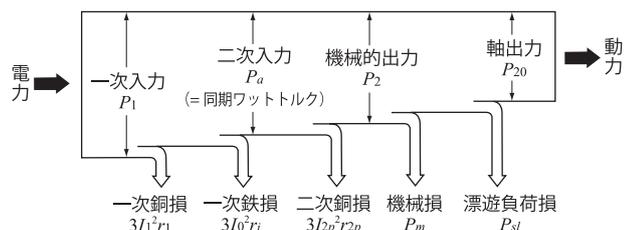


図3 インダクションモーターのエネルギーフロー⁽²⁾

2.1.1. 一次銅損

銅損は抵抗に電流が流れることによって発生するジュール損失で、一次銅損はステータに流れる電流（一次電流 I_1 ）によって巻線（一次抵抗 r_1 ）に発生する損失です。三相モーターの一次銅損は $3 \cdot I_1^2 \cdot r_1$ となります。負荷が増えたと一次電流も増加するため一次銅損が大きくなります。

2.1.2. 二次銅損

ロータにはバーやエンドリングといった電流路があり、それらの部分に電流（二次電流）が流れることで損失が発生します。負荷が増えたと二次電流が増加するため二次銅損は大きくなります。



図4 ロータのバーとエンドリング

2.1.3. 鉄損⁽³⁾⁽⁴⁾

鉄損はステータやロータの鉄心中に交番磁束が通ることによって発生する損失で、ヒステリシス損 W_h （交流磁界により強磁性体を磁化させたときに磁区方向が変化することによって発生する損失）と渦電流損 W_e （交流磁界により磁化が時間的に変化したときに電磁誘導によって流れる渦電流により発生する損失）に大別されます。単位質量当りの鉄損 W_f の値は、式(1)のように表されます。

$$W_f = W_h + W_e \dots\dots\dots(1)$$

また、ヒステリシス損 W_h と渦電流損 W_e はそれぞれ次のように表されます。

$$W_h = B^2 \cdot \sigma_h \cdot (f/100) \dots\dots\dots(2)$$

$$W_e = B^2 \cdot \sigma_e \cdot d^2 \cdot (f/100)^2 \dots\dots\dots(3)$$

- W_f : 鉄損[W/kg]
- W_h : ヒステリシス損[W/kg]
- W_e : 渦電流損[W/kg]
- B : 磁束密度[T]
- f : 周波数[Hz]
- d : 板厚[mm]
- σ_h : ヒステリシス損係数
- σ_e : 渦電流損係数

なお、 σ_h や σ_e は材料により異なります。

式(2)、式(3)より周波数が一定の場合は磁束密度や電磁鋼板の板厚の違いにより鉄損が左右されることがわかります。実際のモーターには、さらに製造時のストレスによって材料特性が劣化する影響が加わります。

2.1.4. 機械損

ボールベアリングや粉塵浸入防止を目的としたシャフト部のシール部品によって発生する摩擦損失や、冷却ファン付の場合は羽根と空気の摩擦による損失です。

2.1.5. 漂遊負荷損

全損失から一次銅損、二次銅損、鉄損、機械損を差し引いたもので一般的には出力の0.5%程度とされています⁽⁵⁾。

2.2. 従来品の損失内訳

従来品の出力90W機（5IK90A-SW2）の200V50Hz定格負荷時における損失割合を図5に示します。なお、漂遊負荷損については損失が小さいことと、損失を分離することが難しいことから分離をしていません。

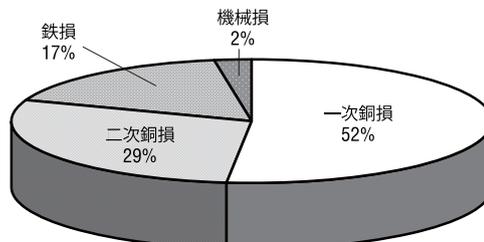


図5 従来品の損失割合

一次及び二次銅損の割合が大半を占めていることがわかります。その理由としては、抵抗値が高いことがあげられます。一次側（ステータ）は、モーターサイズが小さくなるほど所定のスペースに必要な銅線の巻数が多くなり、

銅線径が小さくなることから抵抗値が増えます。また、一次抵抗が大きいほど二次抵抗も大きくなります。

さらに、二次銅損は同じ負荷トルクでもすべり（式（4）参照）が大きいと増加する傾向があります。

$$s = (N_s - N) / N_s \quad \dots\dots\dots(4)$$

- s : すべり
- N_s : 同期回転速度[r/min]
- N : ロータの回転速度[r/min]

鉄損については、小型モーターの場合は鉄心の質量が小さいこと、通常インダクションモーターを使用する際は周波数が高くない（50Hz/60Hz）ことから極度に磁束密度を高めない限り大きくなりませんが、損失割合は17%を占めています。以上のことから、一次銅損と二次銅損及び鉄損について改善の余地があります。

3. FHシリーズに採用した高効率化技術

FHシリーズは各種損失を低減するためにモーター設計を見直しました。以下に、高効率化を実現するための技術を紹介します。

3.1. ステータ/ロータ鉄板の最適設計

三相インダクションモーターは、すべりが小さいほうが高効率となります。

それは、二次入力とモーター出力及びすべりの関係より表されます⁽⁶⁾。各項目は式（5）、式（6）で示され、それらの項目より二次効率を導くと式（7）のようになり、二次効率はすべりの大きさにより左右されます。

従って、二次入力と同じ場合はすべりが小さいほど二次銅損が少なくなり、同時に出力を増加させることが可能となります。FHシリーズは、従来品よりもすべりが小さくなるようステータとロータの鉄板設計を見直しています。

$$W_{c2} = s \cdot P_2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$P_M = P_2 - W_{c2} = (1 - s) \cdot P_2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\eta_2 = P_M / P_2 = (1 - s) \quad \dots\dots\dots(7)$$

- W_{c2} : 二次銅損
- P_M : モーター出力
- η₂ : 二次効率（ロータ効率）
- P₂ : 二次入力（ロータ入力）
- s : すべり

3.2. ステータ占積率の向上

ステータ占積率とはステータのスロット面積に占める銅線量の割合です。一次銅損は $3 \cdot I_1^2 \cdot r_1$ で表され、巻線抵抗 r_1 を下げれば一次銅損を低減することができます。そのためには、銅線径を大きくして銅線量を増やすことが特に有効です。銅線量を増やすと製造面の難易度が増しますが、FHシリーズは巻線技術の向上によりステータ占積率を向上させて銅線量を増やしています。



図6 ステータの構造図

3.3. 電磁鋼板の材質変更

図5では鉄損の大きさは一次/二次銅損と比較すると小さいのですが、低減の余地は残されています。

FHシリーズでは磁束密度の最適設計と、板厚の薄い低鉄損材料を採用することで鉄損を低減しています。

3.4. 高効率化技術の採用とその効果

従来品の5IK90A-SW2（以下5IK90）と、ステータ外径と積厚が5IK90と同一寸法で高効率化技術を採用したFHシリーズの損失を比較したものを図7と図8に示します。

図7は90W出力時におけるFHシリーズと5IK90の各損失を比較したものです。特に二次銅損が大きく減少していることがわかります。これは主にステータ/ロータの最適設計によるものです。また損失で大きな割合を占める一次銅損も減少し、鉄損も半分以下に減少しています。

各損失が減少した結果、トータルの損失は55Wから36Wへと約34%減少しました（図8の①参照）。また、FHシリーズは出力120W時でも5IK90の出力90W時の損失を下回っていることがわかります（図8の②参照）。これは、5IK90では必要であった冷却ファンを廃止できることと、さらに5IK90とほぼ同体格で120Wの出力をうたうことができることを意味しています。

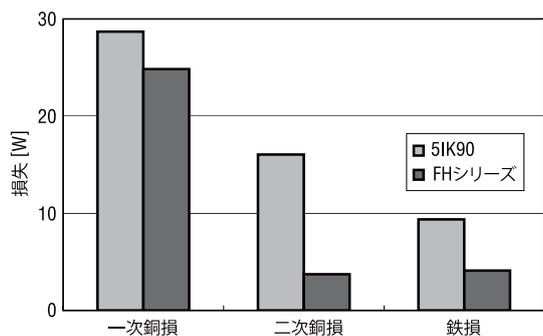


図7 損失の比較 (200V50Hz 時)

そこで今回の FH シリーズは、出力ー損失特性の結果より定格の変更が可能であると判断し、出力 120W で商品化を行いました。

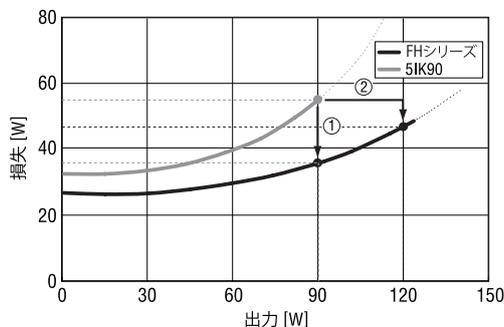


図8 出力ー損失特性 (200V50Hz 時)

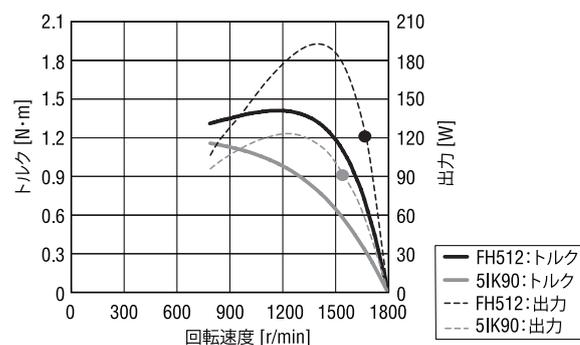


図10 回転速度ートルク・出力特性 (200V60Hz 時)

4.2. 出力ー効率特性

出力ー効率特性を図11と図12に示します。

軽負荷～定格負荷の全領域で 5IK90 と比較して FH512 の効率が上回っています。

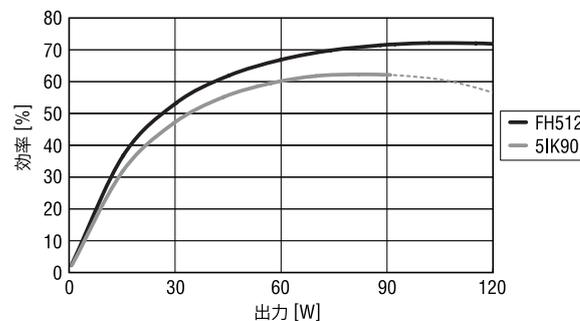


図11 出力ー効率特性 (200V50Hz 時)

4. 従来品との特性比較

4.1. 回転速度ートルク・出力特性

120W で商品化した FH512ST-GR (以下 FH512) と従来品 5IK90A-SW2 (以下 5IK90) との特性比較を示します。

回転速度ートルク・出力特性を図9、図10に示します。

(● FH512 定格出力ポイント ● 5IK90 定格出力ポイント)。損失減少に加えて定格出力時のすべりが 13.4%→9%と小さくなっており、高効率と高出力の両立を実現しています。

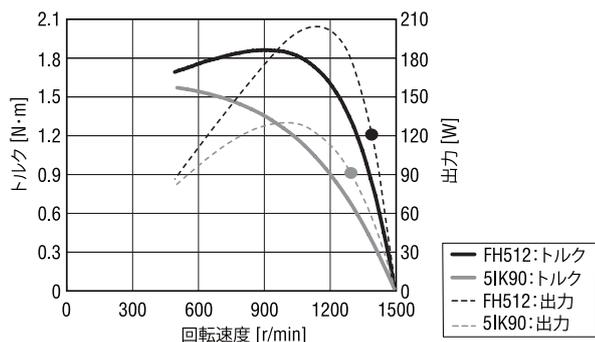


図9 回転速度ートルク・出力特性 (200V50Hz 時)

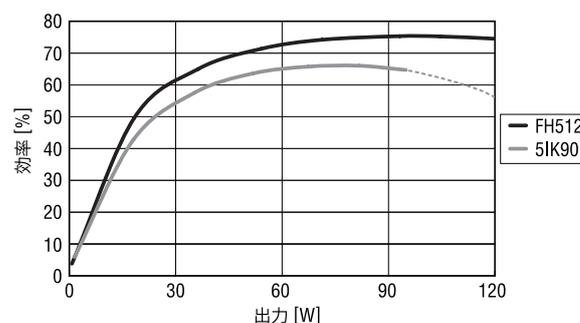


図12 出力ー効率特性 (200V60Hz 時)

4.3. 減速比－許容トルク特性

ギヤヘッドを組み合わせた時の減速比－許容トルク特性を図 13 に示します。

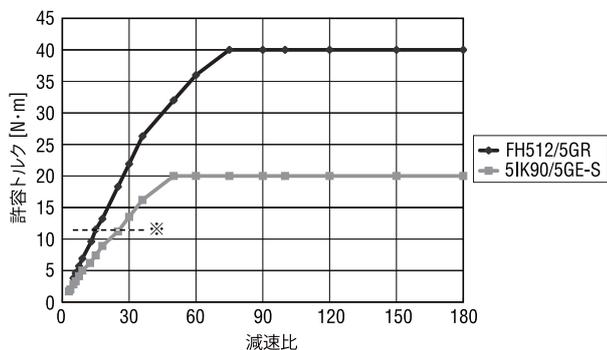


図 13 減速比－許容トルク特性 (200V50Hz 時)

FH512 用の GR ギヤヘッドは、5IK90 用の GE-S ギヤヘッドに対し許容トルクが最大で 2 倍になりました。

また、減速比 5～60 ではギヤヘッドの強度に加えてモーターのトルクが増加したため許容トルクが増加しました。

そのため、同じ負荷トルクを運転する際は、より小さい減速比を選択できるので、より高速な駆動が可能となります。例えば図 13 で※のラインの負荷を駆動する場合、選択できる減速比は 5IK90 が 1/25 に対し FH512 は 1/15 となるため無負荷時の実速度が 60r/min から 100r/min になります。

4.4. インバータ駆動時の特性

別売のインバータ FE シリーズ (図 14) と組み合わせたときの回転速度－トルク特性を図 15 に示します。



図 14 FE シリーズの外観

FH512 は低速から高速までの全領域で負荷トルクに対するモーターの速度変動 (対負荷速度変動) が少なく、かつ許容トルク (連続運転が可能な負荷トルク) が $0.5\text{N}\cdot\text{m} \rightarrow 0.85\text{N}\cdot\text{m}$ (6.6Hz～50Hz) と 5IK90 よりも 70% 増加しています。

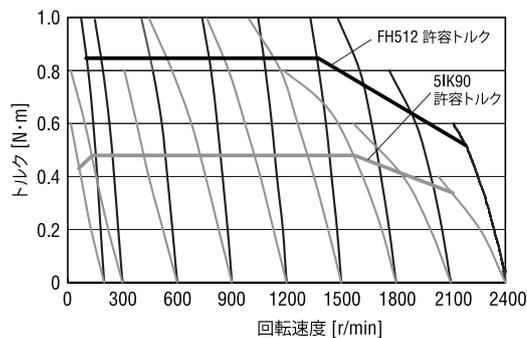


図 15 回転速度－トルク特性比較 (FE200A 駆動時)

また、図 16 に設定周波数－モーター効率特性を示します。FH512 は 5IK90 に対し、可変速範囲全域において許容トルク時のモーター効率が上回っています。

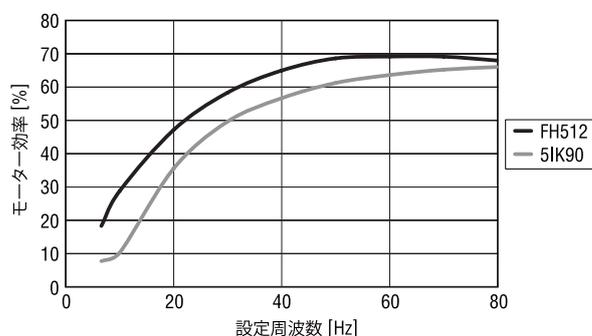


図 16 設定周波数－モーター効率特性
(FE200A と組み合わせた時の許容トルク時)

5. FHシリーズの特徴とラインアップ

FH シリーズは三相 200V～240V の電源電圧に対応しており、電源への接続方法により端子箱タイプとケーブルタイプがあります (図 17)。特徴とラインアップについて紹介します。



図 17 FH シリーズの外観

5.1. FHシリーズの特徴

FHシリーズと従来品のワールド K/BHシリーズの定格出力時における効率比較を図18、図19に示します。図18よりモーター出力が大きくなるにしたがって効率が上昇する傾向となりますが、FHシリーズは従来品と比較して全領域で効率が上回っています。また、図19より同じ取付角寸法と効率の関係で比較してもFHシリーズは効率が上回っており、小型・高効率化を実現しています。

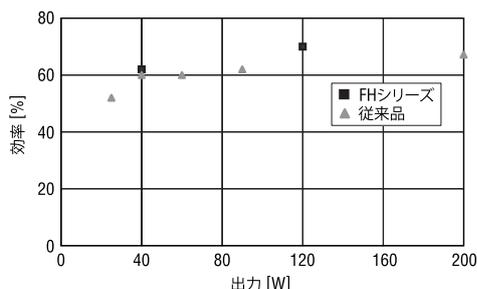


図18 出力-効率特性 (200V50Hz 時)

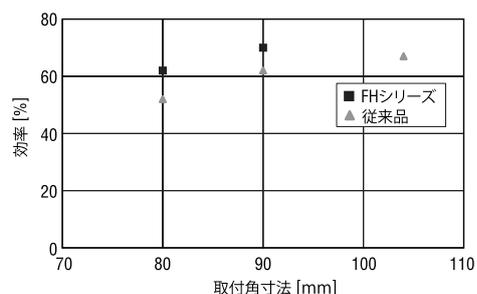


図19 取付角寸法-効率特性 (200V50Hz 時)

FHシリーズは高出力・高効率の他にも次のような特徴があります。特にFA環境の用途に向いております。

・保護等級 IP65

端子箱タイプ、ケーブルタイプともに冷却ファンレスで、防塵構造及び全方向の噴流水からの保護構造となっておりますので、埃や水のかかるような場所での使用が可能です。

・使いやすい端子箱

端子箱タイプはケーブルの引出口が3方向に変更可能で、かつ配線がしやすくなりました。また、アルミダイカスト製であるため堅牢で、耐環境性にも優れています。

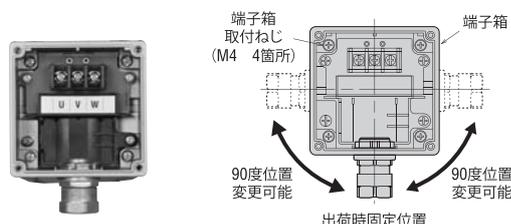


図20 FHシリーズの端子箱

・高強度・長寿命ギヤヘッド

GRギヤヘッドとの組み合わせで、従来 (GE-S/GN-Sギヤヘッド) 比で最大2倍の許容トルクと、10000時間の長寿命を実現しています。また、出力軸には防錆効果に優れた窒化処理を施しています。

5.2. FHシリーズのラインアップ

表1にFHシリーズのラインアップと仕様を、表2にギヤヘッド取付時の許容トルクを示します。

モーター取付角寸法□80mmの製品FH44タイプは、FH512と同様の技術を導入したことで従来品の25Wから40Wへと60%の定格出力アップを実現しています。

6. まとめ

小型三相インダクションモーターへ高効率化技術を採用することにより、FHシリーズは高効率で、かつ高出力なモーター特性を実現することができました。一定速の動力駆動用途や可変速駆動用途へFHシリーズを採用することにより、各種機器の省エネルギー化や省スペース化に貢献することができます。

低炭素社会への移行が求められていますが、インダクションモーターにも更に性能改善の余地がありますので、今後も引き続きインダクションモーターの高効率化に取り組み続けていきたいと思っております。

参考文献

- (1) IEC60034-30, (2009), p5
- (2) 坪井 和男, 「モータの事典 3.3 誘導機」, (2007), p124
- (3) 電気学会, 「電気工学ハンドブック」, (1993), p97, p325
- (4) 竹内 寿太郎, 「電機設計学 (改訂2版)」, (1993), p48
- (5) 電気学会, 「電機設計概論 (第3次改訂)」, (1983), p89
- (6) 坪島 茂彦, 「誘導電動機」, (1979), p93-95

筆者



本間 正

オリエンタルモーター鶴岡カンパニー
関東オフィス

表1 FHシリーズのラインアップと仕様値

取付角 寸法	品名		出力 W	電圧 V	周波数 Hz	周波数 A	起動トルク mN・m	定格トルク mN・m	定格回転速度 r/min
	端子箱付タイプ	ケーブル付タイプ							
□ 80mm	FH44ST-□S	FH44SC-□S	40	三相 200	50	0.29	290	290	1350
					60	0.26	240	240	1600
□ 80mm	FH44LT-□S	FH44LC-□S	40	三相 220	50	0.27	290	290	1350
					60	0.24	240	240	1600
				三相 230	50	0.28	290	290	1350
					60	0.24	240	240	1600
三相 240	60	0.25	240	240	1600				
	□ 90mm	FH512ST-□S	120	三相 200	50	0.74	850	850	1350
60					0.68	720	720	1600	
□ 90mm	FH512LT-□S	FH512LC-□S	120	三相 220	50	0.69	850	850	1350
					60	0.63	720	720	1600
				三相 230	50	0.70	850	850	1350
					60	0.62	720	720	1600
三相 240	60	0.62	720	720	1600				

●品名中の□には、減速比を表す数字が入ります。

表2 FHシリーズのギヤヘッド取付時許容トルク

●50Hz

品名	回転速度 r/min	単位=N・m																	
	減速比	300	250	200	167	120	100	83	60	50	42	30	25	20	17	15	12.5	10	8.3
FH44S■-□S		5	6	7.5	9	12.5	15	18	25	30	36	50	60	75	90	100	120	150	180
FH44L■-□S		1.3	1.6	2.0	2.3	3.3	3.9	4.7	6.5	7.5	9.0	12.5	15.0	16	16	16	16	16	16
FH512S■-□S		3.8	4.6	5.7	6.9	9.6	11.5	13.2	18.3	21.9	26.3	32.0	36.0	40	40	40	40	40	40
FH512L■-□S																			

●60Hz

品名	回転速度 r/min	単位=N・m																	
	減速比	360	300	240	200	144	120	100	72	60	50	36	30	24	20	18	15	12	10
FH44S■-□S		5	6	7.5	9	12.5	15	18	25	30	36	50	60	75	90	100	120	150	180
FH44L■-□S		1.1	1.3	1.6	1.9	2.7	3.2	3.9	5.4	6.2	7.4	10.3	12.4	15.5	16	16	16	16	16
FH512S■-□S		3.2	3.9	4.9	5.8	8.1	9.7	11.1	15.5	18.6	22.3	27.0	33.0	40	40	40	40	40	40
FH512L■-□S																			

●品名中の■には接続方法を表す T または C が、□には減速比を表す数字が入ります。

●回転方向は ■ 色がモーターと同方向を示します。他は逆になります。

●回転速度はモーターの同期回転速度（50Hz：1500r/min、60Hz：1800r/min）を基準に減速比で割って計算しています。