

誘導電動機のブラシレスセルビウス制御

Brushless Scherbius Control for Induction Motors

Recently, Hitachi has delivered a 1,650 kW brushless Scherbius set for driving pump to the Inuyama Pumping Plant of the Nagoya Water Works Bureau. This brushless Scherbius set is the first commercial control set of its kind in the world. In completing this unusual control unit many new ideas have been introduced. In the phase of maintenance and overhaul, labor saving has been realized by introducing cascade connection for two wound rotor induction motors. This article describes the principle of the brushless Scherbius control system and its difference with the conventional static Scherbius control system, along with the structure and characteristics of this 1,650 kW unit.

野田時敏* Jibin Noda
廣 豊* Yutaka Hiro
堀 孝正** Takamasa Hori

■ 緒 言

誘導電動機は速度制御法のうち、二次励磁法は効率よく広範囲の速度制御が行なえるということから、大容量ポンプを中心とした駆動分野で数多く採用されている。なかでも静止セルビウス方式は、他の二次励磁法——M-Gセルビウス方式、クレーマ方式——と違って主電動機以外すべて静止化され、保守および寿命上すぐれているので、表1にも示されるように、近年二次励磁法の主流となっている。

さらに最近では、誘導電動機のスリップリングまわりの保守点検作業をなくすため、ブラシレスで速度制御を行なおうという傾向が著しい。しかし、従来の静止セルビウス方式で

はブラシをなくすことはできない。これに対し、ブラシレスで二次速度制御を行なう誘導電動機のカスケード接続が脚光を浴びてきており、名古屋市水道局犬山取水場へ1,650kWセルビウスセットとして納入されるに至った。このカスケード接続の原理については古くから知られていたが、性能および価格の面でやや問題があり、実用化はほとんど進んでいなかった。しかしながら、ブラシレスで省力化を図ることができ、また近年盛んになってきている静止セルビウス方式の特長も生かすことができるので、ここに実用化されるに至ったものである。本セットは、1,650kWという大容量の誘導電動機に

表1 二次励磁制御の代表的実施例 最近では、ほとんど静止セルビウス制御方式が採用されている。

Table 1 Representative Example Using Secondary-excited Induction Motor

顧 客 名	納 入 年 (西暦)	用 途	駆 動 装 置						
			I M 出 力 (k W)	台 数	I M 仕 様			速 度 制 御 方 式	制 御 範 圍 (%)
					(kV)	(Hz)	(極数)		
東京都水道局	'64	ポ ン プ	6,200	3	6.3	50	14	ク レ ー マ	80-100
"	'66, '70	"	3,600	4	"	"	20	"	"
"	'66, '69	"	2,300	5	6.0	"	18	MG セルビウス	50-100
大阪市水道局	'67, '70	"	2,100	4	6.6	60	14	静止セルビウス	70-100
東京都水道局	'67	"	1,200	"	6.0	50	12	"	65-100
日立セメント(株)	"	フ ァ ン	920	1	3.0	"	4	"	50-100
大阪セメント(株)	"	キ ル ン	280	"	3.3	60	6	"	23-100
静岡県企業局	'69, '71	ポ ン プ	1,250	4	6.6	"	22	"	70-100
(自 社 用)	'69	発 電 機	6,400	1	3.0	50	8	ク レ ー マ	60-100
大阪市水道局	'72	ポ ン プ	1,150	7	3.3	60	14	静止セルビウス	70-100
名古屋市水道局	"	"	1,650	3	6.6	"	18	"	"
東京都水道局	"	"	1,400	2	"	50	10	MG セルビウス	60-100
(輸 出)	"	"	850(HP)	3	3.3	"	16	静止セルビウス	70-100
神奈川県企業局	'72, '73	"	4,600	4	6.3	"	12	"	80-100
埼玉県企業局	製 作 中	"	2,400	1	3.0	"	10	"	75-100

注：IM＝誘導電動機

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 工学博士

カスケード接続を採用した点では他に例がなく、またブラシレスで静止セルビウス制御を行なった点でも世界で初めてのものである。以下、本制御方式の概要について述べる。

2 ブラシレスセルビウス制御の概要と原理

2.1 ブラシレスセルビウス制御

図1は、従来形静止セルビウス方式の基本構成を示したものである。この方式は、誘導電動機の二次すべり電力を整流回路(REC)で直流に変え、他励式インバータ(INV)で商用電源に返還するもので、INVの制御角を変化させて直流電圧 E_d を調整すれば速度制御ができる。このとき、図2に示すように直流電圧が高いほど速度は低くなる。本方式の理論についてはすでに詳しく述べられており⁽¹⁾⁽²⁾、また表1にも示すように実績も多いのでその詳細は省略する。一方、図3は静止セルビウス方式の誘導電動機をカスケード接続によりブラシレス化した方式である(以下、本文ではこの方式をブラシレスセルビウス方式⁽³⁾と称する)。カスケード接続とは、2台の巻線形誘導電動機(IM₁, IM₂)の回転子を機械的に直結し、かつ回転子巻線どうしを互いに逆相順に直列接続するもので、このときIM₁とIM₂は出力を分担しつつ、あたかも1台の誘導電動機のように動作するものである(以下、本文ではカスケード接続したこの2台の巻線形誘導電動機の組をカスケード誘導電動機と称する)。カスケード誘導電動機を1台の等価な誘導電動機と考えた場合、その二次側はIM₂の一次側(固定子側)になるので、ブラシレスで速度制御が可能となる。

2.2 カスケード誘導電動機の同期速度

図3において、IM₁の一次巻線の作る回転磁界速度 N_{01} は、

$$N_{01} = \frac{120f}{P_1} \quad (1)$$

ただし、 f : 電源周波数

P_1 : IM₁の極数

この N_{01} に対して、回転子のすべりを s_1 とすると回転子速度 N は、

$$N = N_{01}(1 - s_1) = \frac{120(1 - s_1)f}{P_1} \quad (2)$$

このとき、IM₂の二次巻線の周波数は $f_2 = s_1 f$ である。したがって、IM₂の二次巻線(回転子巻線)の作る回転磁界速度 N_{02} は、

$$N_{02} = \frac{120s_1f}{P_2} \quad (3)$$

ただし、 P_2 : IM₂の極数

いま、IM₁とIM₂は機械的に直結されているから、 N_{02} に対する回転子すべり s_2 は、

$$s_2 = \frac{N_{02} - N}{N_{02}} = \frac{1}{s_1} \left\{ \frac{1}{s_1} - (1 - s_1) \frac{P_2}{P_1} \right\} \quad (4)$$

カスケード誘導電動機の同期速度は、すべり s_2 がゼロになった場合であり、このときのすべり s_{10} 、回転速度 N_0 は下記のようになる。

$$s_{10} = \frac{P_1}{P_1 + P_2} \quad (5)$$

$$N_0 = \frac{120f}{P_1 + P_2} \quad (6)$$

すなわち、極数 P_1 , P_2 からなるカスケード誘導電動機の同期速度は $(P_1 + P_2)$ の極数を持つ誘導電動機の同期速度と同じである。

なお、この同期速度 N_0 に対する回転子すべりを s で表わすと、

$$s = s_1 s_2 \quad (7)$$

$$N = N_0(1 - s) \quad (8)$$

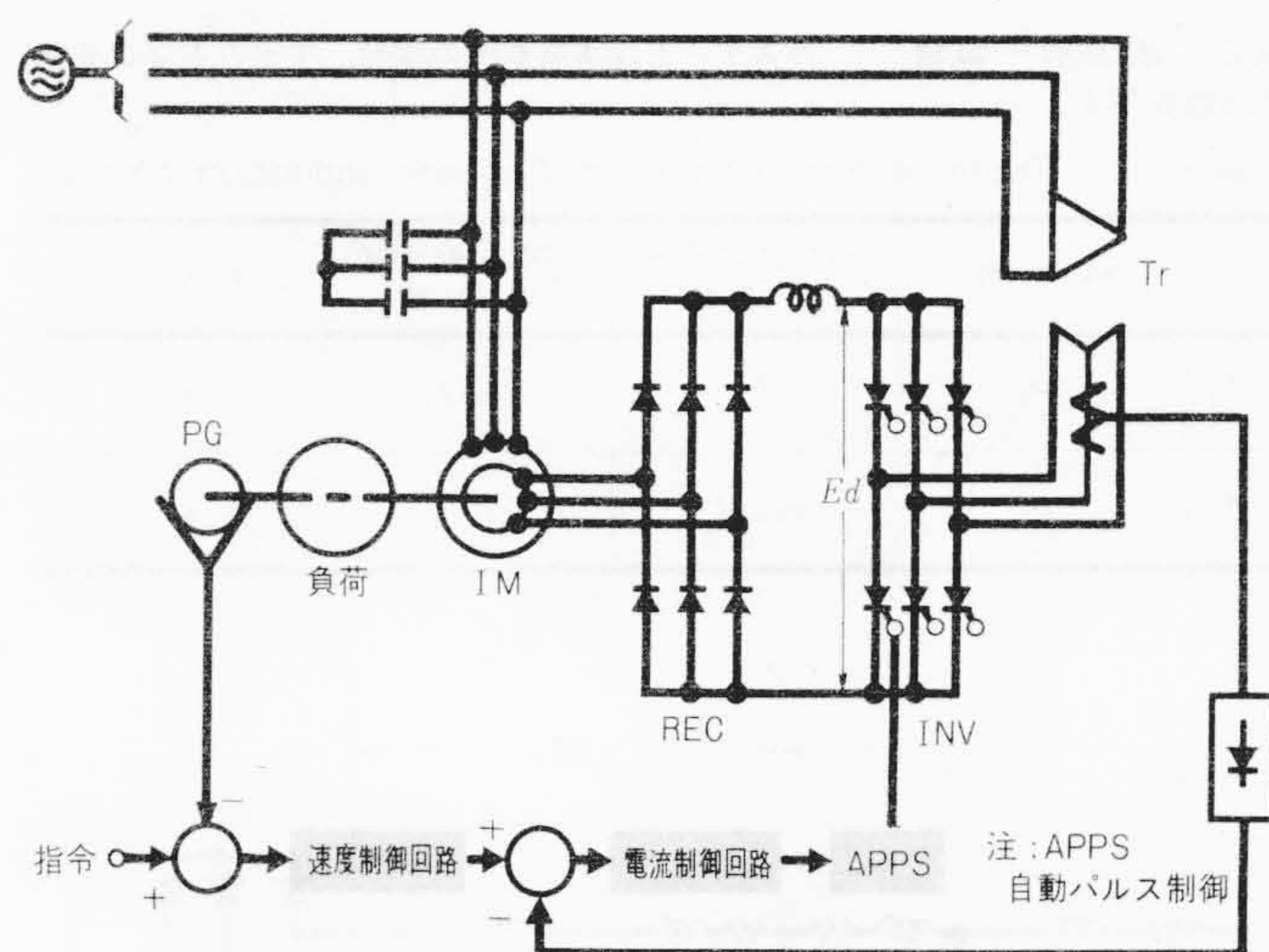


図1 静止セルビウス制御方式 巻線形誘導電動機の二次側に静止周波数変換器を適用した静止セルビウス制御方式の基本構成を示す。

Fig. 1 Basic Construction of Static Scherbius Control System

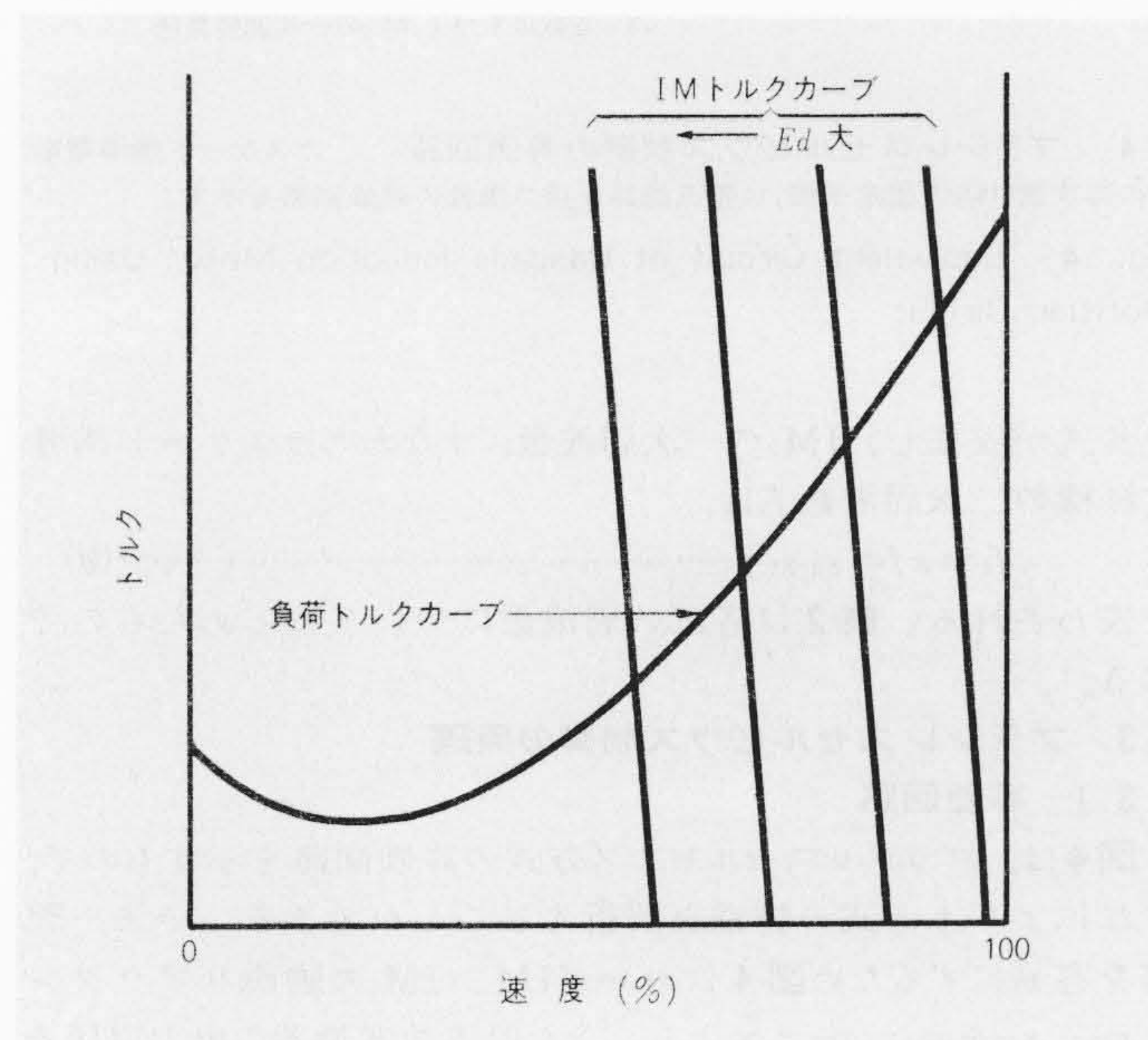


図2 静止セルビウス制御時のトルク-速度特性 直流電圧 E_d をパラメータとしたときの誘導電動機のトルク-速度特性を示す。

Fig. 2 Torque-Speed Characteristics at Static Scherbius Control

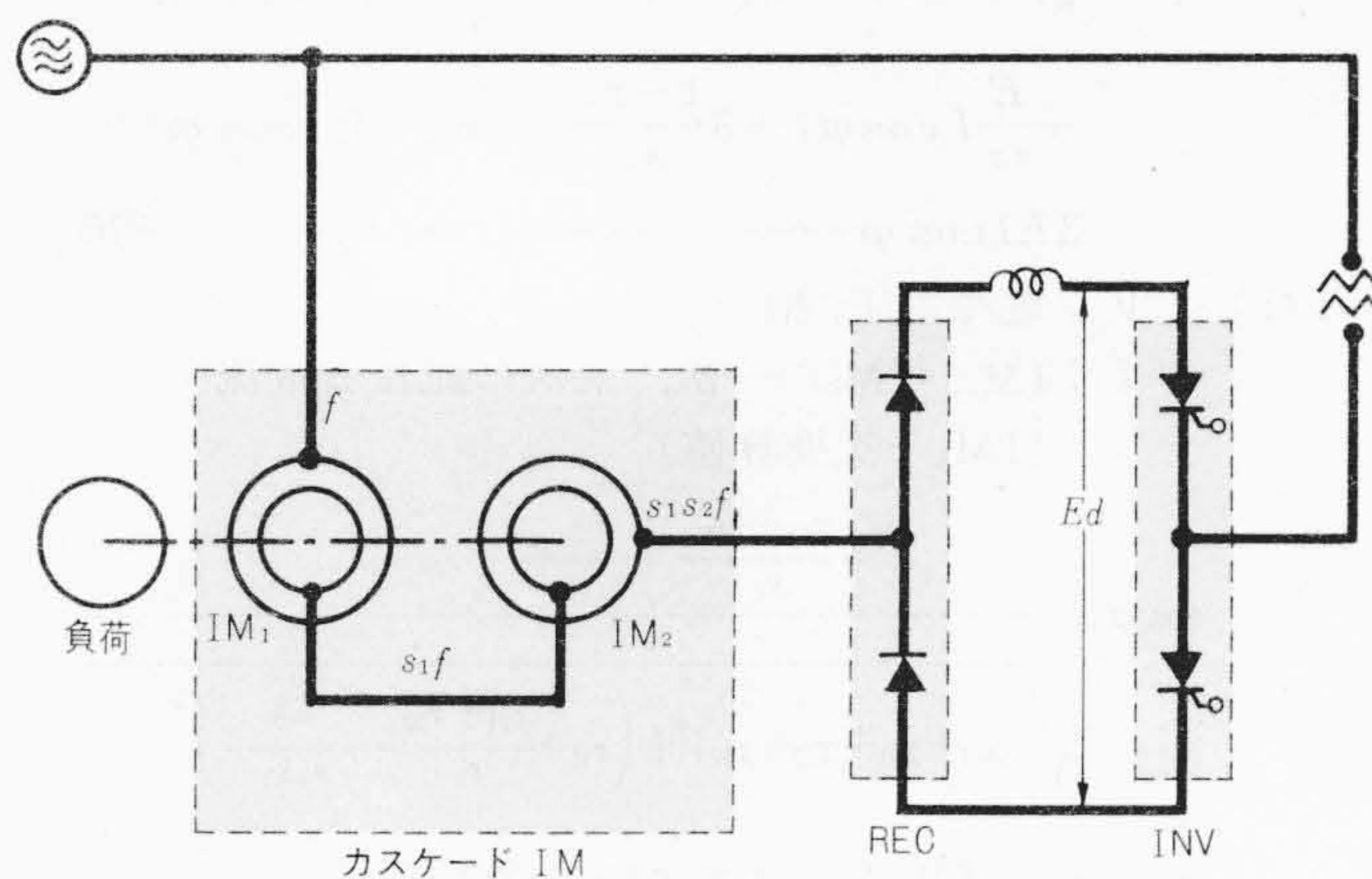


図3 ブラシレスセルビウス制御方式 カスケード誘導電動機に静止周波数変換器を適用した方式で、ブラシレスで速度制御を行なう。

Fig. 3 Brushless Scherbius Control System

表2 周波数一覧表 カスケード誘導電動機の極数、すべりおよび各部周波数を示す。

Table 2 Table of Frequencies of Cascade Induction Motor

	極数	一次(固定子側)周波数	二次(回転子側)周波数	すべり
IM ₁	P ₁	f	s ₁ f	s ₁
IM ₂	P ₂	s ₁ s ₂ f	s ₁ f	s ₂

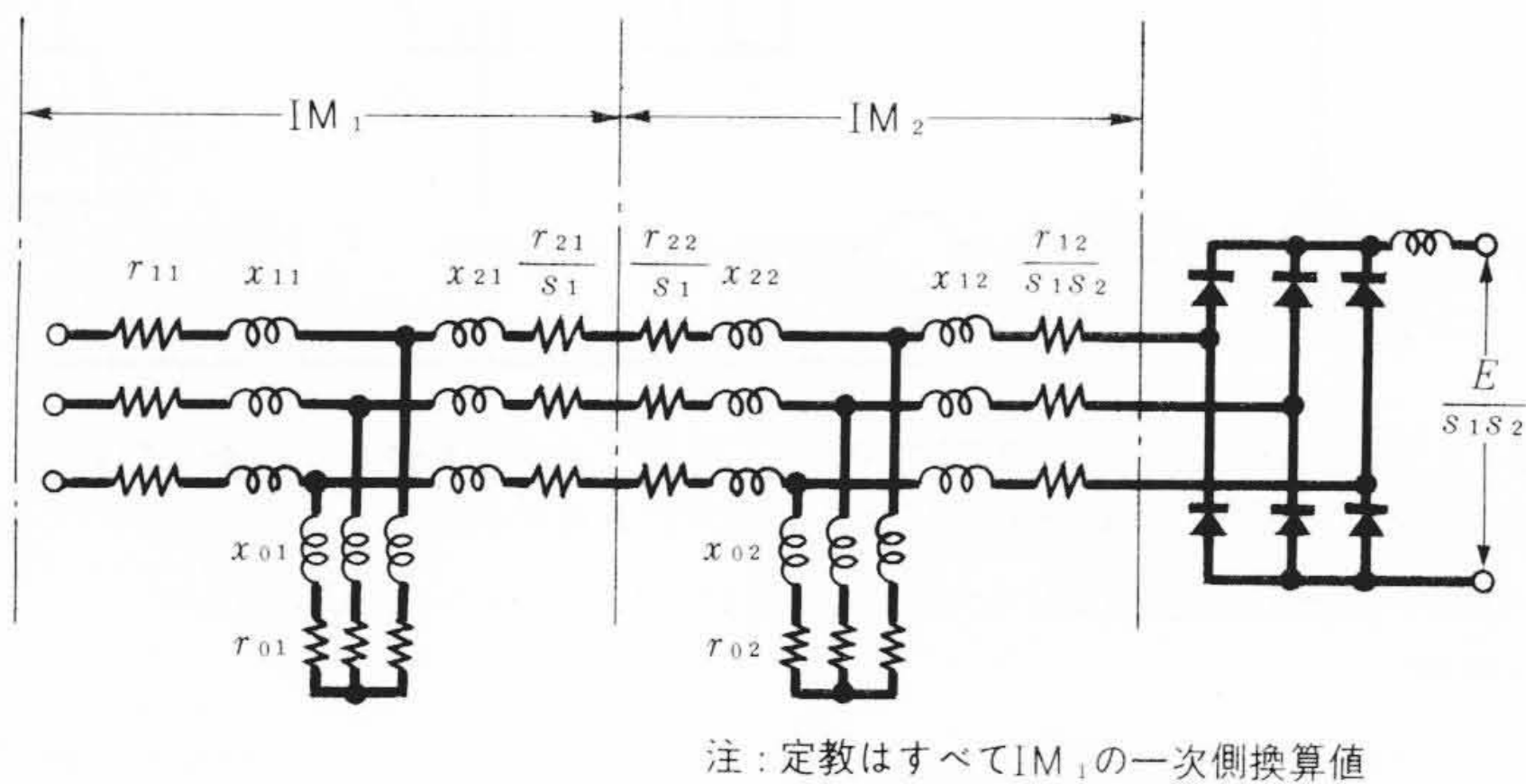
図4 ブラシレスセルビウス制御の等価回路 カスケード誘導電動機の二次側(IM₂の固定子側)に整流回路を持つ場合の等価回路を示す。

Fig. 4 Equivalent Circuit of Cascade Induction Motor Using Rectifier Circuit

の各式が成立し、IM₂の一次周波数、すなわちカスケード誘導電動機の二次周波数 f_3 は、

$$f_3 = sf = s_1 s_2 f \quad (9)$$

で表わされる。表2は各部の周波数についてまとめたものである。

2.3 ブラシレスセルビウス制御の原理

2.3.1 等価回路

図4は、ブラシレスセルビウス方式の等価回路を示すもので、これにより本方式の特性を解析することができる。いま、理解を容易にするため図4においてIM₁、IM₂の励磁リアクタンス x_{01} 、 x_{02} を $x_{01}=x_{02}=\infty$ とし、また周波数変換器の出力電圧を $\dot{E}$ とすると、一相あたり図5のような等価回路が得られる。 $\dot{V}$ と $\dot{E}$ とが逆相の場合、IM₁の一次側入力 P_{11} は、

$$\begin{aligned} P_{11} &= 3VI \cos \varphi \\ &= 3I^2(r_{11}+r_{21}+r_{22}+r_{12}) + 3\frac{1-s_1}{s_1}\{I^2(r_{21}+r_{22}+r_{12}) \\ &\quad + \frac{E}{s_2}I \cos \varphi\} + 3\frac{1-s_2}{s_2}(I^2r_{12} + EI \cos \varphi) + 3EI \cos \varphi \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、 V ：電源電圧/相

I ：IM₁、IM₂の一次、二次に流れる電流 (IM₁一次換算値)

$$\cos \varphi = \frac{r_{11} + \frac{r_{21}+r_{22}}{s_1} + \frac{r_{12}}{s_1 s_2}}{\sqrt{(x_{11}+x_{21}+x_{22}+x_{12})^2 + \left(r_{11} + \frac{r_{21}+r_{22}}{s_1} + \frac{r_{12}}{s_1 s_2}\right)^2}}$$

r_{11} 、 r_{21} ：IM₁の一次および二次抵抗/相 (IM₁一次換算値)

r_{12} 、 r_{22} ：IM₂の一次および二次抵抗/相 (IM₁一次換算値)

x_{11} 、 x_{21} ：IM₁の一次および二次リアクタンス/相 (IM₁一次換算値)

x_{12} 、 x_{22} ：IM₂の一次および二次リアクタンス/相 (IM₁一次換算値)

(10)式で第1項は装置の全銅損を表わし、第2項はIM₁の出力、第3項はIM₂の出力、第4項は返還電力を表わしており、 E を調整すると出力の調整、したがって速度制御が行なえることがわかる。 $E=0$ とみると、カスケード誘導電動機の特性和一致する。図6はカスケード誘導電動機のトルク特性を表わしたもので、IM₁、IM₂がともに電動機動作をする $1 > s_1 s_2 > 0$ ($1 > s_1 > s_{10}$) が実際に使用される範囲である。また、 E をかえた場合のトルク特性も示してある。

2.3.2 無負荷時の速度

図5において、無負荷の場合、 $I=0$ であるから、

$$V - \frac{E}{s_1 s_2} = 0 \quad (11)$$

これに(4)式を代入して、

$$s_1 \left\{ s_1 - (1-s_1) \frac{P_2}{P_1} \right\} V = E \quad (12)$$

また、(2)式より s_1 を代入して整理すると、次式のような E と無負荷速度との関係式を得る。

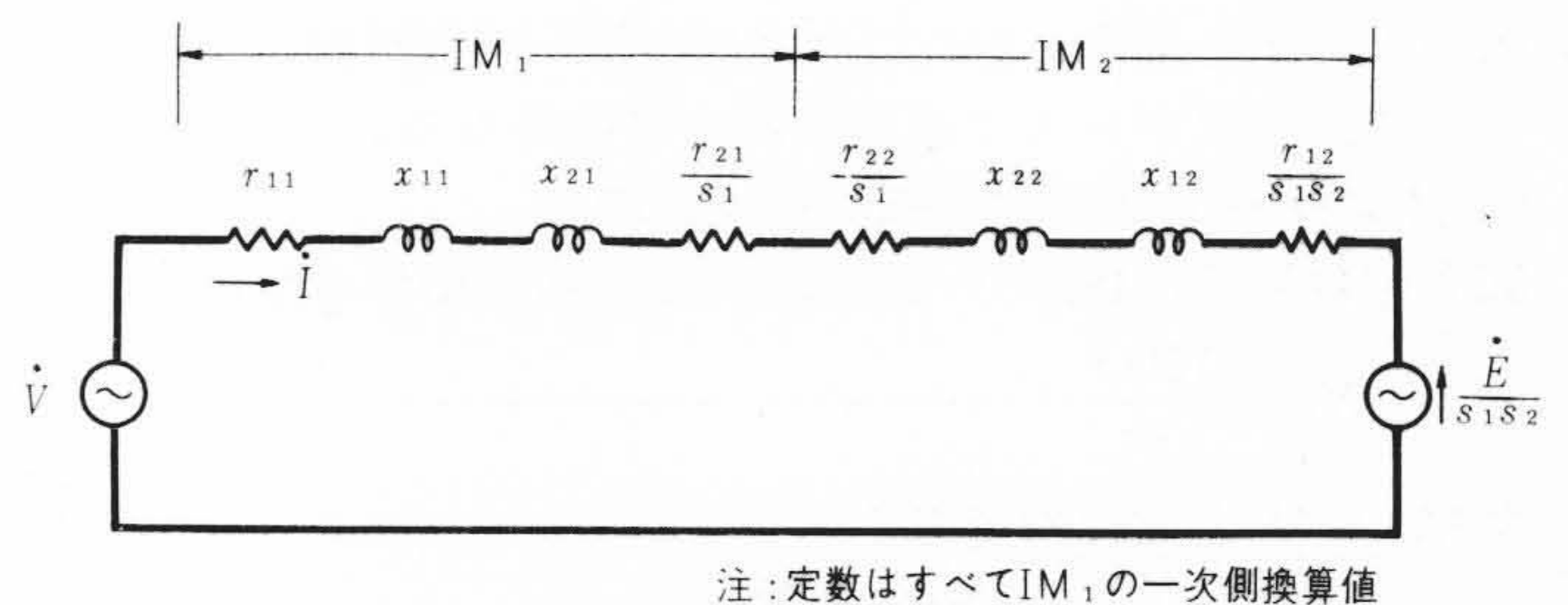
図5 ブラシレスセルビウス制御の簡易等価回路 カスケード誘導電動機のIM₁、IM₂に励磁電流が流れず、また周波数変換器の出力電圧が正弦波であると仮定したときの等価回路を示す。

Fig. 5 Approximate Equivalent Circuit

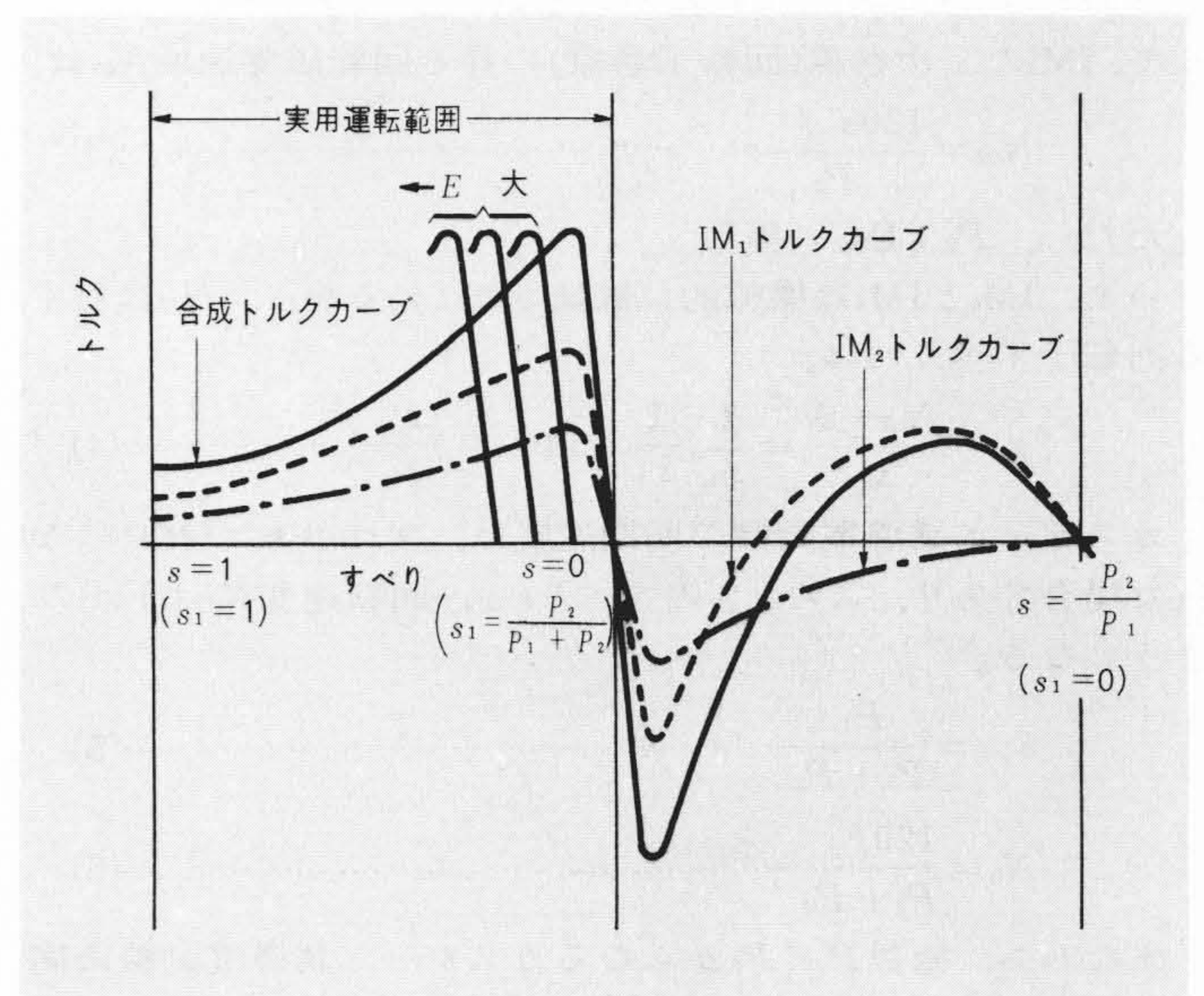
図6 カスケード誘導電動機のトルク特性 カスケード誘導電動機のIM₁、IM₂およびそれらの合成のトルクカーブを示す。すべり $s=0$ から $s=1$ の間が実用運転範囲であり、セルビウス制御時、直流電圧が高いほど速度は低くなる。

Fig. 6 Torque Curves of Cascade Induction Motor

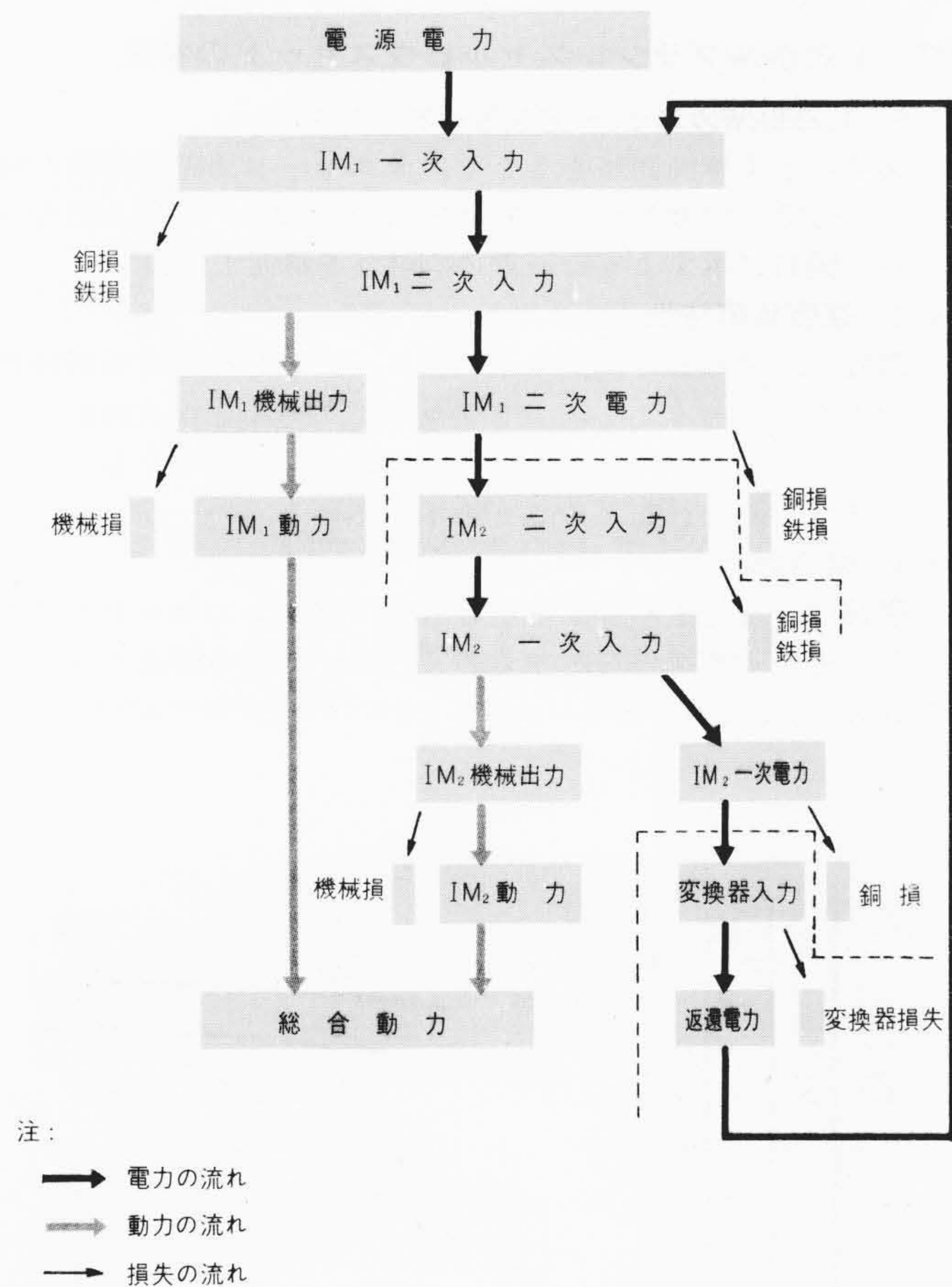


図7 ブラシレスセルビウス制御の電力の流れ カスケード誘導電動機の IM₁, IM₂ が出力を分担し, IM₂ の一次電力は変換器を通して電源へ返還される。

Fig. 7 Power Flow Diagram at Brushless Scherbius Control

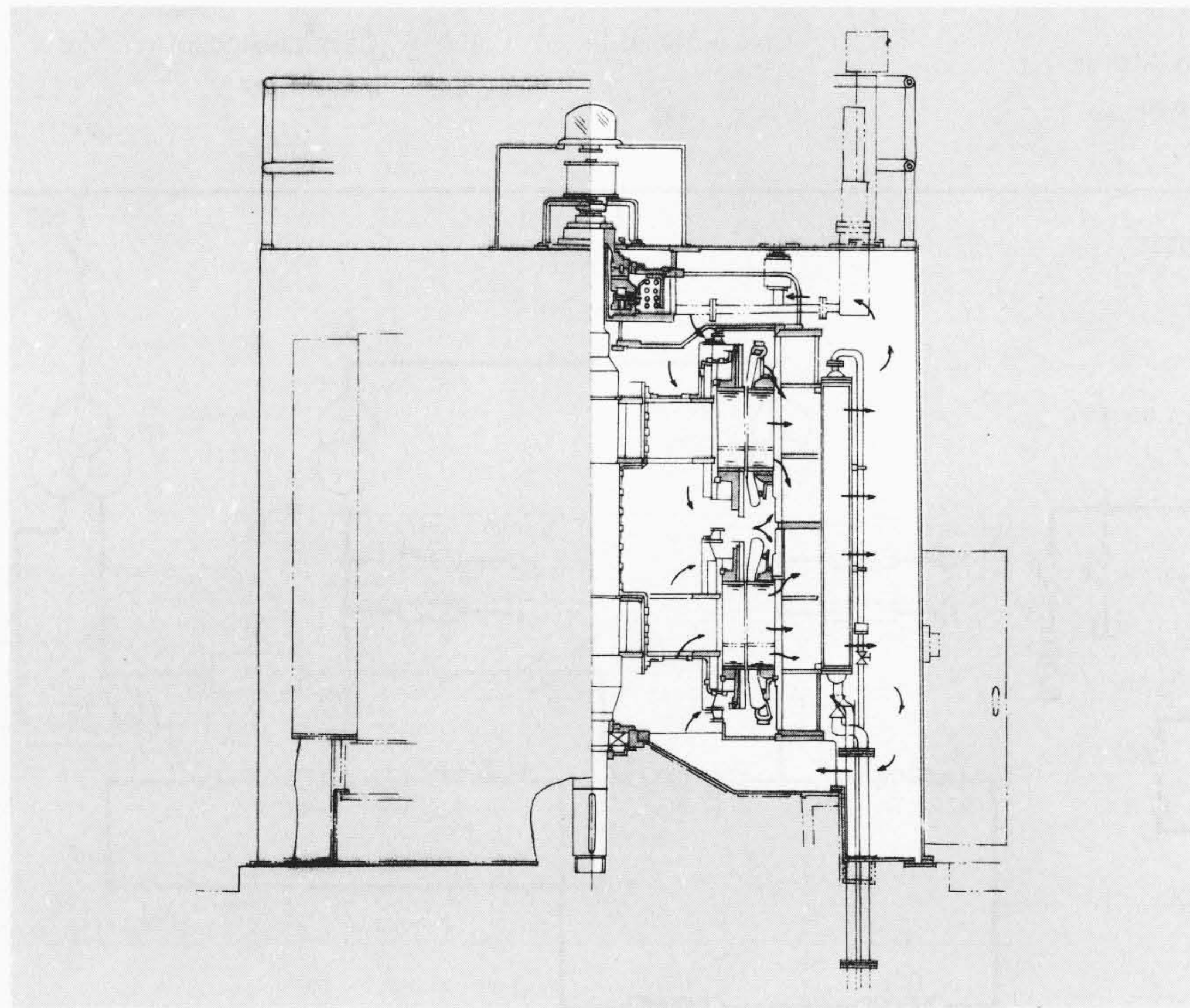


図8 1,650kWカスケード誘導電動機構造図 1,650kW ブラシレスセルビウスセットにおけるカスケード誘導電動機の構造図を示す。立て軸全閉内冷形である。

Fig. 8 Construction of 1,650kW Cascade Induction Motor

$$N = \frac{120f}{P_1 + P_2} \left(1 - \frac{E}{V} \right) \dots \dots \dots (13)$$

(13)式からも E を大きくすると, 速度が下がることがわかる。

2.3.3 パワーの流れ

カスケード誘導電動機が $1 > s_1 s_2 > 0$ で電動運転されているときのパワーの流れは図7に示すとおりである。図中, IM₁ の二次電力の一部は, IM₂ において機械的出力に変換され, 残りの電力がIM₂ の一次側から変換器を通して電源に返還される。

3 1,650kW ブラシレスセルビウスセットの構成

名古屋市水道局犬山取水場に設置された圧送ポンプ駆動用セルビウスセットは, 木曽川より取水された原水を15km離れた春日井浄水場まで圧送するための設備である。本設備の最大の特長は, 誘導電動機のカスケード接続によりブラシレスでセルビウス制御を行なっている点である。

3.1 セルビウスセット仕様

主電動機

出力: 1,650kW

台数: 3

用途: 立て軸斜流ポンプ

形式: 立て軸全閉内冷形カスケード接続方式

電圧, 周波数: 6,600V, 60Hz

極数: 18P相当(同期速度400rpm)

速度制御: 265~378rpm (70~100%)

騒音: 80ホン

電力返還設備

シリコン整流器

サイリスタインバータ

インバータ変圧器

直流リアクトル

高速度しゃ断器

3.2 主電動機の特徴と構造

主電動機は, カスケード誘導電動機としては1,650kWというほかに例をみない大容量機であり, 電氣的設計はもちろん, 各部の構造, 材料など, あらゆる面に十分な考慮が払われている。

図8は, 本機の構造図を示すものである。IM₁とIM₂の極数組合せの方法は, 表3に示すように8種類あるが, 本機では特性の最もよい10極および8極の組合せを採用した。

図9は本機の現地における外観を示すものである。

3.3 単線結線図

図10は, 本セットの単線結線図である。3台のカスケード誘導電動機に対し, 1セットのインバータで共通セルビウス制御を行なっている。本セットは従来の静止セルビウス方式と比較して, 2台の誘導電動機をカスケード接続しているため力率が悪くなる。このため, 力率改善用のスタティックコンデンサ(SC)をそう入している。無効電力を電動機速度に応じて変動するため, 速度に応じてSCの切入制御を行ない, 無効電力を±200kVAに押えている。

表3 極数組合せ 18極カスケード誘導電動機におけるIM₁, IM₂の極数組合せ方8とおりと、合成同期速度のIM₁同期速度に対するすべりを示す。

Table 3 Pole Combinations of Cascade Induction Motor

IM ₁	16	14	12	10	8	6	4	2
IM ₂	2	4	6	8	10	12	14	16
s ₁₀	0.111	0.222	0.333	0.444	0.555	0.666	0.777	0.888

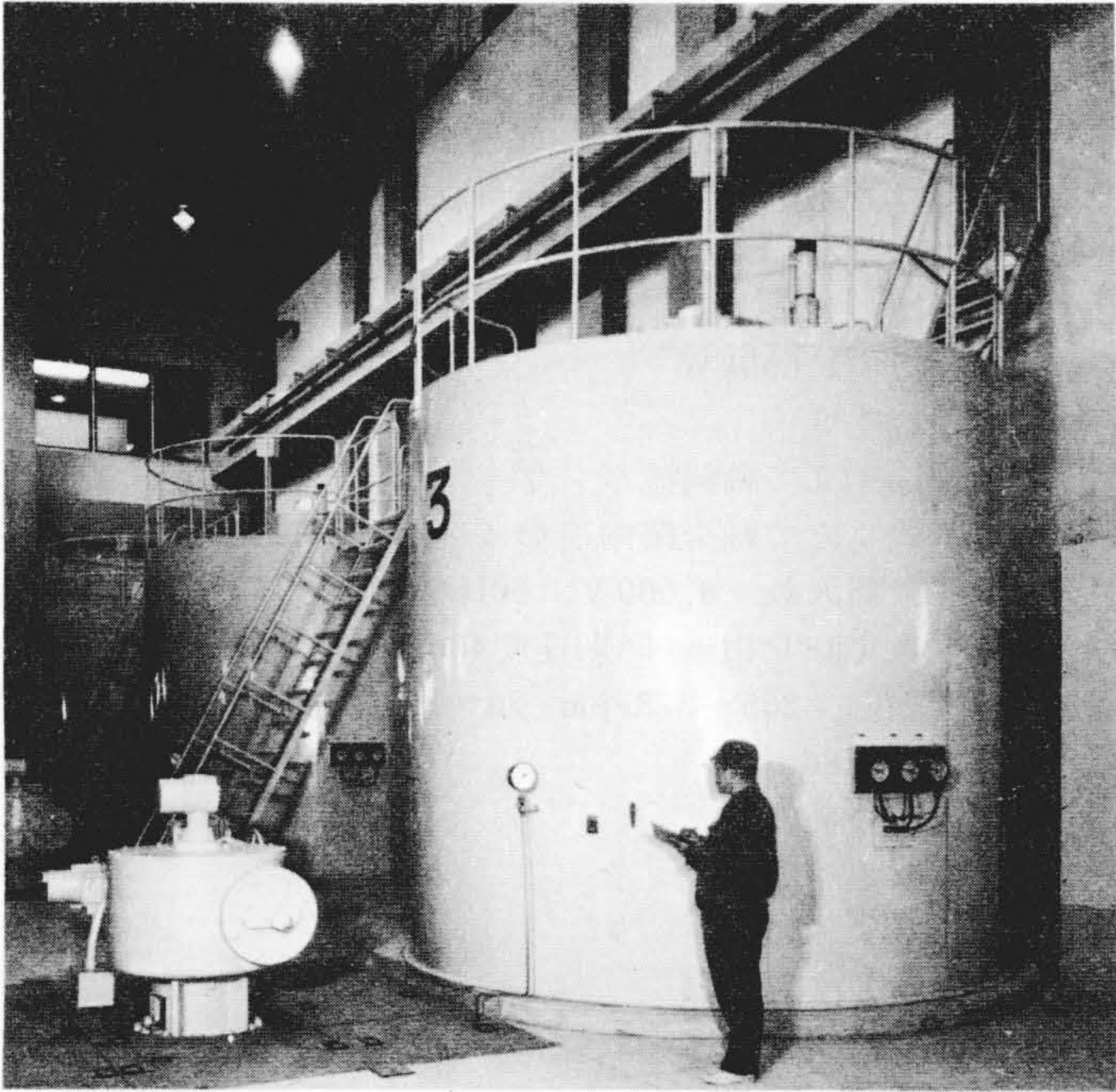


図9 1,650kWカスケード誘導電動機 名古屋市水道局犬山ポンプ場に設置された1,650kWカスケード誘導電動機の外観を示す。

Fig. 9 Photograph of 1,650kW Cascade Induction Motor for Inuyama Pumping Plant, Nagoya Water Works Bureau

4 1,650kWブラシレスセルビウスセットの特性

4.1 1,650kWカスケード誘導電動機の特

図4に示す等価回路をもとに、カスケード誘導電動機の特性を十分把(は)握しつつ本1,650kW機の設計、製作を行なったが、図11に示すように所期の高性能を満足した。

4.2 速度負荷特性

図12は、SCRの制御角をパラメータとした速度負荷特性を示すものである。これよりブラシレスセルビウス制御は従来の静止セルビウス制御と同様に良好な分巻特性をもち、円滑な速度制御が行なえることを示している。

4.3 総合効率

図13は、速度をパラメータとしたブラシレスセルビウスセットの総合効率特性を示すものである。従来の静止セルビウス制御では、100%速度において約93%の総合効率が得られる

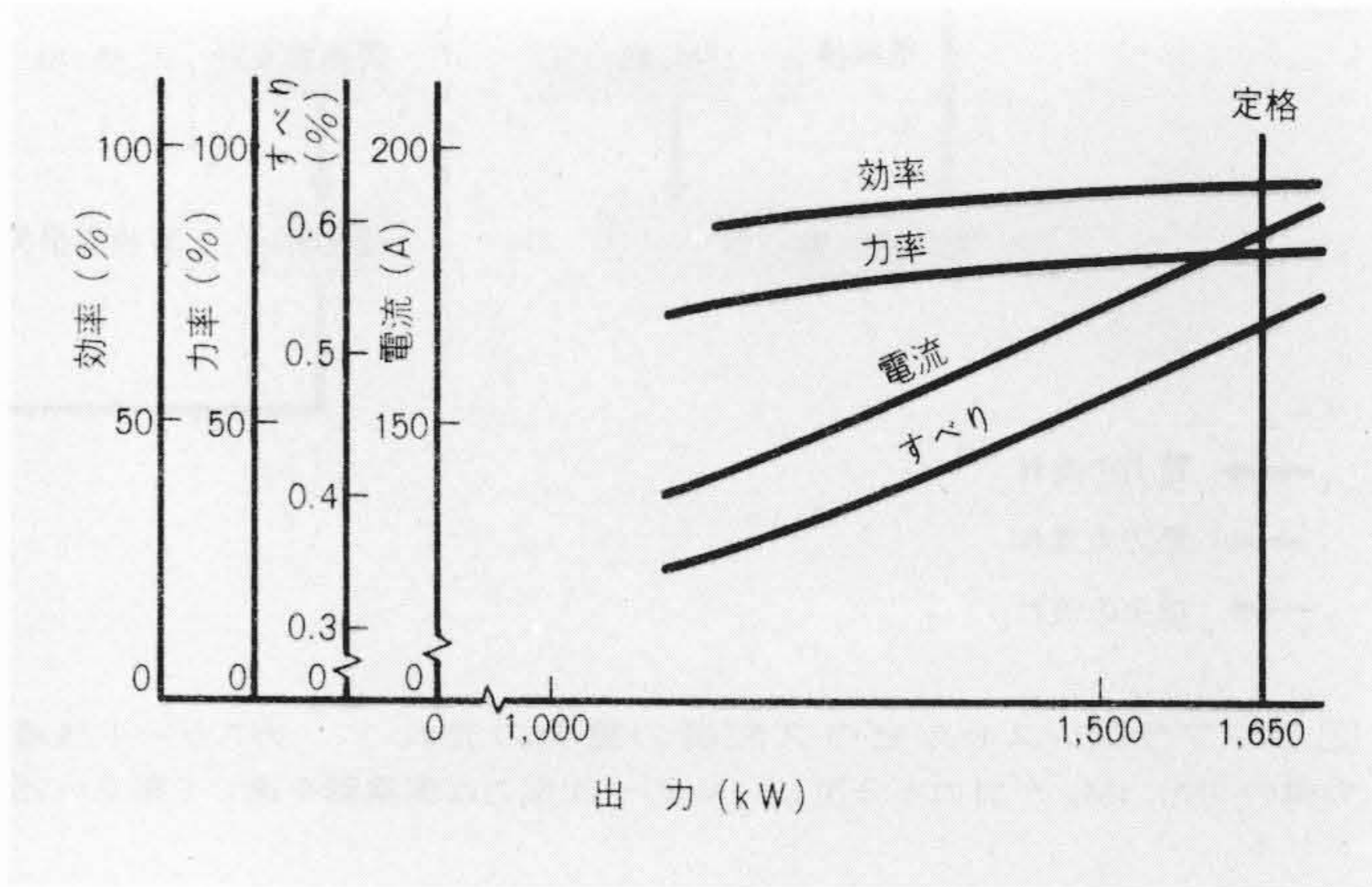


図11 1,650kWカスケード誘導電動機の特 1,650kWカスケード誘導電動機の実出力に対する特性を示す。

Fig. 11 Characteristics of 1,650kW Cascade Induction Motor

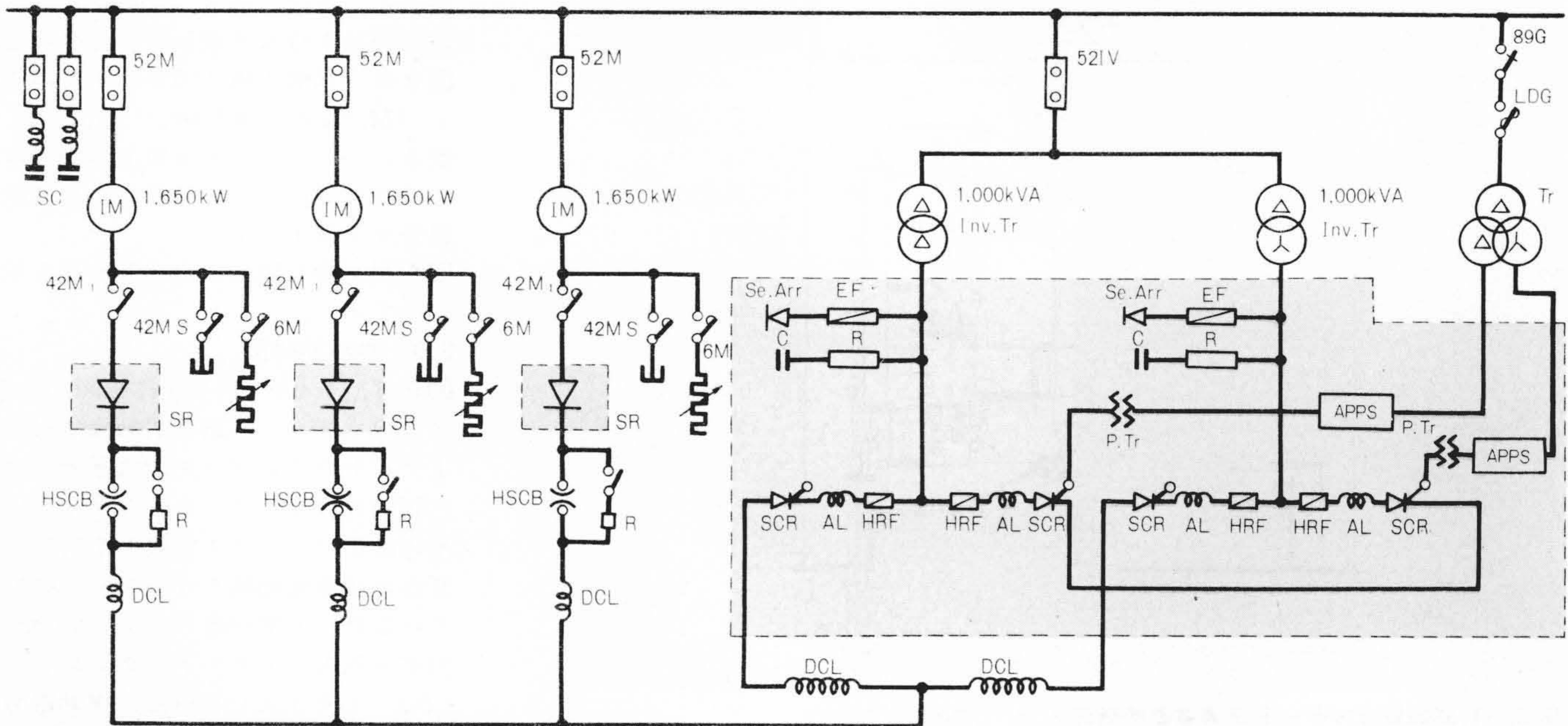


図10 1,650kWブラシレスセルビウスセット単線結線図 3台のカスケード誘導電動機が、1セ

Fig. 10 Skeleton Diagram of 1,650kW Brushless Scherbius Set

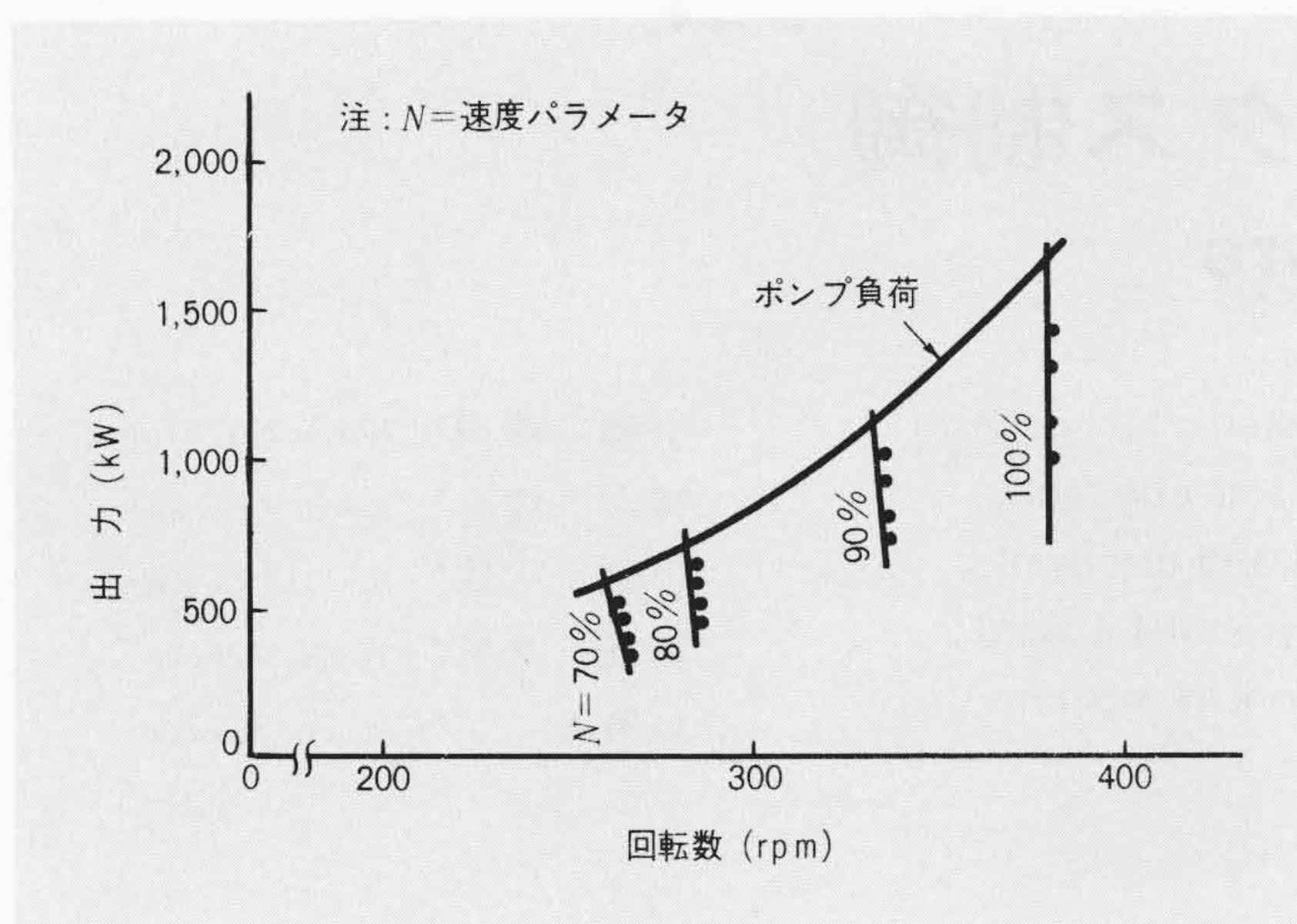


図12 ブラシレスセルビウス制御時の速度負荷特性 速度をパラメータとしたときの1,650kWカスケード誘導電動機出力特性を示す。

Fig. 12 Out Put Speed Characteristics at Brushless Scherbius Control

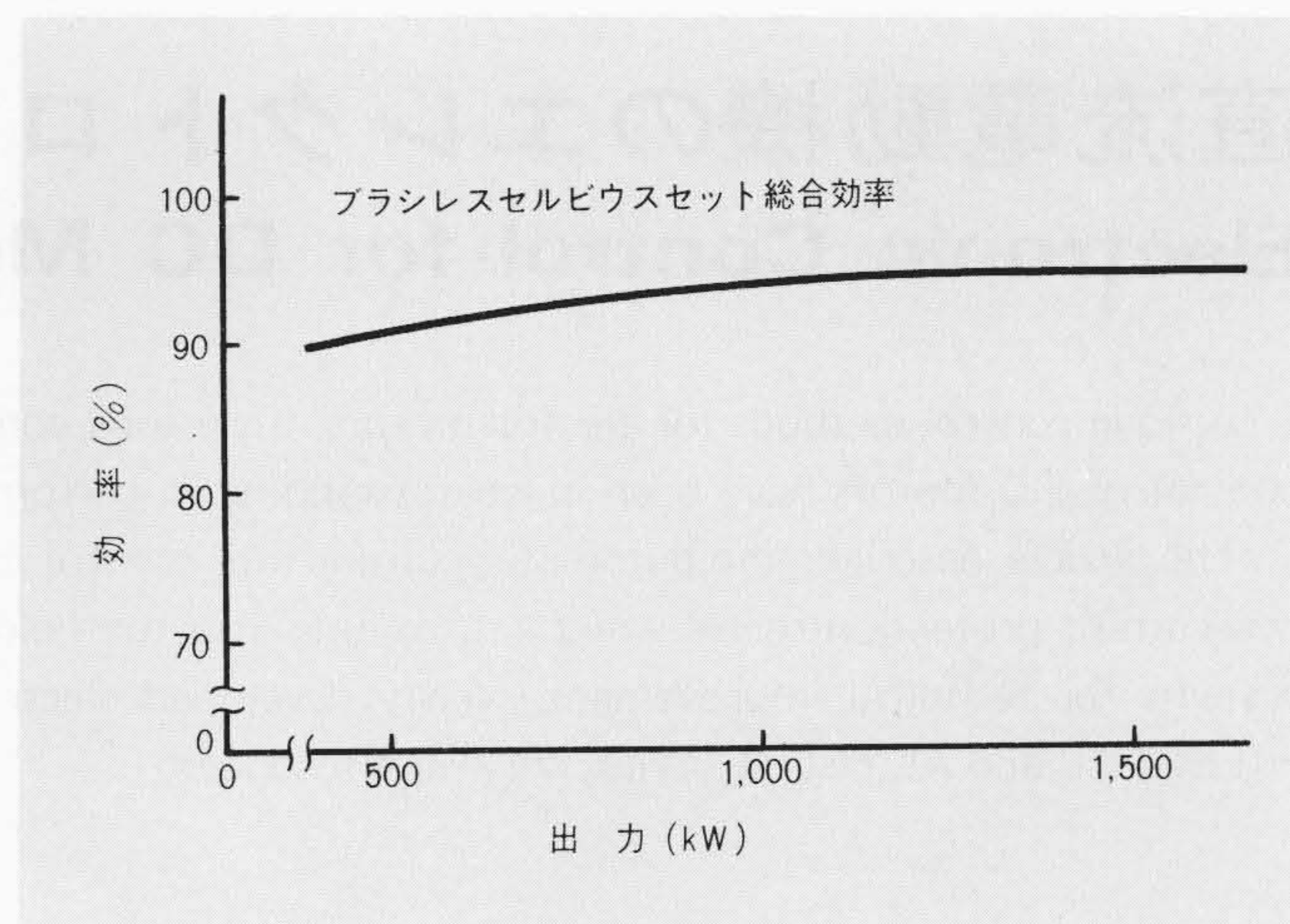


図13 1,650kWブラシレスセルビウスセットの総合効率 1,650kWカスケード誘導電動機を速度制御したとき、出力に対する総合効率を示す。

Fig. 13 Total Efficiency of 1,650kW Brushless Scherbius Set

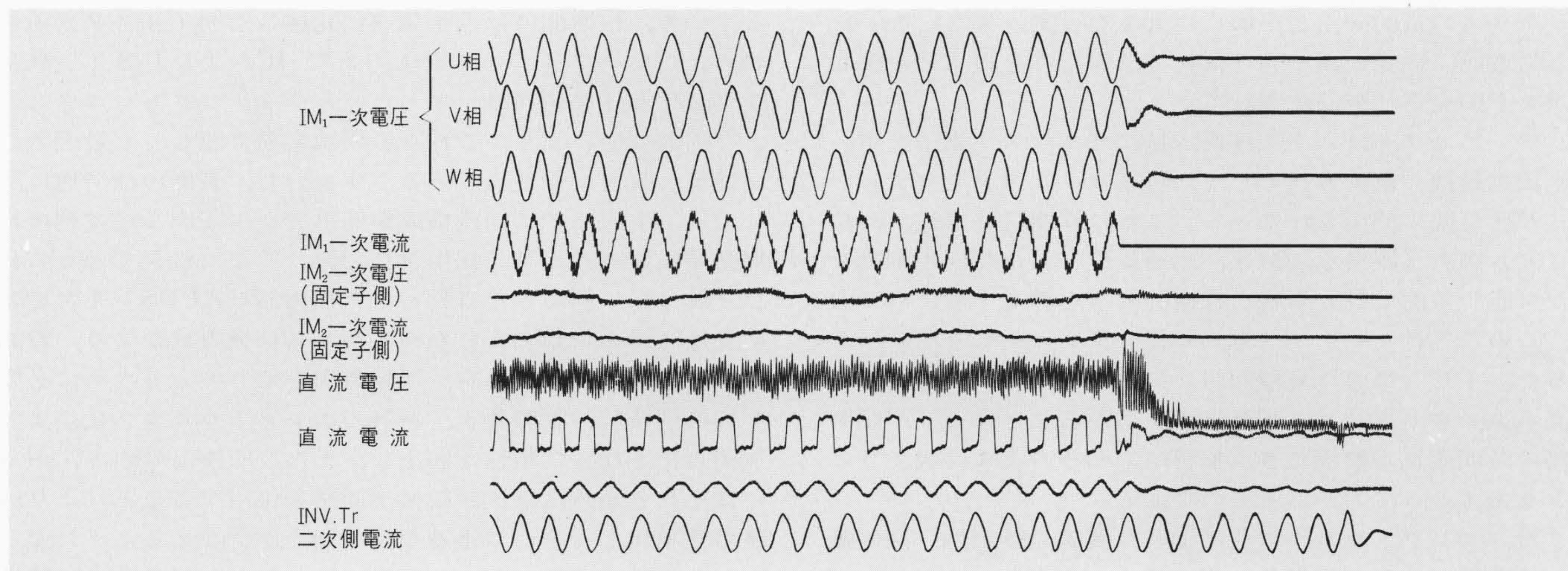


図14 ブラシレスセルビウス制御時の各部波形 1,650kWカスケード誘導電動機を速度制御したときの各部電圧、電流のオシログラムを示す。

Fig. 14 Waveshapes of Voltages and Currents at Brushless Scherbius Control

が、図13から明らかなように、本ブラシレスセルビウス制御では、低速度から高速度にわたって高効率を得ることができる。

4.4 各部波形、残留電圧

図14は、ブラシレスセルビウス運転時および電源OFF時の各部オシログラムを示したものである。波形は従来の静止セルビウス制御と同様である。

また、本機の場合 IM_1 の二次側に IM_2 の抵抗分があることになるので、残留電圧の減衰は非常に速い。さらに、従来の静止セルビウス制御では、停電時過渡的に二次電圧が上昇するおそれがあったが、ブラシレスセルビウス制御では、2台の誘導電動機を通ってくるため、整流回路の交流電圧の急激な変化が緩和される。

4.5 高調波

本セットにおいても従来のセルビウス制御と同様、整流回路に基づく高調波によって電流の脈動を生ずる。従来のセルビウスと同じく、すべり $\frac{1}{3}$ で最も大きな電流の脈動を生ずるが、これは無効電力の脈動であり、電源が安定な場合には運転に支障のないものである。

5 結 言

以上説明したように、名古屋市水道局納め1,650kWセルビウスセットは、世界で初めてのブラシレス化を実現したものであり、省力化のモデルケースとしても注目されている。その試験の結果、円滑な速度制御と高効率の特性を得ることができ、現在、好調に運転中である。本方式は静止セルビウス方式の特長を生かし、かつブラシレスで速度制御できる利点が大きく、今後ますます需要の拡大が期待される。

終わりに、本設備の計画・製作にあたり、貴重なご意見、ご指導をいただいた名古屋市水道局の各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 堀：「誘導電動機の静止二次励磁方式の特性」電学誌 87, 1797, (昭42-9)
- (2) 近藤, 藁谷, 平輪：「東京都水道局上井草給水所納め配水ポンプ設備」日立評論, 49, 635, (昭42-6)
- (3) 野中, 大口：「ブラシなし静止セルビウス方式の特性」電学誌 92, 241, (昭47-4)
- (4) 電気学会編：誘導機・交流整流子機, (昭32)