

# 싸이리스터에 의한 전동기 속도의 자동제어에 관한 연구

## Speed Control of the Motor in Automatic Control Using the Thyristor

朴 旻 鎬\*  
(Min Ho Park)

### [ABSTRACT]

For the variable speed in automatic control, this paper describes, at first, performance equations of an induction motor which has the free rotating stator. This motor with rotating stator has a speed control factor itself by equivalent variable frequency in stator side.

Secondly, an additional inverter source on the rotor slip ring serves the purpose of improving the speed control factor.

The advantages described above permit to control the speed continuously from zero to maximum allowable speed with low energy of thyristor. a feed-back device may be used for speed stabilization under variable load.

### 1. 서 론

전기적 운전의 자동제어 분야에 있어서의 최근의 발달은 속도제어계에 관한 많은 연구에 기인되고, 속도제어의 능률적 조작은 반도체 소자의 개발에 따르는 싸이리스터 인버터 등의 염가, 대용량의 제작이 가능하기 때문이다. 특히 제일 간단하고 가장 많이 사용되는 종래의 유도전동기와 이 싸이리스터 변환기의 결합에 의한 연구는 각국에서 왕성해지고 있다.

자동속도제어에 있어서 i) 전동기의 동작범위가 넓어야 하고, ii) 피드·백의 에너지 레벨이 적어야 하고, iii) 응답이 빨라야 한다는 조건에서, 필자는 i)·iii)을 만족시키는 새로운 유도전동기의 시작과 ii)의 조건을 충족시키기 위해 종래의 Schrubius system의 보조기를 Thyristor, (SCR)로 대체시키는 계통을 고려했다.

종래의 유도전동기는 그 속도를

$$n = n_0(1-s) = -\frac{60f_1}{p}(1-s) \quad (1)$$

로 표시하고, 슬립  $s$ 를 변화시킴으로써 좁은 범위에 서 속도제어가 되고, 효율은 속도제어 범위만큼 저하된다. 따라서 속도제어에 제한을 받았다. 그러나 회전자 속도는 고정자에 대해 상대적으로 동기속도면 됨으로

(슬립 영으로 보고) 고정자가 회전 가능하면 고정자 구동전력을 외부에서 공급하고 이것의 속도를 연속적으로 변화시킨다. 본 연구에서는 유도전동기의 고정자를 회전시킴으로써 생기는 기계적 에너지를 싸이리스터 인버터로 외부에서 전력을 인가하여, 이 에너지와 대응시키고 회전자 속도를 제어하는 새로운 전동기의 특성을 해석하고 싸이리스터에 의한 자동제어의 적응성을 논하고자 한다.

### 2. 시작 전동기

2·1 시작 전동기 · 본 실험에 사용할 유도전동기의 사양의 규격은

출력	0.4 KW	극수	6
상수	3	주파수	60 CPS

회전자 전압 110V, 권선형의 전동기를 제작 완료한 외관도가 그림 1과 같고 그 구조도를 그림 2에 표시하였다.

이 그림에서 고정자와 회전자는 지면에 대해 자유로히 회전하도록 구조가 되어 있고, 양쪽 권선은 슬립·링에 연결되어 있다.

본 연구에서는 회전자에 전원을 공급하고 고정자에서 control device를 사용하기로 하였다.

전동기 자체의 회로의 정수는 시험결과 다음과 같은

\*正會員 : 서울工大 電氣工學科 教授

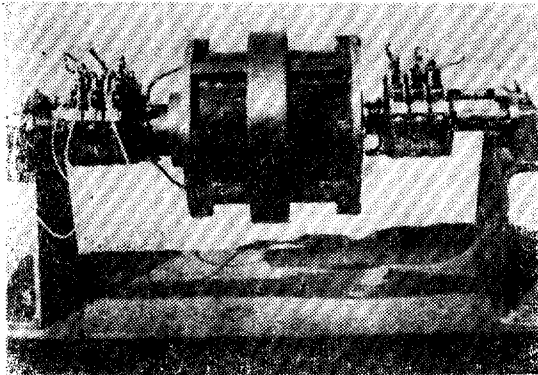
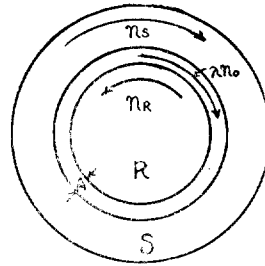
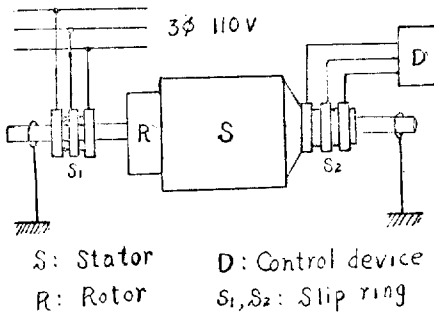


그림 1. 무단 변속 전동기  
Fig. 1. Continuous variable speed motor.



$n_s$ : Stator speed.  
 $n_r$ : Rotor speed.  
 $\lambda n_0$ : Rotating field speed.

그림 3. 전동기의 회전 방향  
Fig. 3. Rotational direction of motor.



S: Stator      D: Control device  
R: Rotor      S₁, S₂: Slip ring

그림 2. 무단 변속 전동기의 구성도  
Fig. 2. Connection of continuous variable speed motor.

값을 얻었다.

1) 기계의 정수결정

$$\begin{aligned} R_1' &= 4.8 \Omega & X_1' &= 6.9 \Omega \\ R_2 &= 5.5 \Omega & X_2 &= 6.2 \Omega \\ G_0 &= 0.8 \times 10^{-3} \text{ } \overline{\Omega} & B_0 &= 0.9 \times 10^{-2} \text{ } \overline{\Omega} \end{aligned}$$

2) 정속=38 W, 막찰속=18 W

이다.

### 2.2 시작 전동기의 특성

그림 2의 S<sub>2</sub>인 고정자 슬립·링을 단락 하고, 회전자의 슬립·링을 전원에 연결하여 전력을 공급받는다. 그림 3과 같이 회전자는 에어·갯의 회전자계와 반대 방향으로 모오르크를 발생하고 고정자는 회전자계와 같은 방향으로 모오르크를 발생하여 회전한다.

정지 위치에서의 회전자, 고정자의 속도를 각각  $n_r$ ,

$n_s$ 라 하고, 회전자계의 공간속도를  $n_0$ 라 하면 회전자와 회전자계의 상대적 속도관계는

$$n_r = (1 - \lambda)n_0 \quad (2)$$

이고

$$\lambda = \frac{n_0 - n_r}{n_0}$$

로 규정하였다. 따라서 이때의 회전자계의 정지위치에서의 속도는  $\lambda n_0$ 가 된다.

다음 고정자와  $\lambda n_0$  간의 상대적 속도관계는

$$n_s = (1 - s)\lambda n_0 \quad (4)$$

이고

$$s = \frac{\lambda n_0 - n_r}{\lambda n_0} = \frac{n_0 - (n_r \pm n_s)}{n_0 - n_r} \quad (5)$$

이다. 식2, 식3에서

$$\begin{aligned} n_r + n_s &= (1 - \lambda)n_0 + (1 - s)\lambda n_0 \\ &= n_0(1 - s\lambda) \\ n_r &= n_0(1 - s\lambda) - n_r \quad (6) \end{aligned}$$

이 얻어지고,  $n_r$ 의 회전자계와 반대방향의 속도를 (+)로 생각하면  $n_r + n_s$ 는 증대의 전동기의 회전자 속도  $\lambda s$ 는 슬립에 해당되고, 부하에 의해 결정되는 값이고, 보통 전동기에서는  $s\lambda \leq 0.1$ 이다. 따라서 식6의  $n_r$ 의 속도는  $n_s$ 의 속도를 변화시키므로써 조절 할수있다.

이 전동기의 고정자 에너지의 조류(flow)에 대한 회로를 회전자 측으로 환산한 등가회로는 그림4의 (a), (b), (c) 순서에서 이해할수 있다. 그림4의 회로 (a)·(b)에서

$$I_2 = \frac{s\lambda E_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2(\lambda X_2)^2}} = \frac{\lambda E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + (\lambda X_2)^2}} \quad (7)$$

이 되고, 그림4(c)에서

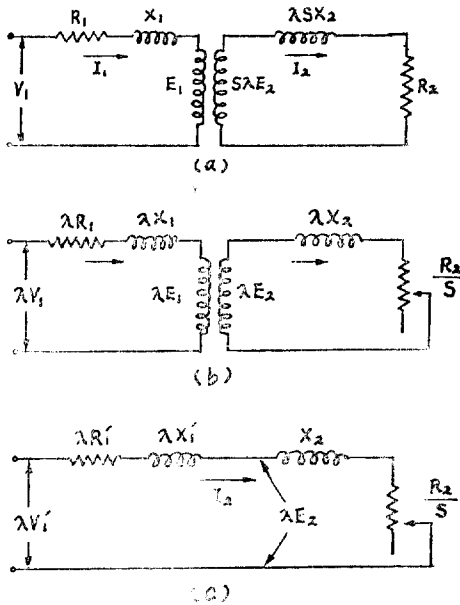


그림 4. 동가회로의 유도  
 (a), Equivalent circuit with disconnected stator and primary.  
 (b), Reduction of circuit constant, of Fig (a)  
 (c), Equivalent circuit with the no-load branch omitted.

Fig. 4. Development of equivalent motor circuit.

$$I_2 \approx \frac{\lambda V_1'}{\sqrt{(\lambda R_1' + R_2/s)^2 + \lambda^2 (X_1' + X_2)^2}} \quad (8)$$

이 된다.

일반적으로 토크  $T$ 는

$$T = m \frac{0.975}{n_0} \cdot \frac{(\lambda V_1')^2 \cdot (R_2/s)}{(\lambda R_1' + R_2/s)^2 + \lambda^2 (X_1' + X_2)^2} \quad (9)$$

로 표시되고, 한편 토크는 자속  $\phi$ , 전류  $I_2$ 의 적 (product)에 비례 된다. 즉

$$T \propto \phi I_2 \propto I_2 \quad (10)$$

이 된다. 지금 이 전동기의 정지 측, 회전자에 정지 될 때,  $n_R=0$ 인 경우는

$$T_1 \propto \frac{V_1'}{\sqrt{(R_1' + R_2/s_1)^2 + (X_1' + X_2)^2}}$$

$$\lambda=1, s=s_1$$

이므로, 고정자, 회전자 양쪽에 동시에 회전 할때의 회전자의 토크는

$$T_1 \propto \frac{\lambda V_1'}{\sqrt{(\lambda R_1' + R_2/s_1)^2 + \lambda^2 (X_1' + X_2)^2}}$$

$$\lambda=\lambda, s=s_1$$

이 된다.

지금 위의 두 경우에 부하 토크가 같다고 하면 다음 식이 성립된다.

$$\frac{V_1'}{\sqrt{(R_1' + R_2/s_1)^2 + (X_1' + X_2)^2}} = \frac{\lambda V_1'}{\sqrt{(\lambda R_1' + R_2/s_1)^2 + \lambda^2 (X_1' + X_2)^2}} \quad (11)$$

이므로

$$\frac{R_2}{\lambda s_1} = \frac{R_2}{s_1} \quad (12)$$

이 되어야 한다.

식 11에서 동일 토크에서의 회전자의 속도, 즉  $\lambda$ 의 값에 따라  $S$ 는  $S_1$ 의  $1/\lambda$ 배 만큼 된다. 즉 동일 전동기에서 고정자 토크가  $1/\lambda$ 배의 비례추이를 하는 셈이 된다.

인버터 속도조정을 하기 위한 전동기의 일반적 해석을 위하여 또 전동기 자체의 특성을 비교하기 위하여 퍼·유니트(per unit)에 대한 특성을 유도하고, 실험치와 비교하였다. 계산은 식 9의 슬립, 저항, 리액턴스, 회전자에 무관계인 모든 계수를 퍼·유니트로 하였다. 그리고  $R_1'=4.8$ ,  $R_2=5.6$ ,  $X_1'=6.9$ ,  $X_2=6.2$ 인 본 전동기의 경우의 최대 토크시의 슬립  $s_T$ 는

$$s_T = \frac{R_1'}{\sqrt{(\lambda R_1')^2 + \lambda^2 (X_1' + X_2)^2}} = \frac{0.399}{\lambda}$$

이때의

최대 토크는

$$T_{max} = \frac{R_1/s_T}{(R_1' + R_2/s_T)^2 + (X_1' + X_2)^2} = 0.0266$$

기동 토크는

$$T_{sT} = \frac{R_1}{(R_1' + R_2)^2 + (X_1' + X_2)^2} = 0.020$$

이 된다. 따라서  $\lambda=1$ 의 토크-슬립곡선이 그림5와 같이 표시되면  $\lambda$ 가 0.75, 0.5, 0.25, 0의 경우의 토크

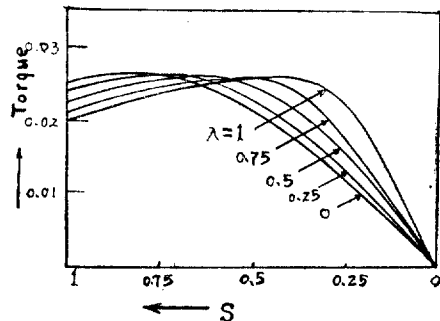


그림 5. 토크-슬립 곡선 (p.u)

Fig. 5. Theoretical torque-slip curve (p.u)

크-슬립의 특성도 식 12에서 아는 바와 같이 슬립이  $\lambda$  만큼 비례추이 되어  $T_{\lambda}$ 로 표시된다.

$\lambda$ 일때의 회전자계의 속도는 식4에서  $\lambda n_0$ 이므로, 그림5의 곡선을 토크-속도곡선으로 표시하면 그림 6과 같다.

$T_{\lambda}$ 의 토크

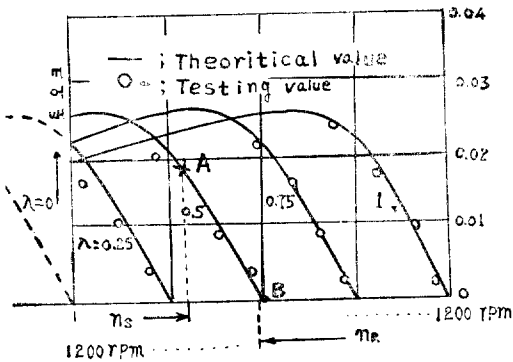


그림 6. 그림 5의 경우의 토크-속도곡선 ( $p.u$ )  
Fig. 6. Torque-speed curve in the case of Fig. 4.

그림에서  $T_{\lambda}$ 와  $T_1$ 의 토크 곡선의 형은 같고, 고정자가  $n_s$ 의 속도로 A점의 토크로 있을때 회전자 속도  $n_R$ 는 B점이 된다. 그리고  $n_s$ 와  $n_R$  사이의 거리는 부하에 대한 슬립속도가 될 것이다.  $\lambda$ 의 연속적 변화에 따라서  $T_{\lambda}$ 와 같은 형의 곡선이 무한히 존재하게 된다.

이것은 2차 입력의 가변 주파수 시의 특성과 같다. 물론 결손, 동손을 무시한 이상적인 경우이나 실험치로 표시한 것과 같이 실제의 경우에도 이것과 유사한 곡선으로 된다. 따라서 이 전동기의 제어 특성으로 회전형 고정자 기구는 기계자체 내에서 주파수 변경장치의 역할을 한 셈이 된다.

### 3. 계의 속도조정제어

회전자가  $n_R$ 의 속도로 회전하고, 고정자가 회전자계와 같은 방향으로 회전하는 경우의 에어·갭에서의 에너지 분포는

$$P_w = (1-\lambda)P_w + \lambda P_w \quad (13)$$

이표

$$\left. \begin{aligned} P_w &\equiv \text{에어·갭에서의 에너지} \\ (1-\lambda)P_w &\equiv \text{회전자 에너지} \\ \lambda P_w &\equiv \text{고정자 에너지} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

가 된다. 여기서 문제점은  $\lambda P_w$ 의 처리 방법을 여하히 하느냐 하는 것이다. 시작품 전동기에서의 실험결과 식 13의 속도에 따르는 변화를 표시하면 그림 7과 같다.

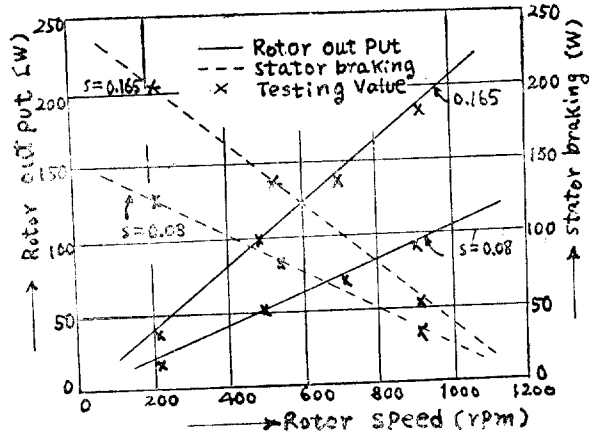


그림 7. 회전자 속도  $n_R$ 에 대한  $\lambda P_w, (1-\lambda)P_w$ 의 곡선  
Fig. 7.  $\lambda P_w, (1-\lambda)P_w$  curve with rotor speed  $n_R$ .

$\lambda P_w$ 는 저속도에서 대단히 큰 값이 된다. 그림 8과 같이 싸이리스터 인버터를 고정자 슬립과 전원 사이에 삽입하고, 인버터 입력은 전원에서 변환한 직류를 공급하고, 또 인버터의 분배기는 별도로 만들지 않고, 슬립·

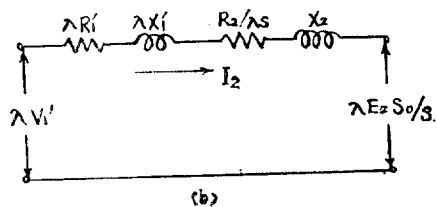
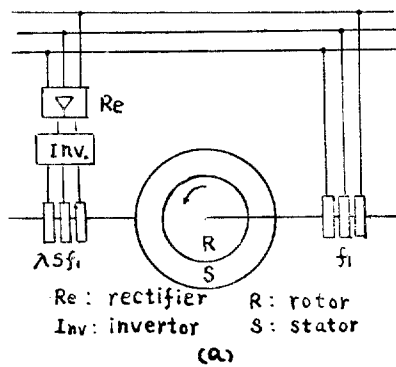


그림 8. 제어 회로의 기본결선과 등가회로  
Fig. 8. Basic connection of control circuit and equivalent circuit.

링에서 꼬집어 내어준다. 따라서 인버터의 주파수는  $\lambda s f_1$  즉 슬립·링의 주파수와 같고, 인버터에서의 슬립·링의 인가 전압  $V_{inv}$ 를

$$V_{inv} = s_0 E_2 \quad (15)$$

라고 하면 식 8에서

$$I_2 = \frac{\lambda s E_2 - s_0 E_2}{\sqrt{R_2^2 + (\lambda s X_2)^2}} = \frac{\lambda s_0 E_2 (1 - s_0/\lambda s)}{\sqrt{(R_2/s)^2 + (\lambda X_2)^2}}$$

이고,  $E_2 \doteq V_1'$ 이라 하면

$$I_2 \doteq \frac{\lambda V_1' (1 - s_0/\lambda s)}{\sqrt{(\lambda R_1 + R_2/s)^2 + \lambda^2 (X_1 + X_2')^2}} \\ = \frac{V_1' (1 - s_0/\lambda s)}{\sqrt{(R_1 + R_2'/\lambda s)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (16)$$

이 된다.

고정자 입력 전력  $\lambda P_W$ 를 다시 분석하면,

$$\lambda P_W = \lambda(1-s)P_W + \lambda s P_W \quad (17)$$

이고,

$\lambda(1-s)P_W \equiv$  고정자 회전 전력,

$\lambda s P_W \equiv$  2차회로 전력

이 된다. 여기서  $\lambda s P_W$ 를 인버터에 의한 전력부분을  $\Delta \lambda s P_W$ 라고 하면

$$\Delta \lambda s P_W = P_{C2} + P_{inv} \quad (18)$$

이고,  $P_{C2}$ 는 고정자 동손,  $P_{inv}$ 는 인버터에서 공급하는 전력이다. 위의 식에서

$$\Delta \lambda P_W = \frac{P_{C2}}{s} + \frac{P_{inv}}{s} \quad (19)$$

이고, 여기서

$$P_{C2} = m_2 I_2^2 R_2$$

$$P_{inv} = m_2 I_2 s_0 V_1' \cos \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{R_1' + R_2/\lambda s}{\sqrt{(R_1' + R_2/\lambda s)^2 + (X_1' + X_2)^2}}$$

이고, 이것을 식 19에 대입하면

$$\Delta \lambda P_W = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{s} + \frac{m_2 I_2 s_0 V_1' \cos \varphi}{s} \\ = m_2 \frac{V_1'^2 (1 - s_0/\lambda s)}{[(s_1' + R_2/\lambda s)^2 + (X_1' + X_2)^2]} \\ \cdot \frac{(R_2 + s_0 R_1')}{s} \quad (20)$$

이다. 이 식은 회전장계의 고정자에 넘어오는 에너지와 인버터의 출력이 고정자에 들어가는 에너지와를 합한 식이고  $s_0/\lambda s$ 의 크기에 따라 에너지의 분포가 달라진다.

(1)  $s_0/\lambda s = 0$ 인 경우는  $\Delta \lambda P_W > 0$ 이고, 이 경우에는 인버터를 사용하지 않는 경우이고, 고정자의 입력은

$$P_s = m_2 \frac{V_1'^2 (R_2/s)}{(R_1' + R_2/\lambda s)^2 + (X_1' + X_2)^2} \quad (21)$$

이고, 고정자의 동기효율은

$$T_s = \frac{0.975}{\lambda n_0} \lambda P_W = \frac{0.975}{n_0} \cdot \frac{V_1'^2}{Z^2 \lambda} \cdot \frac{R_2}{\lambda s} \quad (22)$$

(2)  $s_0/s = 1$ 인 경우는  $\Delta \lambda P_W = 0$ 이고, 이때의 인버터

에 의한 입력은 고정자에서 평형이 되고, 식 22의  $T_s$ 에 대한 브레이크 역할을 한다. 회전자 전달 에너지는 회전자에 전달에너지는 없고, 따라서 회전자 속도변화는 없다.

(3)  $s_0/\lambda s > 1$ 인 경우는  $\Delta \lambda P_W < 0$ 이고, 인버터에 의한 에너지는 회전자에 전달하고, 이것에 상당한 에너지는  $\lambda$  즉 회전자의 속도를 상승시킨다.

이와 같이 에너지의 분포를 변화 시켜주는 인버터의 전력은

$$P_{inv} = m_2 I_2 V_1' s_0 \cos \varphi \\ = m_2 \frac{V_1'^2}{Z_s^2} \left(1 - \frac{s_0}{\lambda s}\right) \left(s_0 R_1' + \frac{s_0}{\lambda s} R_2\right) \quad (23)$$

이고,  $P_{inv}$ 에서 고정자에 전달하는 에너지는  $s_0/\lambda s > 1$ 에서만 성립된다.

숫자적 계산으로 위의  $\Delta \lambda P_W$ ,  $P_{inv}$ ,  $\lambda$ 의 관계를 표시하면 다음과 같다.

$\lambda s = 0.1$ 에서의 경우의  $s_0 = 0.15, 0.2, 0.3$ 에 대한 값의  $\Delta \lambda P_W$ ,  $P_{inv}$ 를 퍼·유니트로 표시하면 그림 9와 같

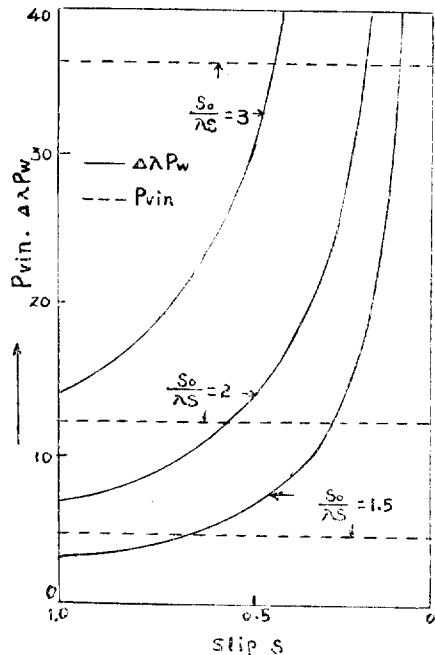


그림 9. 회전자 전달 에너지와 인버터에 의한 고정자 입력의 slip에 대한 곡선

Fig. 9. Transfer energy from stator to rotor and inverter out put with slip.

다. 또 토오크에 대한 슬립과 회전자 속도와의 관계를 표시하면 그림 10과 같다.

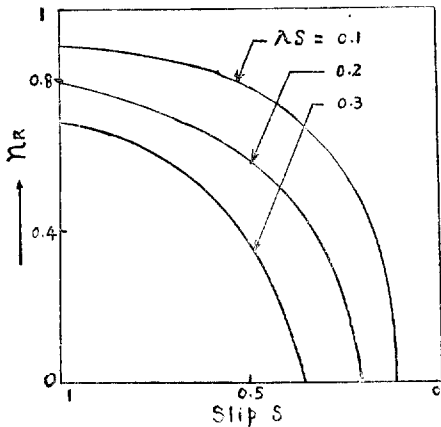


그림 10. 그림 9, 경우의 슬립과 회전자 속도와의 관계  
 Fig. 10. Relation between slip and rotor speed in the case of Fig. 9.

그림 9에서 아스바와 같이 회전자 속도가 저속도의 경우는  $P_{inv}=12.36(s=0.1)$ 의 값에서 회전자에 전달하는 에너지  $\Delta\lambda P_w=36$ 이고  $\Delta\lambda P_w/P_{inv}=3$ 이 되고 control device가 되는  $P_{inv}$ 의 에너지 레벨은 낮아진다. 그러나 회전자 속도가 고속도의 경우는 전달 에너지가 그렇게 필요 없으므로,  $\Delta\lambda P_w/P_{inv}=0.7(s=1)$ 의 값으로 적어지므로 이 곡선은 속도조절에 타당성이 있다.

그림 10은 그림 9와 동일 슬립하에서의 회전자 속도를 표시한 것이다. 즉  $\lambda$ 에서는 토오르크에 의해 결정되는 수치이고, 그림 6의  $\lambda=1$ 의 토오르크 곡선을 이용한 것이다.

#### 4. 결 론

본문은 자동제어에 있어서의 적합성을 생각하여, 유도전동기의 고정자를 자유로히 회전할수 있는 구조와 이 회전자에 외부 제어용 요소로 Thyristor 사용시의 이점을 기술 하였다. 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 회전가능한 고정자 구조에 의해 동기속도를 기준으로 하여, 슬립속도를 제외한 회전을 고정자와 회전자

가 분배하여 소용 함으로 고정자의 속도조절에서 회전자 속도가 조절된다(그림 2). 따라서 이러한 곡선이 우수하게 존재 함으로, 최대 토오르크까지 어떠한 속도에서도 운전된다.

(2) 부하 토오르크는  $\lambda s$ 의 함수가 되고, 토오르크가 일정할때는 회전수에 관계없이  $\lambda s = \text{const}$ 이고 이 factor의 공급주파수는 일정하다. 다시말하면, 일정 토오르크 일때는 인버터의 주파수를 일정히 하고 전압을 조절하면 속도조정이 된다(그림 10).

(3) 토오르크가 일정하면 인버터 입력은 일정하고(그림 9), 이 제어요소에 대한 회전자 전달 에너지는 회전자 저속도 일때 크고, 고속도 일때는 적으므로 실제 사용에 적합하다.

이상과 같은 결론에서 고정자 회전형과 인버터 제어요소와의 이중 이점을 가지므로 자동제어계의 속도조절에 이 계통이 유리 하다고 생각되고, 전동력 응용 계통에 이용된다고 하면 필자로서는 다행으로 생각하는 바이다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 木村; 特殊 二相 誘導電動機(成蹊大學 工學部 工學報告, 1966, 3.
- 2) 朴旻鎬; 可變周波數에 의한 誘導電動機 特性의 圖式算定法에 관한 研究, (第二報). 大韓電氣學會誌 1969, 7. Vol. 18, No. 4, pp. 22~30.
- 3) 朴旻鎬; 可變周波數에 의한 誘導電動機 特性의 圖式算定法에 관한 研究, (第三報) 大韓電氣學會誌 1969, Vol. 18, No. 5, pp. 20~25.
- 4) 朴旻鎬; 誘導機器. 東明社 發行 1963.
- 5) 掘考正; 誘導電動機의 靜止 二次 勵磁 方式의 特性. 日本電氣學會誌. Vol. 87-9, No. 947 1967.
- 6) M.S. Erlicki; Inverter Rotor Drive of an Induction Motor. pp. 1011 IEEE Transation Nov 1965, Vol. Das 84 No. 11
- 7) 圖所; 同期電動機의 新速度制御方式 理論上 實驗. 日本電氣學會誌 pp. 774 Vol. 87-4, No. 943 1967.
- 8) Silicon controlled Rectifier Desingers' Hand Book.