

相變換에 의한 三相誘導電動機의 1/3, 2/3 速度制御에 관한 연구

金 樹 暉

전기 및 전자공학과

(1982. 10. 30 접수)

〈요 약〉

3상, 4극, 동기속도 1800rpm의 농형유도전동기가, 제3고조파 성분의 起磁力の 합성과 相變換에 의하여, 쉽게 1200, 600rpm의 동기속도로 변환될 수 있었다.

이 구동방법은 일반적인 3상농형유도전동기가 單相電源에 의해서 정격출력의 馬力수를 낼 수 있었다.

또한 권선형 유도전동기는 2차저항에 의하여 경부하에서 300~1,800rpm의 가변속도변화범위를 얻을 수 있었으며 극수변환법과 비교하여 여러 운전특성에서 큰 장점을 갖고 있었다.

The 1/3, 2/3 Speed Control of Three-phase Induction Motor by Phase Conversion—A New Approach

Kim, Sue-Woon

Electrical and Electronic Engineering

(Received October 30, 1982)

〈Abstract〉

The synchronous speed, 1800rpm, of the 3ϕ , 4pole, induction motor is easily converted to the 1200 and 600rpm by composition of the 3rd harmonic mmf(magnetomotive force) and phase conversion.

This driving method makes it possible the 3ϕ , induction motor to be operated in the 1 ϕ power source with the equivalent horse powers and rated phase currents.

And the wound-rotor induction motor can be controlled to the variable wide speed ranges, 300~1,800rpm, by this operation, and have more advantages in some characteristics than conventional pole changing method.

I. 서 론

농형유도전동기는 속도제어특성을 제외하고는 많은 우수한 특성들을 갖고 있다. 속도제어방식 중, 일반적으로 널리 사용되고 있는 극수변환방법은 1/2, 1/4 속도제어가 필요로 하는데 적합하고, 또 전원 주파수 제어방법은 효과적이고 경제적인 가변주파수의 전원장치를 얻기가 어렵다는 문제점이 있다.

또한, 최근 많이 연구되고 있는 field 좌표변환법(一名 벡터제어법)도 우수한 특성을 갖고 있으나 경

제적인 면에서 신용가치가 많이 떨어진단다.

본 연구에서는 36슬롯, 4극, 1마력의 3상농형유도전동기가 相變換과 相合成에 의해서 별다른 제어장치 없이 1/3, 2/3의 속도로 쉽게 변환될 수 있음을 보여주고 있다. 2/3속도제어에서는 각 상의 기자력 파형모양이 충분한 크기의 제3고조파 성분이 포함 되도록 설계되어 있다.

그리고, 1/3(동기속도 600rpm)과 2/3(동기속도 1200rpm)의 속도는 三相結線의 單相變換으로 얻어지는 속도이고, 이 방법에 의해, 三相, 單相 겸용의 동등한 출력특성을 갖는 1800rpm의 4극, 2중

슬롯농량유도전동기를 얻어낼 수 있었다.

길전방법은 9/9 全節捲으로 하되, 단전편의 파형 모양과 동일하게 함으로써 회전토크 특성이 일정하도록 하였다.

II. 1/3 속도제어에 대한 개념

1. 單相誘導電動機의 속도-토크 특성곡선

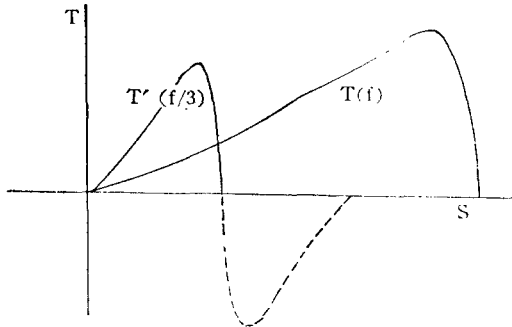


Fig. 1-(a). Torque-speed characteristics by changing of frequency.

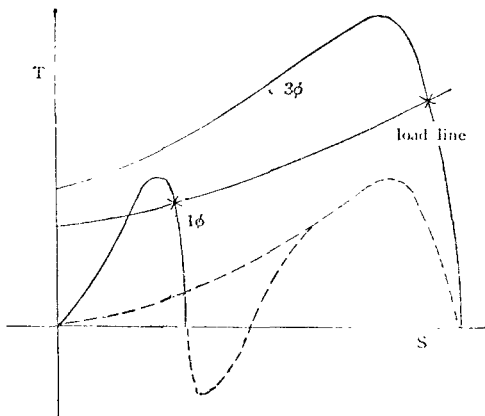


Fig. 1-(b). Torque-speed curve in 1/3 speed region with the 3rd harmonics.

새 3고조파의 분포기자의 極數는 기본 原形波의 3배가 되므로, Fig. 1-(a)의 $T'(f/3)$ 처럼 1/3의 주파수를 갖는 전원을 인가한 것과 같은 특성을 얻는다.

Fig. 1-(b)는 單相구동에 의한 1/3속도에서의 토크가 원형파에서의 토크와 3고조파에 의한 토크가 합쳐지므로 전체적으로 증가되어, 3고조파 성분을 크게 넣어주면, 정격부하를 담당할 수 있을

을 보여주고 있다.

그러나, 이 구동방법은 3고조파와 원형파가 동시에 존재하므로 磁氣的 잡음과 진동이 커므로 정격의 定常운전에는 부적합하다.

2. 相變換에 의한 6극 合成

Fig. 2는 3고조파 기각하는 많이 요구하는 3상 2극 전동기가, 各 相은 다함으로써, 단상 6극의 기본파만 갖는 전동기로 변환될 수 있음을 보여주고 있다.

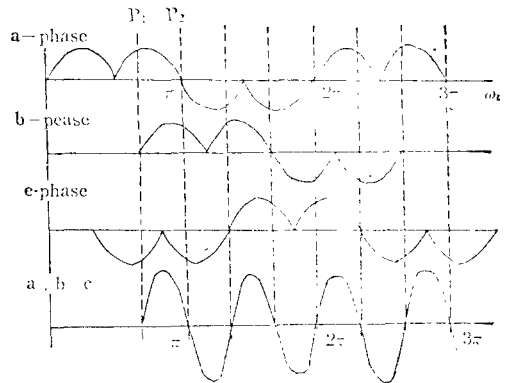


Fig. 2. Single-phase, 6pole composition by summing three phases of the 3rd harmonic waveform.

구간 P_1 과 P_2 의 C 相에서 보면, 負의 成分이 나오므로, 전류의 크기를 감소시키는 효과가 있는 것이 보이나, 실제적인 권선법(Fig. 10-(b) 참조)에서 보면 이런 감소효과는 거의 없다.

III. 相變換과 合成

1. 기본 相捲線

Fig. 3의 기저파 파형의 모양은 S/A, 단전편 파형형태를 갖추고 있으나, 실제적으로 코일이 연속적으로 감기지 않고 크게 2등분으로 나뉘어 길쭉한 코일피치를 갖는다.

그러나, 600rpm과 1,800rpm에서는 실제 이와같이 권선하기는 어려우므로, Fig. 10-(a)와 같이 1층 슬롯의 권선은 1층 권선기러, 2층 슬롯의 권선은 2층 권선기러 결선함으로써, 상하쌍에 의한 4극, 12극의 노출 작극표면의 크기를 동일하게 하였다.

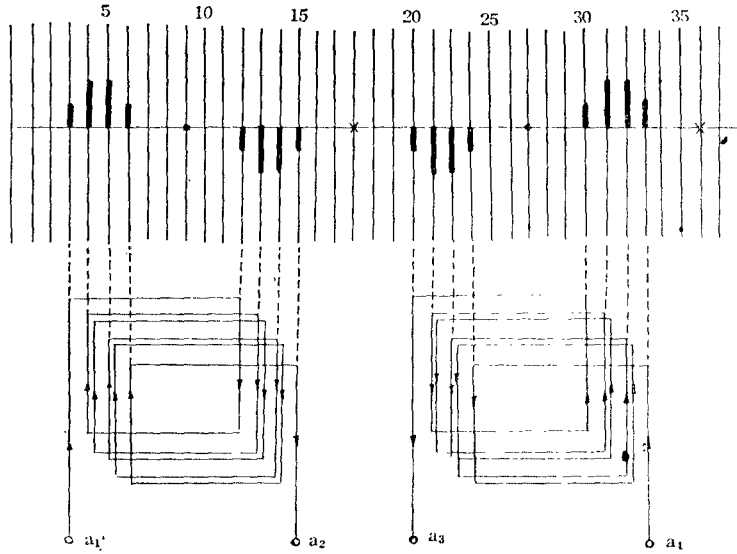


Fig. 3. Current sheet per coil winding, (9/9, full-pitch single layer winding)

2. 三相定常運轉 結線(1800rpm)

완전 동일한 제어특성을 가지고 있으며, 단상운전시
기동운전 방식으로 이용될 수 있다.

이 결선법은 범용의 3상유도전동기의 운전특성과

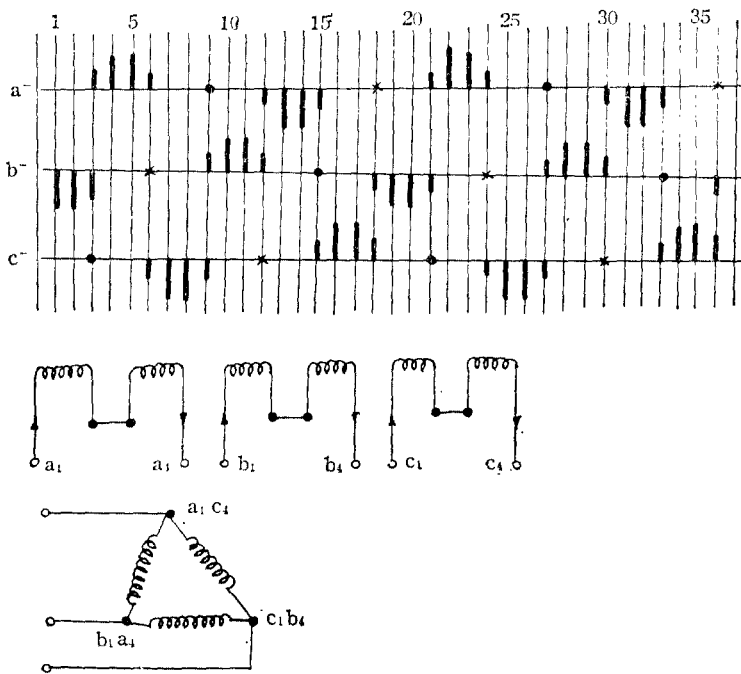


Fig. 4. Connectoin of three-phase nomal operation

3. 單相定常運轉 結線(1800rpm)

이 결선은 단상 및 삼상 접용의 작동을 시킬 수 있고, Fig. 8-(a), (b)에서와 같이 기동특성도 매우 양호하다.

운전도르크 특성은 1차에서 2차에 전달되는 전력에서 구할 수 있고, 슬립 S에서의 전동기의 합성 토르크 T는 정상분 토르크에서 역상분 토르크를 뺀 것이므로,

$$T = |I_{2P'}|^2 \frac{R_2'}{S} - |I_{2n'}|^2 \frac{R_2'}{2-S}$$

$$= \left| \frac{-ZX_m}{R_2'/S + Z(X_2' + X_m)} I_1 \right|^2 \frac{R_2'}{S}$$

$$- \left| \frac{-ZX_m}{R_2'/(2-S) + Z(X_2' + X_m)} I_1 \right|^2 \cdot \frac{R_2'}{2-S} \quad (1)$$

여기서, 킷제항은 정상분 토르크, 뿔제항은 역상분 토르크를 나타내고 있고, $I_{2P'}$, I_{2n} , I_1 , R_2' , X_2' , X_m' 은 각 순방향 2차전류, 역방향 2차전류, 1차전류, 2차저항, 2차리액턴스, 여자리액턴스를 나타내고 있다.

슬립 S는 정격운전에서 4~6%로 되므로 (1)식에서 역상분에 의한 토르크 감소는 10% 이내에 지나지 않는다. 그러나, 최대 토르크는 20%정도 감소하게 되므로 短時間 정격운전용으로 가능하다. 슬롯

6, 15, 24, 33에서 磁氣歪形(magnetic distortion) 현상에 의한 noise와 異狀토르크 현상이 생겨, 이것이 저속도에서 발생, 단상기동을 억제하게 된다. 따라서 Fig. 10-(c)와 같이 자계통로를 만들어 내든지 deep slot, 이중농형 유도전동기를 사용하여 이 효과를 제거시키고 있다.

3상, 단상 변환스위는 Fig. 8-(b)에 표시되어 있고, 起動特性은 Fig. 9와 식 (2)에 나타나 있다.

4. 2/3 속도運轉結線(1200rpm)

Fig. 6에서 각 a, b, c相을 合成하면 단상 6극이 됨을 알 수 있다. a상에서 보면, 슬롯 9에서 슬롯 27까지를 반주기로 볼 수 있고, $a_3 - a_1$ 의 결선방향을 반대로 함으로써, 3고조파가 충분히 포함된 분포파형을 만들어 낼 수 있었다.

이 결선은 충분한 정격출력과 토르크 특성을 얻을 수 있고, 속도제어에 가장 적합한 2/3의 1200 rpm의 동기속도를 갖는 장점이 있으나, 起動特性이 좋지 않으므로, 1800rpm의 결선으로 기동하여, 변환하는 방법을 사용하고 있다.

5. 1/3 속도 運轉結線(600rpm)

이 결선법은 Fig. 5의 단상정상운전 결선과는 3상 중 1상의 결선 방향을 반대로 한 것이 다르다.

Fig. 7은 3상 4극 결선이 단상 12극 결선으로 변

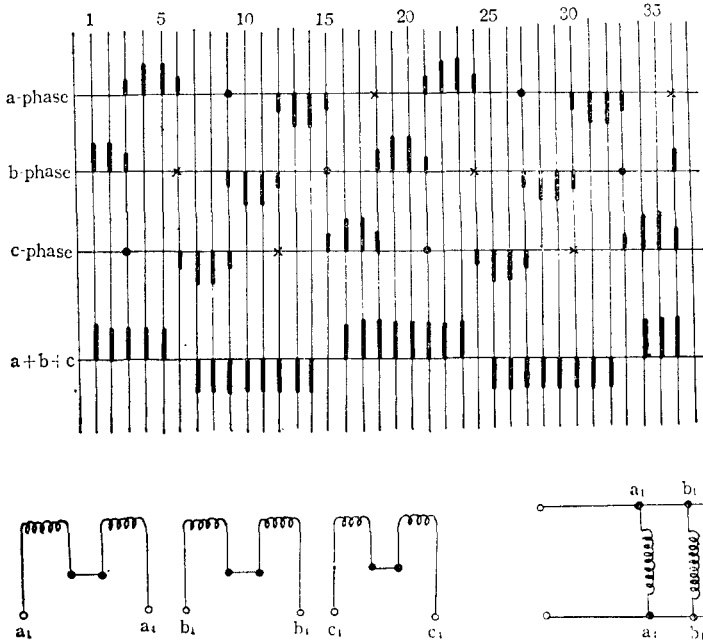


Fig. 5. Connection of single-phase normal operation

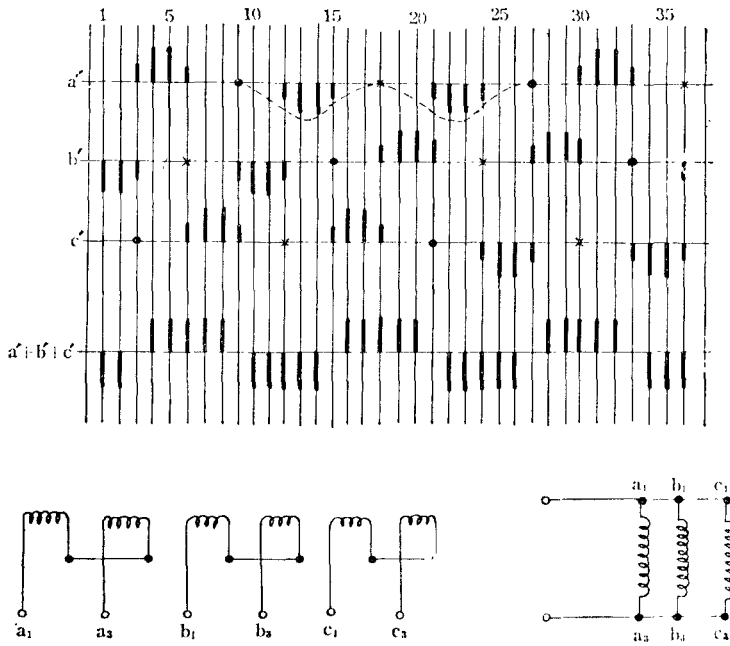


Fig. 6. Connection of the 3rd harmonic operation

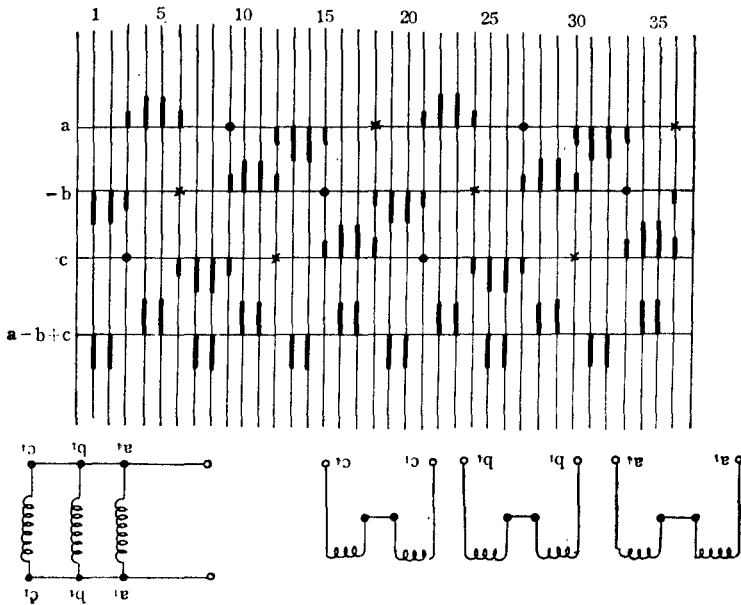


Fig. 7. Connection of 1/3 speed operation

결되는 것을 나타내고 있다.

그림에서 보듯이, 이 가령의 크기가 2/3로 감소하는 것 같으나, Fig. 8-(b)에서 보는 바와같이 감소의 정도는 10% 이하로 나타났고, 그러므로 수직선 12와 17 사이인 1.5코는 2.5코로 증가하여 10% 정도 감소하더라도 2.2배의 토크 증감효과를 얻을 수가 있다. 그러나, 이 결론은 토크(torque)값의 차가 많이 보일 때는 전압의 증감에 따라 달라질 수 있다.

이 결론은 3코의 정속 압축기로 정상속전(1800rpm)으로 운전하는 속도변환하는 방법이 적용되어 있다.

IV. 변환스위치와 기동특성

1. 단상정상운전

Fig. 8-(a)는 a, b 상을 연결시킬, c 상이 기준이 되고 이 상의 1/3의 차압이 각 코일 상을 잇는 것을 보인다.

즉, c 상의 가령은 3코의 a, b 상과 정각하여 90°의 위상차를 이루게 되므로 이 사이에 적당한 용량의 커패시터를 연결하고 좋은 기동특성을 얻을 수 있다.

Fig. 8-(b)는 3코의 단상으로 변환시키는 스위치의 위상각을 1/3 단상운전으로 바꿀 수 있는 가령 스위치를 갖게 되어 있다. 결론으로 보지만 c

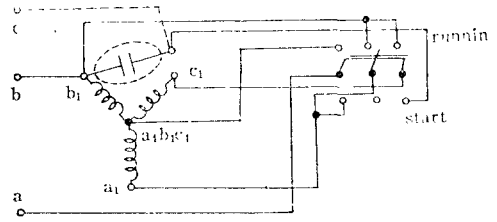


Fig. 8-(b). Conversion & starting switch for 1φ normal operation

상에 결되는 증가하고, 커패시터를 하면, 3상-단상 가령 스위치가 되고 2코 코어로 전압을 달리

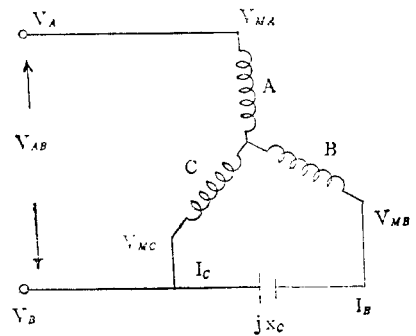


Fig. 9. 1φ circuit by condenser starting

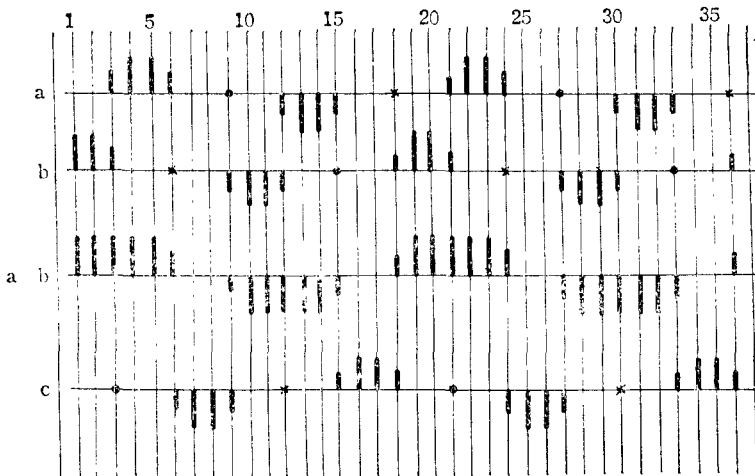


Fig. 8-(a). Starting torque of 1φ normal operation

가면, 고장각은-단상유전의 스위치 역할을 하게 된다.

Fig.9는 권선식에 의한 3상유전동기의 단상기 권선회로를 나타내고 있다.

식 (2)는 이 회로의 기동도폭도를 나타내며, T_{st} ,

$$T_{st} = 3r_{2r} (|I_{1P}|^2 - |I_{1N}|^2) \cdot 3 \left(\frac{V_{1B}}{3} \right)^2 \frac{X_m^2 R_2'}{R_2'^2 [(X_m + X_2)'^2]} \cdot \left\{ \left| \left(R_s + \frac{X_c}{2\sqrt{3}} \right) + Z \left(X_s - \frac{X_c}{2} \right) \right|^2 - \left| \left(R_s - \frac{X_c}{2\sqrt{3}} \right) + j \left(X_s - \frac{X_c}{2} \right) \right|^2 \right\} \cdot \left[\left(R_s^2 - X_s^2 + \frac{2}{3} X_c X_s \right) + Z \left(2R_s X_s - \frac{2}{3} X_c R_s \right) \right]^2 } \cdot \frac{V_{1B}^2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{X_m^2 R_2'}{R_2'^2 [(X_m + X_2)'^2]} \cdot \frac{\frac{2}{3} X_c R_s}{\left(R_s^2 - X_s^2 + \frac{2}{3} X_c X_s \right)^2 + \left(2R_s X_s - \frac{2}{3} X_c R_s \right)^2} \quad (2)$$

식 (2)에서 각 대기동도폭도는

$$X_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \text{에서}$$

$$T_{sm} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(\frac{V_{1B}}{Z_s} \right) \frac{R_s}{Z_s - X_s} r_{2r} \quad (3)$$

이 된다.

2. 1/3, 2/3 속도운전

이 권선법을 채택하면, 기동도폭도가 형성되지 않으므로, 단상정각상운전에서의 기동도폭도를 이용한 기동한 다음, 변환스위치를 사용하여 속도를 얻는 방법은 유효하고 있다. (Table 1, 참조)

V. 실험 및 토의

1. 권선법

Fig.10-(a)는 실제 권선회로 모양을 보여주고 있

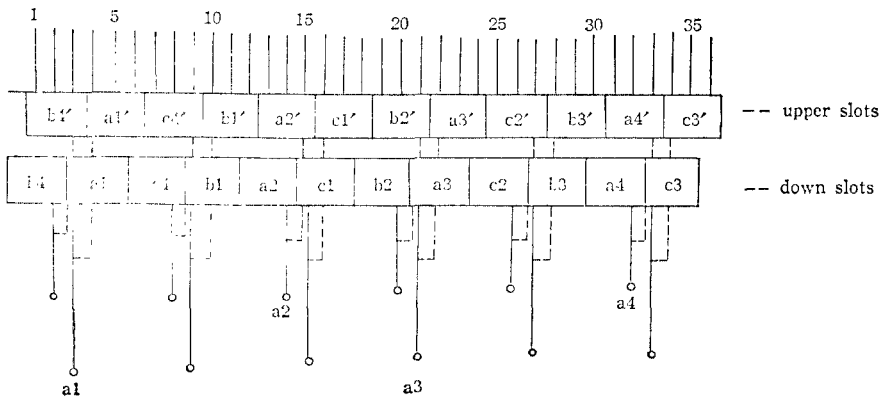


Fig.10-(a). Actual, 9/9, full-pitch, double layer winding

다. 여기서 길이는 2층 슬롯에서 나온 권선으로 1층 권선에서 나온 단자의 변형으로 연결한다.

Fig.10-(b)는 권선방향이 서로 다른 권선거리 한 슬롯에 있을 때의 기각과 분회와의 조율을 보여주고 있으며, 그림에서의 같이 슬롯 3, 6, 9에서 좌측이 슬롯 배부를 정으로 통과함으로써 상부권선이 많이 증가되고 noise의 크기가 異狀도폭도가 발생하여 단상기동은 억제하게 한다. 이를 위해 Fig.10-(c)에서의 같이 은박지를 씌운 규소강판을 정으로 끼우거나, 2중 슬롯팅을 사용하였다.

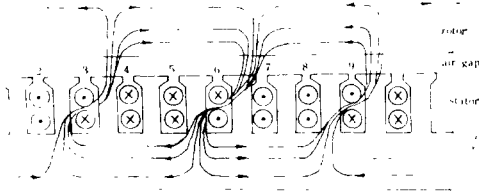


Fig. 10-(b). Flux flow in the edge slot in low speed operation

2. 방열효과와 진동

Fig. 11에서 보는 바와같이, 슬롯 외부에 남게 되는 연결권선들의 방열효과는 Fig. 11-(b)가 표면적이 크게 되므로 증대되는 것을 알 수 있다. 권선소손이 잘 일어나는 곳으로 알려지고 있는 이 외부권선유, Fig. 11-(b)에서는 각 층별로 묶어 줄 수 있기 때문에, 기계 및 자기적(磁氣的) 진동에 의한, 에나멜의 접촉절연열화를 감소시킬 수 있다.

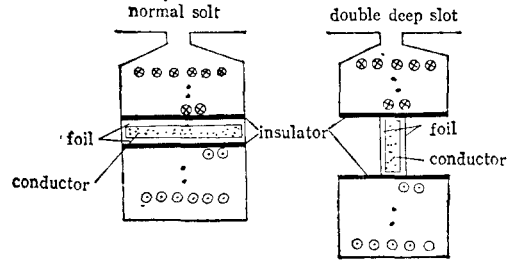


Fig. 10(c) Traverse magnetic flux path for the edge slot

3. 결선법 운전특성

Table 1은 각 결선법 운전특성을 나타내고 있다. 여기서 이 결선법은 동량증가와 시동-운전 변환회로의 변압성이 문제점으로 남아있다.

4. 권선형 유도전동기에의 응용

이제까지의 3단 속도제어법을 권선형 유도전동기에 응용하면, 廣域, 無段 속도제어방식을 얻을 수 있다.

Table 1. Operation characteristics (per unit value)

synch speed	operation phase winding layer	operation wiring	phase current	max. torque	starting wiring	starting torque	copper amounts	noise & vibration effect
1800rpm	9/9 pitch 3φ double layer		1	1		1	1	0
	9/9 pitch 1φ double layer		1	0.87		1	1	some
1200rpm	9/9 pitch 1φ single layer		1	1.20		0	1	some
600rpm	9/9 1φ double layer		1	2.21		0	1	some
1800rpm	8/9 pitch 3φ double layer		1*	1*		1*	0.95*	0

*: some variable value

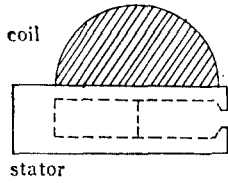


Fig. 11-(a). 8/9, short pitch double layer winding

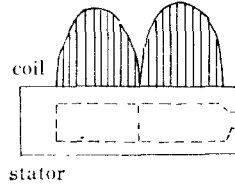


Fig. 11-(b). 9/9, full pitch double layer winding

Surface area of outer slot coils

Fig. 12. 는 3단 속도-토크 특성이, 2차저항을 조절함으로써 DC 전동기의 토크 특성곡선을 나타낼 수 있음을 보여주고 있다.

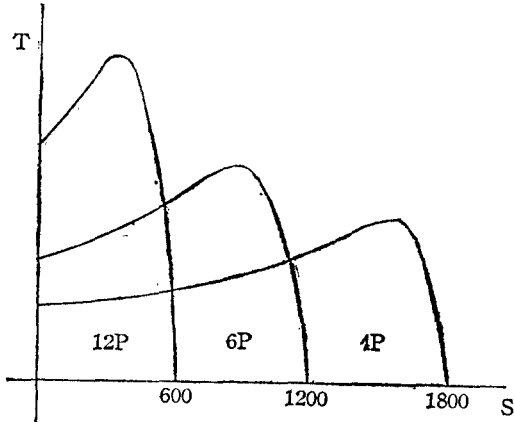


Fig. 12-(a). Three-step control of squirrel-cage induction motor.

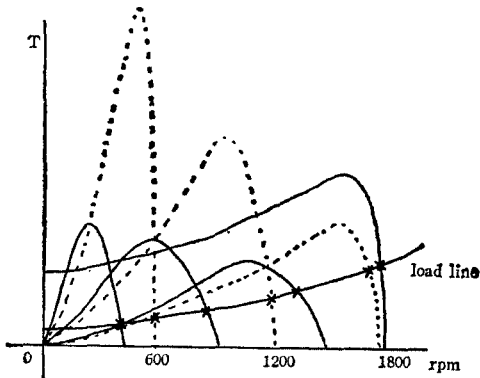


Fig. 12-(b). Three-step control of wound-rotor induction motor by rotor resistor.

Fig. 13. 은 속도제어가 이루어지는 과정을 나타낸 것으로, 점 A에서 E까지 2차저항법에 의한 제어범위를 보여주고 있다.

즉, 2차저항법에 의해서는 강부하에서 50%까지 속도제어가 가능하므로 1800rpm에서 1,600rpm까지 1차 제어를 하고(A점에서 B점까지), 스위치를

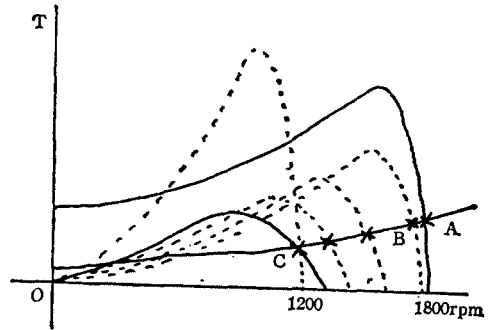


Fig. 13-(a). Rotor resistor control from 1800 to 1200 rpm.

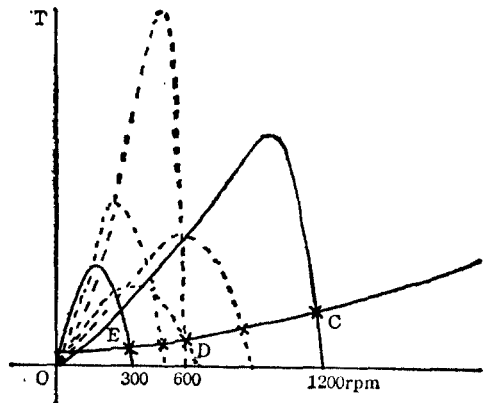


Fig. 13-(b). Rotor resistor control from 1200 to 300rpm.

일단 1,600rpm에서 1,200rpm으로 (B권에서 C권으로) 속도변환은 하게 된다(Fig.13-(a).).
 이 때 1,200rpm에서 600rpm까지(권C에서 권D까지) 2 권에 의해 1 속도로 회전수인 경우, 600rpm에서 속도변환을 행하고, 300rpm에서 1 속도를 얻는 것이 가능할 수 있다(Fig.13-(b).).

고전압 유도전동기가 2차전압과 1차전압에 의한 속도를 회전수인 경우, 전압변이를 통한 SCR과 Gate를 3상운전 및 2상운전을 비교하여 조사하고 있다. 3상운전은 아이소속을 6개를 선택하여 50, 75, 100, 125, 150, 175에 할 수 있으나, 단상운전은 100, 125, 150, 175의 아이소속 2개의 아이소속 2차전 피크

고, 3상운전의 인입차 의한 Gate부동은 하한 한도였고, 아이소속은 0°~180°까지 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

Table 2.는 고전압에 의한 속도 2의 수속변환에 의한 속도변이의 장단점을 비교하고 있다.

표시한 한도 있는 차속부의 속도변환의 장점은 커핑도호로, 변압조위차수, 피크전압, 단상운전에서의 동이치이고, 강변화면 등 그의 변화가 될 특장성, 순회로에 인입차 호가, 고전압 전압부의 호가, 아이소속의 수의 정밀성, 그와 같이 아이소속의 변위 등의 정밀성과 아이소속의 수의 정밀성 등이 있는 것이 있을 수 있다.

Table 2. Step control in 2o induction motor

pole \neq	Phase conversion			Pole changing			unit	refer
	4p→4p	4p→6p	4p→12p	4p→8p	4p→6p	4p→12p		
winding layer	single	single	single	single	double	double	layer	benefits in phase conversion
slot \neq	24, 36, 48	24, 36, 48	24, 36, 48	48	36	72	slots	
copper amount	1	1	1	1	2	2	p.u.	voltage control in wound rotor
slot's depth	1	1	1	1	2	2	p.u.	
frame size	1	1	1	1	1.2	1.2	p.u.	cr.
SCR & Gate \neq	2	2	2	6	6	6	cr.	
gate angle	180	180	180	150	150	150	degree	benefits in pole changing
starting torque	1	0	0	1	1	1	p.u.	
maximum torque	0.87	1.20	2.21	1.8	1.4	2.5	p.u.	
line current	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	1	1	1	p.u.	cr.
conversion switch \neq	2	2	2	2	1	1	cr.	
noise & vibration	some	some	some	0	0	0		

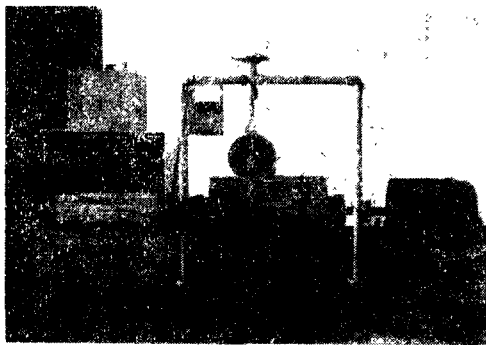


Photo.1. General overview with dynamometer.

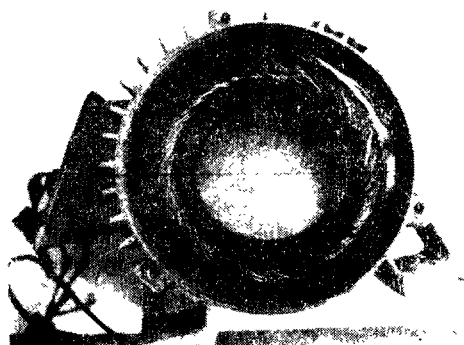


Photo.2. Usual, 8/9, short-pitch double-layer winding.

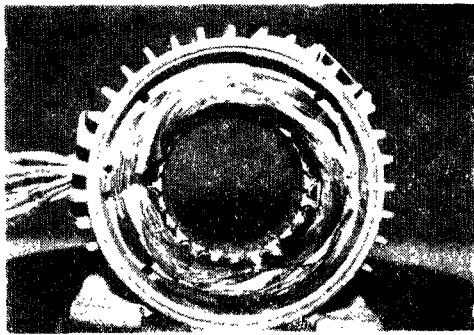


Photo. 3. 9/9, full-pitch single-layer winding for 1200rpm driving.

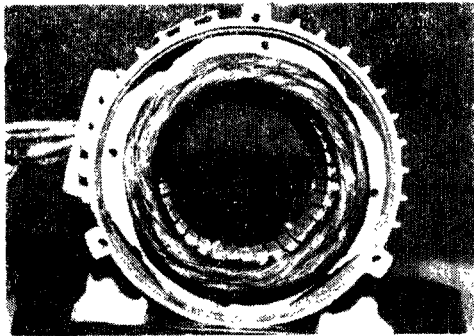


Photo. 4. 9/9, full-pitch double-layer winding for 600, 1800rpm driving.

IV. 결 론

AC 가변속전동기의 제어는 가변속기제어장치, 진리용 변조해, μ -processor의 有機的인 적용으로 다양화 되고 있으나, 다속변전압 이상 實用的이고 경제적인 방법이 아직 없는 실정이고, 이것 역시 크기의 속도범위가 있어서 제한성이 있다. 이 점을 보완한 것이 결전압법이다. 그러나, 이 방법을 적용하므로, 극점속, 극점속의 감소등의 단점이 있으나, 결전압과 극점속이 거의 없는 것으로 나타났다. 이 변전압의 장점을 살펴보면 다음과 같다.

1) 이 결전압으로, 3상, 단상 각각의 속도를 2, 2중속도형 유도전동기 적용이 가능하고, 다속변전압으로 인가가 이리서 1/3, 2/3 속도를 변전압에 의해 정합성으로 통하여 쉽게 적용시킬 수 있음을 보여주고 있다.

2) 2/3 속도(1200rpm)은 공극에 의한 누설자속과 noise가 적으므로, 2단속도 제어용 킬로로 하는 fan, blower, pump 시스템 적용에 인맞은 것으로 보인다.

3) 12슬롯, 24슬롯에 의한, 위와같은 3중분의 정화한 3단속도를, 36슬롯과 같은 원리로서 일어낼 수 있으므로, 분수파리 소잉 동력유도전동기에 응용하여, 리프트의 가동용 전동기에서 사용하는 것과 같은, 2차지령에 의한 분구인 3단속도에 대신하여 활용될 수 있다.

4) 이 결전압에 의해 결전압 유도전동기는 2차지령법에 의해 경부하에서, 300~1,800rpm까지 variable하게 변화시킬 수 있었다.

5) 극수변전압과 비교하여 소딩, 경량, 다단속도 제어이고, 시스템자체가 감소하므로, 운전, 보수특성이 좋아서서 매우 실용적이다.

참 고 문 헌

- (1) S. A. Nasar, "Electromagnetic energy conversion devices and systems," Prentice-Hall, Inc. pp.235-282.
- (2) Veinott C.G., "Spatial harmonic magnetomotive forces in irregular windings and special connections of polyphase windings," IEEE P. A. S. vol. PAS-83, pp.1244-1253, 1963.
- (3) B.K. Bose; "Adjustable speed AC drive systems," Proc. of the IEEE, vol. 70, pp.116-135, 1982.
- (4) F.N. Klein et al; "Energy conservation through the use of adjustable frequency drives in industrial applications," in conf. Rec. 1980. Annu. Meet. IEEE Ind. Soc. pp.545-548, 1980.
- (5) E. Ico Douville et al; "Slection and application of variable speed motor drive systems," pp.514-518, 1980.
- (6) C. P. Lenonc et al; "Large adjustable speed drives," IEEE Trans., vol. PAS-101, pp.1229-1235, 1982.