3상 Dual Inverter 의 구동에의한 유도전동기의 운전 특성 개선

현 동 석　조 순 봉　심 준 석　백 광 선°
(한 양 대) (현대중전기) (한 양 대) (한 양 대*)

Improving on Performance of Induction Motor by 3 Phase Dual Inverter Drives

Hyun Dong seok　Cho Sun bong　Sim Jun seok　Baik Kwang sun
(Han Yang Univ.) (Hyun Dai Elec.Co.) (Han Yang Univ.) (Han Yang Univ.)

ABSTRACT

This paper concerns to drive Induction Motor with open delta winding, and improve general performance, speed response, operation region and flexibility of control, etc. And a control algorithm, which reduces large zero-phase current at this operation, is presented.

I. 서　론

오늘날 자동 제어기기 분야에 있어서 동특성이 우수한 서어보 전동기의 사용은 필수불가결 하다. 직류서어보 전동기가 제어의 선형성과 속응성으로 하여 이 분야에 널리 사용되고 있으나 교류전동기의 사용 또한 점차 확대되어 가고있는 추세이다. 이러한 현상은 인버어터와 같은 전압 주파수 변환기의 보급과 유도전동기의 벡터제어 이론의 개발에 기인한다.

1972 년 F.Blaschke [1]에 의하여 제안된 벡터제어이론은 그후 여러학자들에 의하여 보완되고 실용화되어 왔으며 R. H.Park 와 G.Kron 에 의한 유도전동기의 2축 모델링과 플레밍의 왼손법칙에 의한 발생토오크의 표현을 이론적 기초로 한다. 따라서 벡터제어는 유도전동기 운전에 있어서 자속과 토오크의 독립적인 제어를 가능하게 할 뿐 아니라 직류전동기 운전시와 같은 특성을 얻게 한다. 그러나 벡터제어 에서는 좌표변환을 위한 벡터회전자를 필요로 하기 때문에 시스템의 구성이 복잡하게 되고 전동기 파라메터 변동에 의하여 검출자속이 실제값으로부터 벗어나게 되면 정확한 토오크 및 자속제어가 어렵게 된다.[2]

벡터제어의 경우와 같이 회전자 자속이 아니라 고정자 자속을 제어 대상으로 함으로써 자속벡터의 검출오차를 저감하고 검출자속벡터의 위치에 따라서 적절한 전압벡터를 선택하게 함으로써 시스템 구성을 단순화 하는 동시에 토오크 및 자속을 직접제어 하고자 하는 노력이 I.Takahashi 등에 의하여 이루어졌다. [3]

한편 대용량 유도전동기를 구동하기 위해서는 인버어터 용량의 대형화와 스위칭 주파수의 저감이 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 삼상 dual 인버어터를 제시하여 인버어터의 출력전압 벡터를 다양화 하고 전압벡터 선택의 폭을 확장시킴으로써 인버어터 스위칭 주파수를 저감하는 동시에 신속한 토오크 및 자속제어가 이루어 질 수 있도록 하고자 한다. 또한 유도전동기의 고정자 권선을 독립시킴으로써 발생되는 영상전류를 고찰하고 이를 저감할 수 있는 제어 알고리즘을 제안하고자 한다.

II. 본　론

II-1. 독립권선 방식에 의한 유도기 구동과 전압벡터

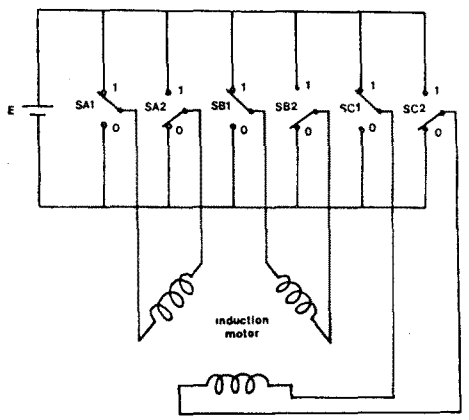


그림 1 인버터 구성도
Fig.1 Schematic diagram of Inverter

독립권선형 유도기를 구동하기 위한 inverter 구성은 그림 1 과 같다. 이 인버터에 의하여 유도기에 인가되는 순시전압 V1 은

$$V_1 = V_q + jV_d$$
$$= 2/3 \left(V_a - 1/2\, V_b - 1/2\, V_c \right) + j\ 2/3 \left(-\sqrt{3}/2\, V_b + \sqrt{3}/2\, V_c \right) \quad \text{— (1)}$$

이 전압벡터의 크기는 3 가지로 나뉘며, 그림 2 는 2^6 ,즉 64 개 스위칭 조합중 19개의 서로 다른 전압벡터를 보인다.

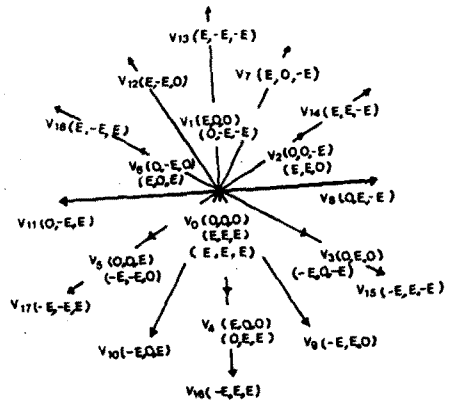


그림 2 전압 벡터
Fig. 2 Voltage Vector

II-II. 토오크와 자속제어

그림 3 은 상 분리법에의한 유도기 과도상태 등가회로를 보인다

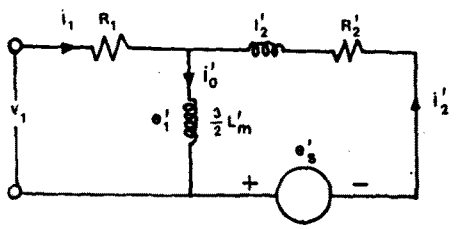


그림 3 유도기 과도상태 등가회로
Fig. 3 Transient Equivalent Circuit of Inductor Motor

여자 인덕턴스는 회로내에서 가장 큰 인덕턴스이므로 이 인덕터의 과도상태가 없다면 다른 인덕터에 나타난 과도현상은 급격히 감소한다.

따라서 여자전류를 적절하게 제어 할 필요가있다.이를 위해 위 의 등가회로에서 여자인덕턴스 L_m 를 전원에 직접연결 시킬 수 있다.

고속에서는 R_1 에서의 오차를 무시 할 수 있으나 저속에서는 오차가 커지므로 위의 등가회로를 사용한다.

이때

$$e'_2 = -jw_m(3/2 L'_m i'_0 + l'_2 i'_2) \quad — (2)$$

$$e'_1 = 3/2\ L'_m P i'_0$$

$$= -(R'_2 + l'_2 P)\ i'_2 - e'_2$$

$$= -[R'_2 + L'_2(P - jw_m)]\ i'_2 + jw_m\ 3/2\ L'_m i'_2 \quad - (3)$$

$$3/2\ l'_m = 3/2\ L_m + l_1$$

$$l'_2 = l_1 + l_2$$

$$e_s = -jw_m\ 3/2\ L'_m i_1 - jw_m(l'_2 + 3/2\ L'_m)\ i'_2$$

$$V_1 = R_1 i_1 + e'_1 \quad — (4)$$

식 (3) 과 (4) 에 의하여

$$e'_1(1 - w_m/w) = se'_1 = -[l'_2(P - jw_m) + R'_2]\ i'_2 \quad — (5)$$

$e'_1 = \sqrt{2}\ E_1 e^{jwt}$ 라고 하면 i_2 는

$$i'_2 = \frac{\sqrt{2}\ E_1}{(R'_2/s) + l'_2} e^{jwt} + A\exp(-R'_2 t/l'_2)\exp(jw_m t) \quad — (6)$$

(A: i_2 의 초기값)

각상의 토오크는

$$T_1 = P/2 w_m \text{ real } [\ e'_s\ ] \text{ real } [\ i'_2\ ] \quad — (7)$$

3 상의 토오크는

$$T_3 = 9/4\ P_{01} L'_m I'_0 I'_2 \{COS\theta_2 - \exp(-R'_2 t/l'_2) \times COS\ [(w - w_m)t + \theta_2]\ \} \quad — (8)$$

$$\theta_2 = \pi/2 + \theta'_2$$

$$\theta'_2 = \tan^{-1}\left(\frac{w[l_2 + (3/2)L_m]}{R_2/S}\right)$$

$$w - w_m = sw$$

P_{01} = 극수

이때 발생되는 순시 torque 는

$$\left.\frac{dt_3}{dt}\right|_{t=0} = -P_{01} L'_m I'_0 I'_2 \left(\frac{9}{4}COS\theta_2 + \frac{R'_2}{l'_2}\frac{(w - w_m)}{sw}\sin\theta_2\right) \quad — (9)$$

식 (8),(9) 에서 L_2/R_2 가 작으므로 슬립주파수가 클수록 과도항은 빨리 없어지고 순시 토오크는 슬립주파수에 비례함을 알 수 있다. 이때 슬립주파수와 토오크의 관계는 그림 5 에서 보인다. 순시토오크를 최대로 내기 위한 슬립주파수는 f=4Oo나 전상상태에서는 f=35일때 최대 토오크를 냄을 알 수 있다.

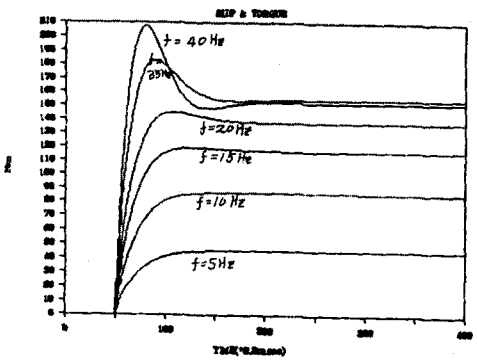


그림 4 ws의 스텝변화에 대한 토오크 응답
Fig. 4 Torque Response For Step Change of ws

이때 자속 ϕ 는 일정해야 하며 전압 벡터의 방향을 따라 벡터의 크기에 비례하는 속도로 회전을 하게 된다.

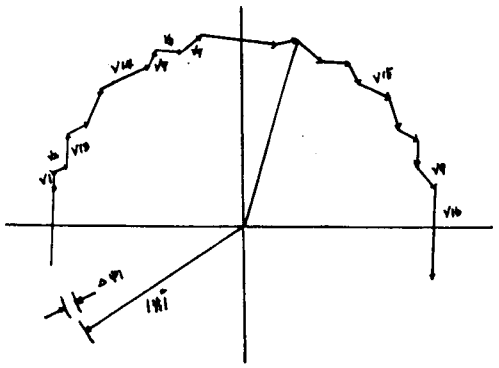


그림 5 ϕ_1의 궤적과 전압 벡터

Fig. 5 Locus of ϕ_1 And Voltage Vector

토오크 비교를 위한 루프는 그림 6 과 같다.

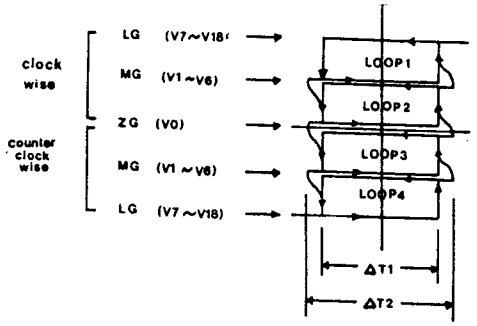


그림 6 3단 비교기

Fig. 6 3 Level Comparator

전압 벡터의 선택은 고속운전이나 임펄스 토오크를 내기 위해서는 L.G 와 M.G 전압 벡터를 선택하며 저속이나 정상상태에서는 M.G 와 ZG 전압벡터를 선택한다.

T가 $T + \Delta T_1/2$ 에 도달하면 토오크를 감소시키는 스위칭이 이루어진다. 이때의 스위칭은 스위칭 주파수가 최소로 되는것을 만족해야한다.

그러므로 고속에서는 $V_1 \sim V_6$, 저속에서는 V_0 를 선택한다.

토오크 스위칭 루프의 이동은 루프2 에 있던 토오크가 $\Delta T_1/2$ 보다 조금 높은 ΔT_2 로 바뀌면서 이루어진다.

II-III. 인버터의 스위칭

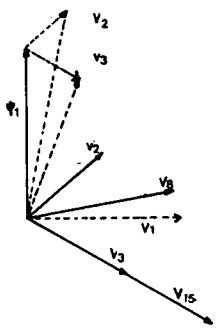


그림 7 전압 벡터의 자속발생

Fig. 7 Voltage Vector To Generate The Desired Flux

그림 7 은 자속 ϕ_1 과 V_1.인접전압 벡터들을 보여준다.

이상적으로 ϕ_1 에대해 V_1 이 선택되어야 한다. 그러나 이 전압벡타는 존재하지 않으므로 인접전압벡터를 선택한다. V_2 와 V_8 은 자속을 증가시키고 V_3 와 V_{15} 는 자속을 감소시킨다. 저속에서 토오크를 감소시키는 전압벡터는 V_0 이고 토오크와 자속이 모두 증가되기위한 최적 전압벡터는 V_2 이다. 토오크를 증가시키고 자속을 감소시키기 위한 전압 벡터는 V_3 이다.

고속에서는 V_2, V_3, V_8, V_{15} 의 전압 벡터를 선택한다.

II-IV. 영상전류

그림 8 은 최적의 전압벡터표다. 입력은 이산치화된 토오크 오차, 자속오차, 자속의 위치이다.

그림 8 의 표에의해 스위칭 했을때 $V_7 - V_{12}$ 를 제외하고는 전압불평형으로 인해 $V_o = V_a + V_b + V_c$ 로 표현되는 영상전압이 나타나고 이로인해 영상전류가 발생한다.

영상전압과 전류의 관계는

$$V_{oi} = i_o + L_o(di_o/dt) \qquad — (9)$$

이 영상전류를 막기위해서는 영상 인덕턴스 L_o에 의한 것과 그림 2 의 여분의 전압벡터를 사용하는 방법이 있다. L_o 에 의한 방법을 썼을때는 토오크가 감소되고 역율이 나빠진다.

본 논문에서는 스위칭 벡터를 이용하여 영상전류를 저감한다.

그림 9 는 영상전류를 저감시키기 위한 비교기 신호 $I_o = 1$ 인 경우 즉 영상전류가 상한 포화밴드에 도달했을때 음의 V_o 를 인가해야한다 .

예로서 n 이 홀수이고 $I_o = 1$ 일때, 스위칭은 (-E, -E, -E) 즉 $V_o = -3E$ 을 선택할수 있으나 V_o 의 크기가 커 전류감소가 급격하게 이루어진다.

스위칭 주파수를 감소시키기 위해서 (0, 0, 0) 즉 $V_o = 0$ 인 전압 벡터를 선택한다.

	θ_n											
τ φ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
2 0	V_{15}	V_9	V_{16}	V_{10}	V_{17}	V_{11}	V_{18}	V_{12}	V_{13}	V_7	V_{14}	V_8
2 1	V_8	V_{15}	V_9	V_{16}	V_{10}	V_{17}	V_{11}	V_{18}	V_{12}	V_{13}	V_7	V_{14}
1 0	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3
1 1	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2
0 0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0
0 1	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0
-1 1	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5
-1 1	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
-2 0	V_{11}	V_{18}	V_{12}	V_{13}	V_7	V_{14}	V_8	V_{15}	V_9	V_{16}	V_{10}	V_{17}
-2 1	V_{18}	V_{12}	V_{13}	V_7	V_{14}	V_8	V_{15}	V_9	V_{16}	V_{10}	V_{17}	V_{11}

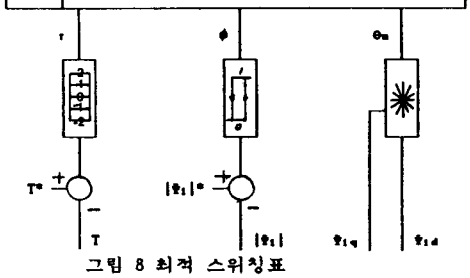


그림 8 최적 스위칭표

Fig. 8 Optium Switching Table

(V_a^*, V_b^*, V_c^*)

	θ_n	$\theta_1, \theta_3, \theta_5$.....			$\theta_2, \theta_4, \theta_6$.....		
	IO	-1	0	1	-1	0	1
V	V0	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
	V1	(E,0,0)	(E,0,0)	(0,-E,-E)	(E,0,0)	(E,0,0)	(0,-E,-E)
	V2	(E,E,0)	(0,0,-E)	(0,0,-E)	(E,E,0)	(0,0,-E)	(0,0,-E)
	V3	(0,E,0)	(0,E,0)	(-E,0,-E)	(0,E,0)	(0,E,0)	(-E,0,-E)
	V4	(0,E,E)	(-E,0,0)	(-E,0,0)	(0,E,E)	(-E,0,0)	(-E,0,0)
	V5	(0,0,E)	(0,0,E)	(-E,-E,0)	(0,0,E)	(0,0,E)	(-E,-E,0)
	V6	(E,0,E)	(0,-E,0)	(0,-E,0)	(E,0,E)	(0,-E,0)	(0,-E,0)
	V7	(E,0,-E)	(E,0,-E)	(E,0,-E)	(E,0,-E)	(E,0,-E)	(E,0,-E)
	V8	(0,E,-E)	(0,E,-E)	(0,E,-E)	(0,E,-E)	(0,E,-E)	(0,E,-E)
	V9	(-E,E,0)	(-E,E,0)	(-E,E,0)	(-E,E,0)	(-E,E,0)	(-E,E,0)
	V10	(-E,0,E)	(-E,0,E)	(-E,0,E)	(-E,0,E)	(-E,0,E)	(-E,0,E)
	V11	(0,-E,E)	(0,-E,E)	(0,-E,E)	(0,-E,E)	(0,-E,E)	(0,-E,E)
	V12	(E,-E,0)	(E,-E,0)	(E,-E,0)	(E,-E,0)	(E,-E,0)	(E,-E,0)
	V13	(E,-E,0)	(E,-E,-E)	(E,-E,-E)	(E,0,-E)	(E,-E,-E)	(E,-E,-E)
	V14	(E,E,-E)	(E,E,-E)	(E,0,-E)	(E,E,-E)	(E,E,-E)	(0,E,-E)
	V15	(0,E,-E)	(-E,E,-E)	(-E,E,-E)	(-E,E,0)	(-E,E,-E)	(-E,E,-E)
	V16	(-E,E,E)	(-E,E,E)	(-E,E,0)	(-E,E,E)	(-E,E,E)	(-E,0,E)
	V17	(-E,0,E)	(-E,-E,E)	(-E,-E,E)	(0,-E,E)	(-E,-E,E)	(-E,-E,E)
	V18	(E,-E,E)	(E,-E,E)	(0,-E,E)	(E,-E,E)	(E,-E,E)	(E,-E,0)

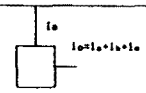


그림 9 영상전류 감소를 위한 스위칭표

Fig. 9 Switching Table For Decreasing

이 경우 다음 스위칭 까지는 io 가 거의 일정한 값을 갖는다.

V_0 와 V_7 ~ V_{12} 의 전압벡터는 각각 3 개와 2 개의 벡터들이 중복된 형태이므로 이들 벡터에서의 영상전류를 감소시키기 위한 스위칭은 동일한 크기와 방향의 벡터를 유지하면서 이루어진다. V_{13} ~ V_{18} 은 ϕ 의 위치를 검출하여 일정전압 벡터를 선택한다.

그림 10 은 전체 시스템에 구성도이다.

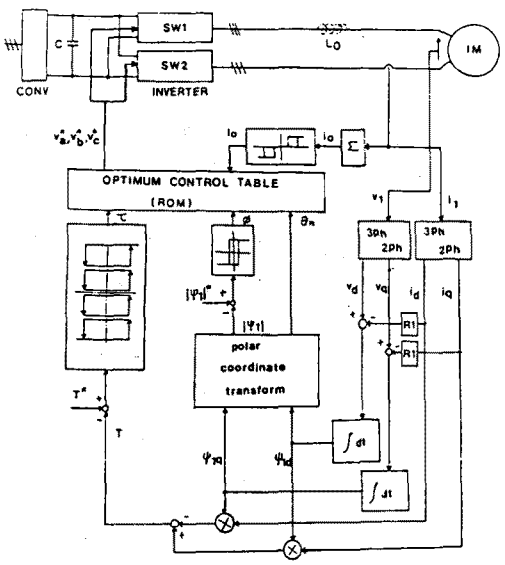


그림 10 시스템의 구성도

Fig. 10 Configulation of Proposed System

III: 시뮬레이션

TORQUE & ZERO CURRENT

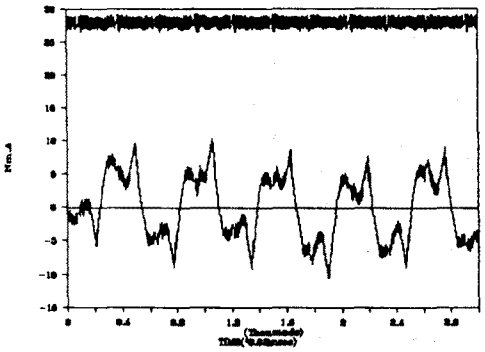


그림 11 보상되지 않는 영상전류와 토오크

Fig. 11 Torque And Not Compensated Zero Phase Current

FLUX SPEED

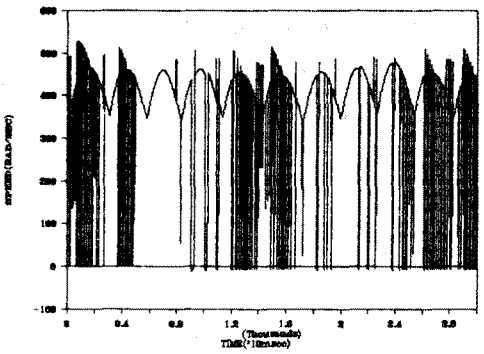
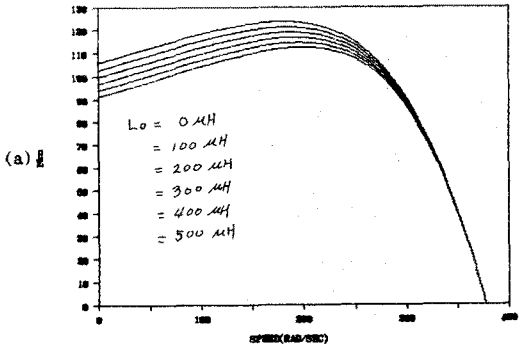


그림 12 보상되지 않은 영상전류와 토오크

Fig. 12 Torque and Uncompensated Zero Phase Current

TORQUE



POWER FACTOR

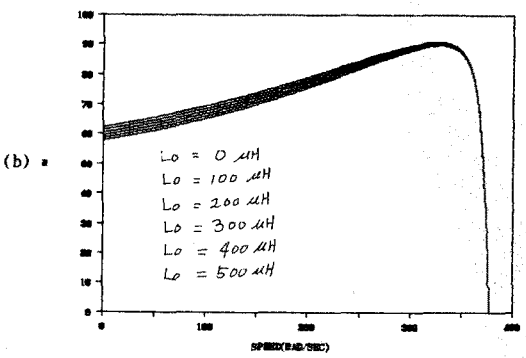


그림 13 L_o와 따른 역률곡선
Fig. 13 Relation L_o And Torque Power Factor
a) L_o에 따른 토오크
a) Torque Curve On L_o
b) L_o에 따른 역률곡선
b) Power Factor Curve On L_o

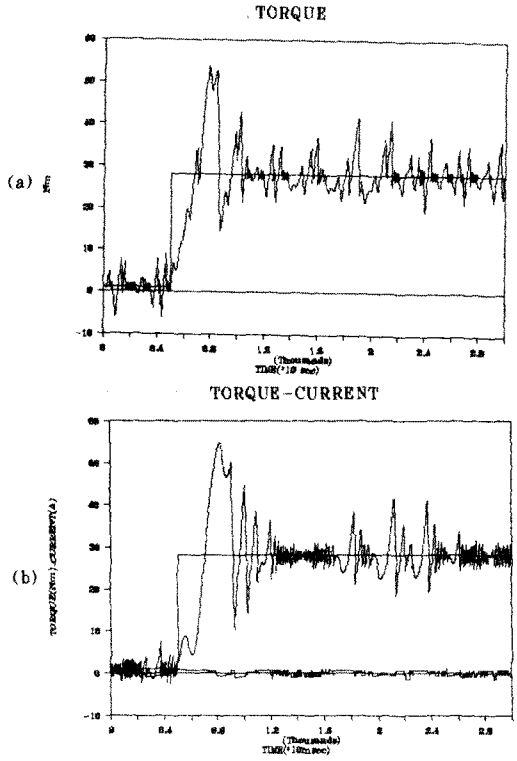


그림 14 토오크 곡선
Fig. 14 Torque Curve
a) 인버터 1대 사용시 b) 인버터 2대 사용시
a) One Set Inverter b) Two Set Inverter

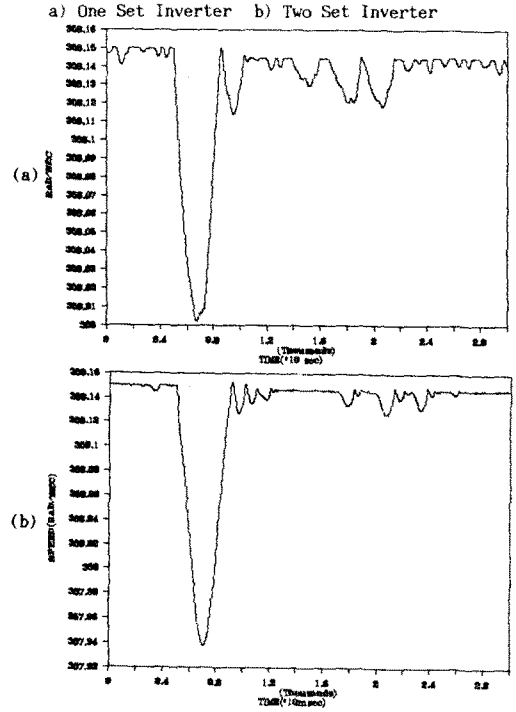


그림 15 속도
Fig. 15 Speed
a) 인버터 1대 사용시 b) 인버터 2대 사용시
a) One Set Inverter b) Two Set Inverter

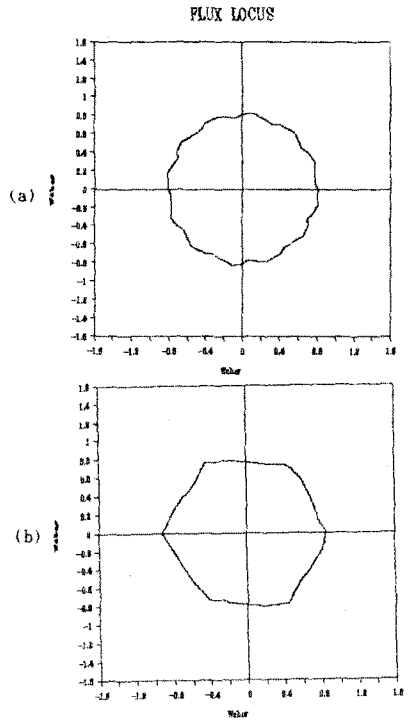


그림 16 자속 궤적
Fig. 16 flux Locus
a) 영상 전류 고려 안할때
a) On Uncompensated Zero Phase Current
b) 영상 전류 고려 할때
b) On compensated zero Phase Current

IV. 결 론

본 연구에서는 3상 dual 인버어터로 구동되는 독립 고정자 권선형 유도 전동기 시스템을 구성하였으며 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 3 상 dual 인버어터를 사용함으로써 다양한 인버어터 출력전압벡터를 얻게 된다.

(2) 다양한 인버어터의 전압벡터를 사용함으로써 인버터의 스위칭 주파수가 저감될 뿐 아니라 슬립주파수의 제어가 용이하게 되므로 원활한 토오크 제어가 가능하다.

(3) 독립 고정자 권선과 영상전압에 따른 영상 전류는 영상전류제어 알고리즘으로 충분히 저감되며 토오크 발생에 미치는 영향은 작다.

REFERENCE

[1] F.Blaschke, " The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvector Closed Loop Control System for Rotation Machines," Siemens Rev Vol.3P, pp.217-220,1972

[2] L.Garces, " Parameter Adaptation for the Speed-Controlled Static AC Drive with a Squirrel-Cage Induction Motor, " IEEE Tras. I.A., Vol. IA-16,pp. 173-178,1980

[3] I.Takahashi and T.Noguchi, " A New Quick Response and High Efficiency Control Strategy of an Induction Motor, " IEEE Tras. I.A., Vol. IA-22, pp.820-827, 1986