

二相誘導電動機の位相制御時 發生トオク에 대한 解析

Analysis of The Generating Torque Characteristics of 2-Phase Induction Motor in Phase Control.

元 鍾 洙* · 張 都 鉉**
(Jong-Soo Won · Do-Hyun Jang)

요 약

2상인버터로 구동되는 2상유도전동기를 위상제어방식으로 운전하는 경우에 발생하는 토오크를 기본과 전압이 인가되는 원리모델에 의해 오카다씨의 수식전개방식을 이용하여 해석하였고, 더불어 발생토오크를 실용상의 관점에서 검토하기 위해 등가회로 정수로 표시된 평균토오크와 진동토오크의 계산식을 유도하였다. 다음으로, 일례로써 평형권선을 가진 서어보형 2상유도전동기를 대상으로 하여 유도된 계산식에 의해서 속도 또는 전압 위상차에 대한 평균토오크 및 진동토오크의 특성과 진동토오크가 평균토오크에 미치는 영향을 검토하였다. 두 상간의 전압 위상차가 작을 때 발생하는 진동토오크를 감소하기 위해 위상제어방식에 전압제어방식을 병용하는 방법, 즉 혼합제어방식을 2상인버터의 새로운 구동방식으로 제시하였다.

Abstract— In this paper, the analysis of a generating torque characteristics of 2-phase induction motor driven with the phase control method is presented. The generating torque equations which represent average torque and pulsating torque are derived from the elementary machine model. The calculating equations which can get the values of average torque and pulsating torque is expressed by the parameters of the equivalent circuit of 2-phase induction motor. According to the calculating equations, these performance characteristics are investigated under various conditions. Finally, a strategy to eliminate non-linearity and pulsating torque generated in driving 2-phase induction motor with the phase control method is presented.

1. 서 론

근래, 전력전자 기술의 괄목할만한 진보와 발전에 따라 인버터에 의한 유도전동기의 속도제어법이 각 방면으로 광범위하게 이용되어지고 있다. 따라서 각 구동방식에 따른 전동기의 발생토오크 특

성을 파악할 필요가 있으며 이에 대한 흥미있는 결과도 많이 보고되었다. 그러나 종래의 연구결과 대부분은 3상인버터로써 구동하는 3상유도전동기의 경우를 연구대상으로 하여 발생토오크 특성 및 개선법에 대해서 서술하였다.^{1)~3)}

2상 인버터로 구동되는 2상유도전동기의 구동 방식은 Rojat씨 등이 발표한 4개의 사이리스터로 구성된 간단한 반브릿지 인버터(Half bridge inverter)로써 구동하는 2-스텝 구동방식,⁴⁾⁵⁾ Matsui씨 등이 발표한 전브릿지 인버터(Full bridge inverter)로써 구동하는 4-스텝구동방식 등이 있다.⁶⁾ 이와 같

* 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授
** 正 會 員 : 湖西大學 電氣工學科 助教授
接受日字 : 1987年 10月 12日
1次修正 : 1988年 1月 3日
2次修正 : 1988年 4月 2日

은 구동방식은 두 상간의 전압위상차를 90°로 고정하고 두 상에 인가되는 구형파 전압의 펄스폭에 의해 제어하는 전압제어방식으로써, 인버터 출력전압의 펄스폭에 대한 발생토크의 특성을 검토한 논문은 Okada씨 등에 의해 발표되었다.^{9)~10)}

최근, 2상인버터로 구동하는 2상유도전동기의 새로운 구동방식으로 발표된 위상제어방식은 스텝 구동방식과는 달리 두 상의 인가전압의 크기는 고정하고 두 상간의 전압위상차에 의해 제어하는 구동방식으로써,^{11)~14)} 본 논문에서는 이와 같은 위상 제어방식으로 2상유도전동기를 구동할 경우에 발생하는 토크의 특성 해석 및 개선법에 대해 다루었다. 즉, Okada씨의 수직전개과정을 이용하여^{6),11)} 각 상에 인가되는 입력전압의 비와 위상차를 변수로 하는 발생토크의 수식을 유도하였으며, 더불어 2상유도전동기에서 성립하는 고유한 등가회로의 정수로 표시되는 실용성있고 간편한 평균토크와 진동토크의 계산식을 도출하였다. 다음으로, 유도된 평균토크와 진동토크의 계산식에 의하여 위상제어를 수행하는 2상유도전동기의 각종 토크 특성, 즉 두 상의 입력전압의 비와 위상차 또는 속도에 대한 평균토크 및 진동토크의 특성과 진동토크가 평균토크에 미치는 영향도를 수치례를 이용하여 검토하였다. 또한 위상제어를 수행함으로써 생기는 진동토크를 감소시키는 대책으로 위상제어와 전압제어를 병용하는 새로운 구동방식을 제시하였다.

2. 발생토크의 표시식

2.1 원리모델에 의한 발생토크의 해석

여기서는 2상유도전동기가 평형권선을 가지는 대칭기라고 취급한다.

원리모델의 각 상(여기서는 A상, B상이라고 칭함)에 인가되는 입력전압의 위상차를 ϕ 라고 하고 특성의 해석을 간편히 하기위해 기본파 전압만 고려한다면 A상, B상의 입력전압 v_a, v_b 를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$v_a = V_a \sin \omega t \quad (1)$$

$$v_b = V_b \sin(\omega t + \phi) = K \cdot V_a \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

여기서, V_a, V_b : A상, B상에 인가되는 입력전압의 최대치.

ω : 동기각속도.

$K (=V_b/V_a)$: A상, B상에 인가되는 입력전압 크기의 비.

그때의 입력전류 i_a, i_b 는 식(1),(2)에 따라서 다음과 같이 주어진다.

$$i_a = (V_a/Z_s) \sin(\omega t - \varphi_s) \quad (3)$$

$$i_b = K(V_a/Z_s) \sin(\omega t - \varphi_s + \phi) \quad (4)$$

단, Z_s, φ_s : 입력임피던스와 입력전압, 전류간의 위상차.

A상의 최대자속밀도를 B_m 이라 하고, 입력전류에 의한 A상, B상 자계의 자속밀도를 각각 B_{ga}, B_{gb} 라 하면,

$$B_{ga} = B_m \sin(\omega t - \varphi_s) \quad (5)$$

$$B_{gb} = K B_m \sin(\omega t - \varphi_s + \phi) \quad (6)$$

로 표시할 수 있다.

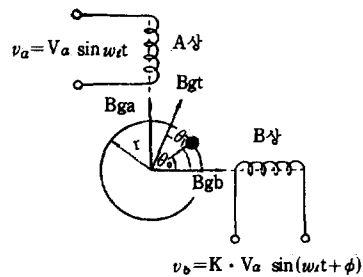


그림 1. 원리모델

Fig. 1. Elementary machine model.

그림1에서와 같이 반경 r , 축길이 l 인 농형회전자중의 도체 1개가 ω_r 의 각속도로 반시계 방향으로 회전하고 있다고 가정한다면, 시각 t 에 대한 도체의 위치는 $\theta = \omega_r t + \theta_0$ (θ_0 는 초기각)이며, 이에 작용하는 자계의 자속밀도는,

$$\begin{aligned} B_{gt} &= B_{ga} \sin \theta + B_{gb} \cos \theta \\ &= (B_m/2) \sqrt{1+K^2+2K \sin \phi} \cos \{(\omega_i - \omega_r)t - \varphi_s - \theta_0 - \psi_1\} \\ &\quad - (B_m/2) \sqrt{1+K^2-2K \sin \phi} \times \cos \{(\omega_i + \omega_r)t - \varphi_s + \theta_0 + \psi_2\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\psi_1 = \tan^{-1} \frac{K \cos \phi}{1 + K \sin \phi}, \quad \psi_2 = \tan^{-1} \frac{K \cos \phi}{1 - K \sin \phi} \quad (8)$$

가 된다. 식(7) 중의 제1항, 제2항의 성분은 각각 정상분, 역상분 자계의 자속밀도를 나타낸다. 본 논문에서 정상분 자계와 역상분 자계를 구분하기 위해 정상분 자계의 자속밀도의 크기를 $(B_{m,r}/2) \sqrt{1+K^2+2K \sin \phi}$, 역상분 자계의 자속밀도의 크기를 $(B_{m,b}/2) \sqrt{1+K^2-2K \sin \phi}$ 라고 표시하면, 위의 자계에 의해 생기는 속도기전력에 의하여 도체1개에 흐르는 전류 i_r 는 다음과 같다.

$$i_r = l \cdot r \{ (B_{m,r}/2) \sqrt{1+K^2+2K\sin\phi} (1/Z_r) (w_i - w_r) \times \cos \{ (w_i - w_r)t - \varphi_s - \theta_o - \psi - \varphi_1 \} - (B_{m,b}/2) \sqrt{1+K^2-2K\sin\phi} (1/Z_b) (w_i + w_r) \times \cos \{ (w_i + w_r)t - \varphi_s - \theta_o + \psi_2 - \varphi_2 \} \} \quad (9)$$

여기서,

$$Z_r = \sqrt{R_r^2 + (w_i - w_r)^2 L_r^2} \quad (10)$$

$$Z_b = \sqrt{R_r^2 + (w_i + w_r)^2 L_r^2} \quad (10)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{(w_i - w_r) L_r}{R_r} \quad (11)$$

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \frac{(w_i + w_r) L_r}{R_r} \quad (11)$$

R_r, L_r : 농형회전자 도체의 저항 및 인덕턴스

따라서, 회전자의 전도체수를 N_r 이라고 하면, 회전자 전체에 발생하는 토크 T 는 다음 식과 같이 주어진다.^{6),15)}

$$T = \frac{N_r}{\pi} \int_0^\pi B_{gr} \cdot l \cdot i_r \cdot r d\theta = 2 \{ Q_r A_r(K, \phi) (1/Z_r')^2 (R_r/s) - Q_b A_b(K, \phi) (1/Z_b')^2 \{ R_r / (2-s) \} - \sqrt{Q_r Q_b} \sqrt{A_r(K, \phi) A_b(K, \phi)} \times \{ (1/Z_r') \cos(2\omega_i t - 2\varphi_s - \psi_1 + \psi_2 - \varphi_1) - (1/Z_b') \cos(2\omega_i t - 2\varphi_s - \psi_1 + \psi_2 - \varphi_2) \} \} \quad (12)$$

여기서, $Q_r = \omega_i (B_{m,r}/2)^2 (lr)^2 N_r$ (13)

$Q_b = \omega_i (B_{m,b}/2)^2 (lr)^2 N_r$ (14)

$A_r(K, \phi) = (1+K^2+2K\sin\phi)/4$ (15)

$A_b(K, \phi) = (1+K^2-2K\sin\phi)/4$ (16)

$Z_r' = \sqrt{(R_r/s)^2 + (\omega_i L_r)^2}$ (17)

$Z_b' = \sqrt{\{ R_r / (2-s) \}^2 + (\omega_i L_r)^2}$ (18)

식(12)중의 정상분, 역상분 자계 $B_{m,r}, B_{m,b}$ 의 크기는 회전자의 회전속도에 관계없이 일정하다고 취급하였지만, 회전자의 회전속도의 변화를 고려하여 각각 $B'_{m,r}, B'_{m,b}$ 이라고 표시하면 식(13), (14)는 다음 식과 같이 된다.

$Q'_r = \omega_i (B'_{m,r}/2)^2 (lr)^2 N_r$ (19)

$Q'_b = \omega_i (B'_{m,b}/2)^2 (lr)^2 N_r$ (20)

그러므로 자계의 속도 변화를 고려한 토크의 식은 식(12)의 Q_r, Q_b 을 식(19), 식(20)의 Q'_r, Q'_b 로 바꾼 것이 된다. 즉,

$$T = 2 \{ Q'_r A_r(K, \phi) (1/Z_r')^2 (R_r/s) - Q'_b A_b(K, \phi) (1/Z_b')^2 \{ R_r / (2-s) \} - \sqrt{Q'_r Q'_b} \sqrt{A_r(K, \phi) A_b(K, \phi)} \times \{ (1/Z_r') \cos(2\omega_i t - 2\varphi_s - \psi_1 + \psi_2 - \varphi_1) - (1/Z_b') \cos(2\omega_i t - 2\varphi_s - \psi_1 + \psi_2 - \varphi_2) \} \} \quad (21)$$

위의 식(21)의 제1항, 제2항은 평균토크 중에서 각각 정상분, 역상분토크를 표시하며 제3항은 전원 주파수의 2배인 주파수를 가지는 진동토크를 표시한다. 이 식은 A상, B상에 인가되는 입력전압의 비 K 와 위상차 ϕ 가 평균토크에 미치는 영향에 관해서 이해하기는 편리하지만, 식중에서 실측이 어려운 공극의 자속밀도 $B'_{m,r}, B'_{m,b}$ 가 포함되어 있으므로 정량적 토크 계산을 행하는 목적으로는 적당치 않다. 따라서 식(21)를 전동기의 등가회로 정수를 이용하여 표시한다면 정량적인 토크 계산이 용이해지며, 이는 다음 절에서 유도하였다.

2.2 등가회로 정수로 표시한 평균토크 및 진동토크의 계산식

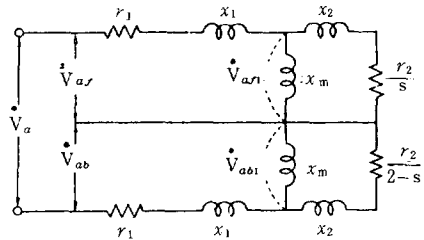


그림 2. 2상유도전동기의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit for 2-phase induction motor.

그림2의 등가회로에서 A상의 정상분 전압 $V_{a,r}$ 및 역상분 전압 $V_{a,b}$ 를 A, B상의 입력전압 V_a, V_b 로 표시하면,

$V_{a,r} = (V_a - jV_b) / 2 = V_a (1 - jKe^{j\phi}) / 2$ (22)

$V_{a,b} = (V_a + jV_b) / 2 = V_a (1 + jKe^{j\phi}) / 2$ (23)

와 같으며,¹⁵⁾ 2상유도전동기의 평균토크 T_o 는,

$$T_o = \frac{2}{\omega_i} \left[|V_{a,r1}|^2 \frac{r_2/s}{(r_2/s)^2 + x_2^2} - |V_{a,b1}|^2 \frac{r_2/(2-s)}{\{ r_2 / (2-s) \}^2 + x_2^2} \right] \quad (24)$$

이다. 여기서 $V_{a,r1}$ 과 $V_{a,b1}$ 은 각각 2상유도전동기의 등가회로에서 정상분회로와 역상분회로의 여자리액턴스 x_m 에 걸리는 단자전압이며 이의 제곱은,

$$|V_{a,r1}|^2 = A_r(K, \phi) C(s) x_m^2 V_a^2 \quad (25)$$

$$|V_{a,b1}|^2 = A_b(K, \phi) D(s) x_m^2 V_a^2 \quad (26)$$

여기서,

$$C(s) = \{ (r_2/s)^2 + x_2^2 \} / [\{ r_1 r_2/s - x_1(x_2 + x_m) - x_2 x_m \dot{} \}^2 + \{ r_1(x_2 + x_m) + (x_1 + x_m)(r_2/s) \}^2] \quad (27)$$

$$D(s) = [\{ r_2/(2-s) \}^2 + x_2^2] / [\{ r_1 r_2/(2-s) - x_1(x_2 + x_m) - x_2 x_m \dot{} \}^2 + \{ r_1(x_2 + x_m) + (x_1 + x_m) r_2/(2-s) \}^2] \quad (28)$$

단, r_1 : 1차저항 r_2 : 2차저항
 x_1 : 1차누설리액턴스 x_2 : 2차누설리액턴스

와 같다. 위의 식(25), 식(26)을 식(24)에 대입하면 등가회로 정수로 표시한 평균토오크의 계산식 T_o 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_o = \frac{2}{\omega_i} (x_m V_a)^2 \left[A_r(K, \phi) C(s) \frac{(r_2/s)}{(r_2/s)^2 + x_2^2} - A_b(K, \phi) D(s) \frac{r_2/(2-s)}{r_2^2/(2-s)^2 + x_2^2} \right] \quad (29)$$

식(21)에서 평균토오크를 나타내는 제1항, 제2항과 식 (29)는 대응하므로 다음과 같은 관계식이 성립한다. 즉,

$$2Q_r A_r(K, \phi) \frac{R_r/s}{(R_r/s)^2 + (\omega_i L_r)^2} = \frac{2}{\omega_i} (x_m V_a)^2 C(s) A_r(K, \phi) \frac{r_2/s}{(r_2/s)^2 + x_2^2} \quad (30)$$

$$2Q_b A_b(K, \phi) \frac{R_r/(2-s)}{\{R_r/(2-s)\}^2 + (\omega_i L_r)^2} = \frac{2}{\omega_i} (x_m V_a)^2 D(s) A_b(K, \phi) \frac{r_2/(2-s)}{\{r_2/(2-s)\}^2 + x_2^2} \quad (31)$$

이 식에서 회전자 도체의 저항 R_r 및 인덕턴스 L_r 을 등가회로 정수로 나타내면,

$$R_r = r_2 / (\beta \alpha^2), \quad \omega_i L_r = x_2 (\beta \alpha^2) \quad (32)$$

여기서, $\beta = m_1/m_2$: 상수비.

$\alpha = (N_1 k_{w_1}) / (N_2 k_{w_2})$: 실효권선비.

$m_1, m_2, N_1 k_{w_1}, N_2 k_{w_2}$: 고정자와 회전자의 상수 및 실효권선수.

가 되며¹⁸⁾, 식(32)을 식(30), 식(31)에 대입하면 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$Q_r' = C(s) (x_m V_a)^2 / (\beta \alpha^2 \omega_i) \quad (33)$$

$$Q_b' = D(s) (x_m V_a)^2 / (\beta \alpha^2 \omega_i) \quad (34)$$

진동토오크를 나타내는 식(21)중의 제 3 항에 식(32), 식(33) 및 식(34)을 대입하면 등가회로 정수로 표시한 진동토오크의 계산식 T_o 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_o = (2/\omega_i) (x_m V_a)^2 \sqrt{C(s) D(s) A_r(K, \phi) A_b(K, \phi) \times \{ (1/Z_{b0}) \cos(2\omega_i t - 2\varphi_s - \psi_1 + \psi_2 - \varphi_{20}) - (1/Z_{r0}) \cos(2\omega_i t - 2\varphi_s - \psi_1 + \psi_2 - \varphi_{10}) \}} \quad (35)$$

여기서,

$$\varphi_{10} = \tan^{-1}(s x_2 / r_2), \quad \varphi_{20} = \tan^{-1}(2-s) x_2 / r_2 \quad (36)$$

$$Z_{r0}' = \sqrt{(r_2/s)^2 + x_2^2}, \quad Z_{b0}' = \sqrt{(r_2/(2-s))^2 + x_2^2} \quad (37)$$

진동토오크의 크기를 구하기 위해 식(35)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$T_o = (2/\omega_i) (x_m V_a)^2 G(K, \phi) \sqrt{C(s) D(s) (A^2 + B^2)} \times \cos(2\omega_i t - 2\varphi_s - \psi_1 + \psi_2 - \Phi) \quad (38)$$

여기서,

$$G(K, \phi) = \sqrt{A_r(K, \phi) A_b(K, \phi)} \quad (39)$$

$$A = \cos \varphi_{20} / Z_{b0}' - \cos \varphi_{10} / Z_{r0}' \quad (40)$$

$$B = \sin \varphi_{20} / Z_{b0}' - \sin \varphi_{10} / Z_{r0}' \quad (41)$$

$$\Phi = \tan^{-1}(B/A) \quad (42)$$

3. 발생토오크 특성의 검토

본 장에서는 앞에서 유도한 평균토오크 계산식(29) 및 진동 토오크 계산식(38)을 기초로 하여, 위상제어를 수행하는 2상유도전동기의 각종 토오크 특성, 즉 속도 또는 두 상의 입력 전압의 비 K 와 위상차 ϕ 에 대한 평균토오크, 진동토오크 특성 및 진동토오크의 평균토오크에의 영향도를 출력 6[W]의 서어보용 2상유도전동기(60Hz, $r_1=117 \Omega$, $x_1=125 \Omega$, $x_m=828 \Omega$, $x_2=15.6 \Omega$, $r_2=517 \Omega$)를 대상으로 하여 검토하였다.

3.1 평균토오크 특성의 검토

평균토오크를 등가회로 정수로 표시한 계산식(29)의 제 1항, 제 2항은 각각 정상분토오크, 역상분토오크에 해당하며, 이는 두 상의 입력전압의 비 K 와 위상차 ϕ 가 변수인 $A_r (= (1+K^2+2K \sin \phi)/4)$, $A_b (= (1+K^2-2K \sin \phi)/4)$ 의 크기에 따라 평균토오크 T_o 가 변화함을 알 수 있다.

그림 3은 $V=100[V]$, $f=60\text{Hz}$, $K=1$ 및 0.5 , $\phi=90^\circ, 60^\circ$ 및 30° 일 때, 속도에 대한 평균토오크의 변화를 계산치와 실측치를 비교하여 보이고 있다. 이 그림의 실측치는 K 를 1로 하고 ϕ 를 각각

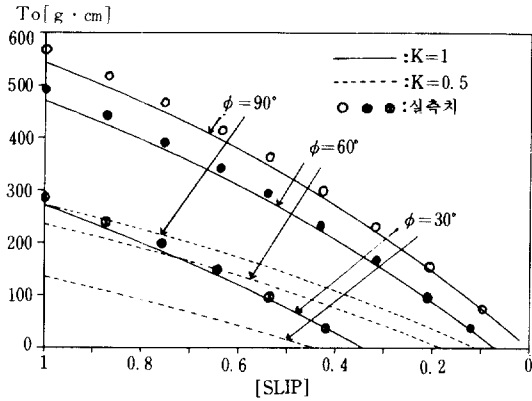


그림 3. 속도-평균토크 특성 (K=1, 0.5)
Fig. 3. Speed-average torque characteristics.

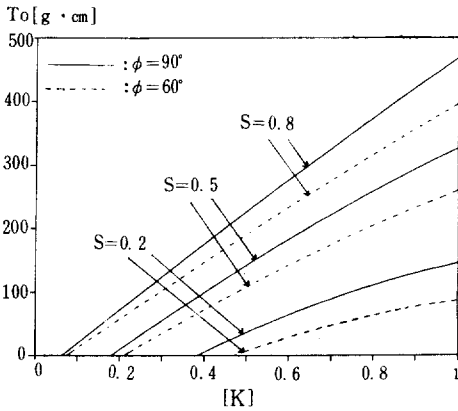


그림 4. K-평균토크 특성
Fig. 4. K-average torque characteristics.

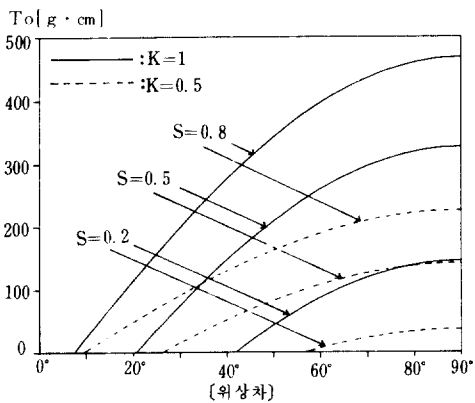


그림 5. 위상차-평균토크 특성
Fig. 5. Phase angle-average torque characteristics.

90°, 60° 및 30°로 했을 때 다이노메타로 측정 한 값으로서 계산치에 어느 정도 일치함을 보이고 있다. 또한 이 그림에서는 위상차를 감소시킬수록 평균토크의 크기가 작아짐을 알 수 있으며, 이때의 특성곡선은 본 연구의 대상기가 2차 저항을 크게 한 서어보용이므로 수하특성을 가진다.

그림 4는 $V=100[V]$, $f=60Hz$, $\phi=90^\circ$ 및 60° , 슬립 $S=0.2, 0.5$ 및 0.8 일 때 두 상의 입력 전압의 비 K 에 대한 평균토크 T_o 의 변화를 나타낸 것으로 선형적인 특성을 보이고 있다. 이 중에서 ϕ 가 90° 인 경우의 특성은 2상서어보전동기의 전형적인 제어방식인 서어보 증폭기에 의한 전압제어방식의 평균토크의 특성이라고 할 수 있다. 그림 5은 $V=100[V]$, $f=60Hz$, $K=1$ 및 0.5 , $S=0.2$ 및 0.8 일 때 위상차에 대한 평균토크의 변화를 나타낸 것으로 이미 밝혀진 바와 같이 sine곡선에 가까운 비선형적 특성을 보이고 있다.^{13), 16)}

3.2 진동토크 특성의 검토

진동토크 계산식을(38)을 보면 위상제어를 수행하는 2상유도전동기는 전원주파수의 2배인 주파수를 거치는 진동토크를 발생하며, 진동토크의 크기는 K 와 ϕ 가 변수인 식(39)의 $G(K, \phi)$ 의 크기에 따라 변화함을 알 수 있다.

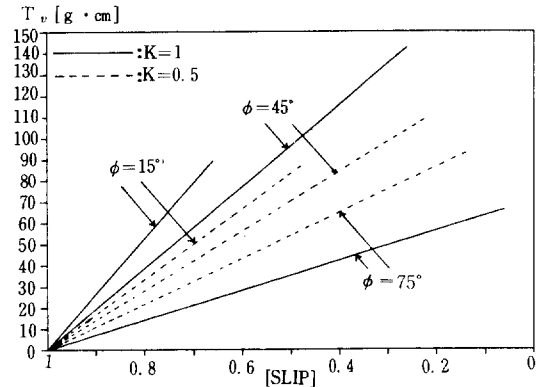


그림 6. 속도-진동토크 특성
Fig. 6. Speed-pulsating torque characteristics.

그림 6은 $V=100[V]$, $f=60Hz$, $K=1$ 및 0.5 , $\phi=75^\circ, 45^\circ$ 및 15° 일 때 속도에 대한 진동토크 T_v 의 변화를 나타낸 것으로 선형적인 특성을 보이고 있다. 위상차 ϕ 가 작을수록 진동토크가 커지고 속도가 빨라짐에 따라 진동토크는 증가함을 알 수 있다.

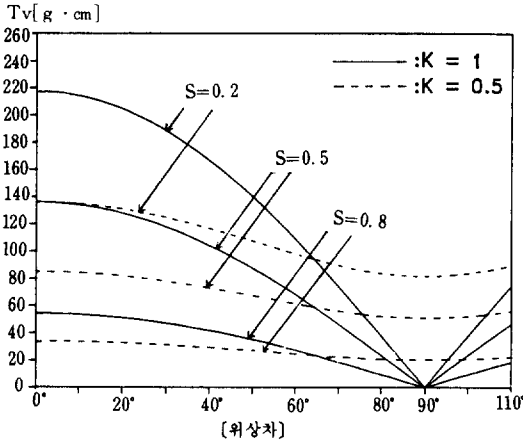


그림 7. 위상차-진동토크 특성
Fig. 7. Phase angle-pulsating torque characteristics.

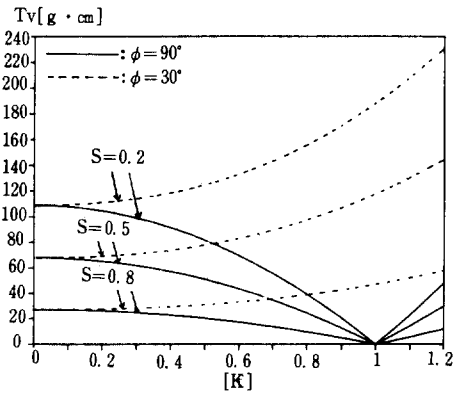


그림 8. K-진동토크 특성
Fig. 8. K-pulsating torque characteristics.

그림 7은 $V=100[V]$, $f=60\text{Hz}$, $K=1$ 및 0.5 , $S=0.2, 0.5$ 및 0.8 일 때 위상차에 대한 진동토크 T_v 의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 임의의 S , 또는 K 의 값에 대해 위상차가 0° 일 때 진동토크는 최대가 되며, 위상차가 증가함에 따라 진동토크는 감소하여 ϕ 가 90° 에서 최소가 되고, 그 이상의 위상차에서는 진동토크가 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 $K=1$, 즉 A상과 B상의 입력전압이 같은 경우, 위상차에 대한 진동토크의 변화는 S 에 관계없이 cosine곡선에 가까운 특성을 보이고 있다.

그림 8은 $V=100[V]$, $f=60\text{Hz}$, $\phi=90^\circ$ 및 30° , $S=0.2, 0.5$ 및 0.8 일 때 K 에 대한 진동토크 T_v 의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 임의의 K 의 값에서 S 가 작을수록, 또는 ϕ 가 작을수록 진동토크

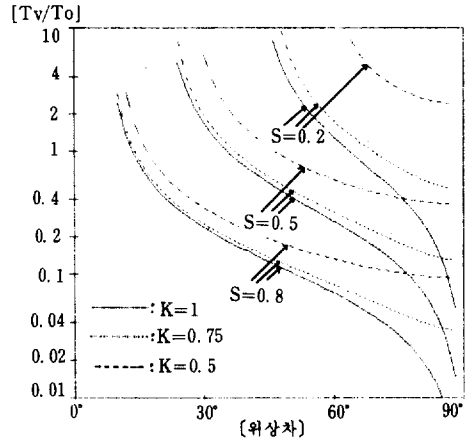


그림 9. 위상차와 T_v/T_o 와의 관계
Fig. 9. Relation between phase angle and T_v/T_o .

크는 큰 것을 알 수 있다. 또한 $\phi=90^\circ$ 인 경우의 특성곡선을 보면 그림 7에서 K 가 1일 때의 위상제어의 경우와 같이 cosine곡선에 가까운 특성을 보여주고 있다.

3.3 진동토크의 평균토크에의 영향

이상에서 위상제어를 수행하는 2상유도전동기의 평균토크와 진동토크의 각종 특성에 관해 밝혔지만 본 절에서는 평균토크와 진동토크를 비교하여 진동토크가 평균토크에 미치는 영향도를 살펴보기로 한다.

그림 9는 $V=100[V]$, $f=60\text{Hz}$, $K=1, 0.75$ 및 0.5 , $S=0.2, 0.5$ 및 0.8 일 때 위상차 ϕ 에 대해서 진동토크 T_v 의 평균토크 T_o 에의 영향도, 즉 T_v/T_o 의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 T_v/T_o 의 크기는 임의의 K , 또는 S 의 값에 대해 $\phi=90^\circ$ 일 때 가장 작으며 ϕ 가 감소함에 따라 급속히 증가함을 알 수 있다. 또한 임의의 ϕ 에 대해서는 K 가 클수록, 또는 S 가 클수록 T_v/T_o 의 크기가 감소함을 알 수 있다. 다시 말하자면 2상유도전동기를 위상제어로 구동할 경우 두 상간의 전압위상차 ϕ 는 90° 에 가까울수록, 또는 두 상의 입력전압의 비 K 는 1에 가까울수록 진동토크가 평균토크에 미치는 영향도를 줄일 수 있다.

4. 위상제어방식의 개선책

2상인버터로 구동하는 2상유도전동기의 구동방식으로 제시된 위상제어방식을 마이크로프로세서에 의해 PWM구동방식으로 수행할 경우, 고조파전

압을 제거할 수 있고, PWM 전압파형의 점호각을 고정시킬 수 있어 PWM 신호발생장치를 간단히 할 수 있으며, 주파수제어를 고려할 필요가 없는 등의 장점이 있는 반면, 앞에서 밝힌 바와 같이 위상차가 감소할수록 진동토크가 커지고 평균토크 중의 역상분토크가 커져 효율이 감소되는 단점이 있으며, 제어량(위상차)에 대한 평균토크의 특성은 비선형적이다. 이것은 전자의 경우 전동기의 과열 및 진동, 소음의 직접 원인이 되며, 후자의 경우는 페루프제어기에 적용했을 때 속도제어, 또는 위치제어를 행하는데 어려움이 있다.¹⁶ 따라서 이와 같은 문제점을 제거하기 위해서는 위상제어방식과 전압제어 방식을 병용할 필요가 있다.

4.1 전압제어방식의 병용시 진동토크의 특성

위상제어와 전압제어를 병용하는 구동방식으로는 한 상의 입력전압을 고정하고 다른 상의 입력전압과 전압위상차, 즉 K와 ϕ 를 제어변수로 하는 구동방식과 크기가 같은 전압을 두 상에 인가하되 그 입력전압의 크기 V와 위상차 ϕ 를 제어변수로 하는 구동방식을 생각할 수 있다. 각 구동방식의 제어변수에 대한 진동토크의 특성은 다음과 같다.

전자의 경우는 K와 ϕ 가 제어변수로서 이에 대한 진동토크의 특성은 그림10과 같다. 이 그림은 V

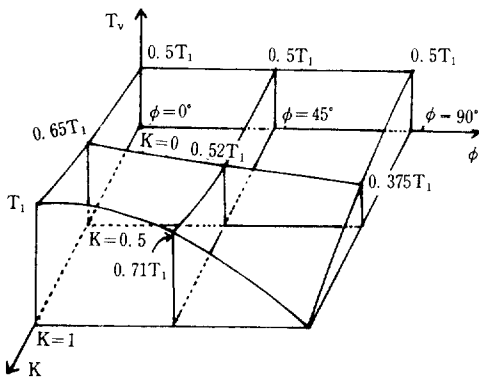


그림 10. K와 ϕ - 진동토크 특성
Fig. 10. K and ϕ - pulsating torque characteristics.

= 100[V], f=60Hz, S를 임의의 값으로 고정한 경우, K와 ϕ 에 대한 진동토크의 변화를 3차원의 그림으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 ϕ 가 60° 이상일 때의 진동토크는 K가 작아질수록 증가하며, 진동토크가 가장 큰 K=1, $\phi=0^\circ$ 에서의 진동토크의 크기를 T_1 이라고 할 때 K가 0일 때의 진동토크의 크기는 $T_1/2$ 이며 K=1, $\phi=90^\circ$ 에서

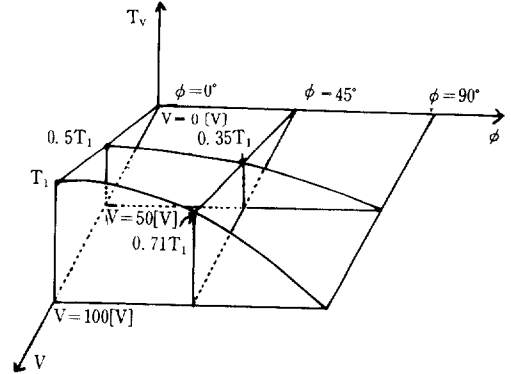


그림 11. V와 ϕ - 진동토크 특성
Fig. 11. V and ϕ - pulsating torque characteristics.

의 진동토크는 0임을 볼 수 있다. ϕ 가 고정되었을 때 진동토크가 평균토크에 미치는 영향도는 그림9를 보면 K가 클수록 작게됨을 알 수 있다.

후자의 경우는 K가 1이고 제어변수는 입력전압의 크기 V와 ϕ 이며 이에 대한 진동토크의 특성은 그림11과 같다. 이 그림은 V/f와 S를 임의의 값으로 고정한 경우, V와 ϕ 에 대한 진동토크의 변화를 3차원의 그림으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 V가 고정되었을 때 위상차에 대한 진동토크의 특성은 cosine 곡선에 가까우며 ϕ 가 고정되었을 때 입력전압에 대한 진동토크의 특성은 선형적임을 볼 수 있다. 이를 그림10과 비교해 보면 각 제어변수가 대응하는 대부분의 위치에서 진동토크의 크기가 작음을 알 수 있다. 또한 진동토크가 평균토크에 미치는 영향도는 그림9를 보면 K=1인 후자의 경우가 K가 제어변수인 전자의 경우보다 그 영향도를 훨씬 더 줄일 수 있음을 알 수 있다.

그러므로 2상인버터를 위상제어와 전압제어로 병용하여 구동하는 방식은 K를 1로 하고 V와 ϕ 를 제어변수로 하는 구동방식(여기서는 혼합제어방식으로 약칭함)이 K와 ϕ 를 제어변수로 하는 구동방식보다 더 유리함을 알 수 있으며, 이에 따라 본 논문에서는 혼합제어방식을 진동토크의 감소책으로 채택하였다.

4.2 혼합제어방식의 2상인버터에의 적용

위상차가 감소할수록 진동토크가 커지는 위상 제어방식의 특성을 보완하기 위한 혼합 제어방식을 2상인버터로 구동하는 2상유도전동기에 적용하는 방법을 다음과 같이 제시한다.

- i) A상, B상에는 고조파 전압이 제거되고 모양

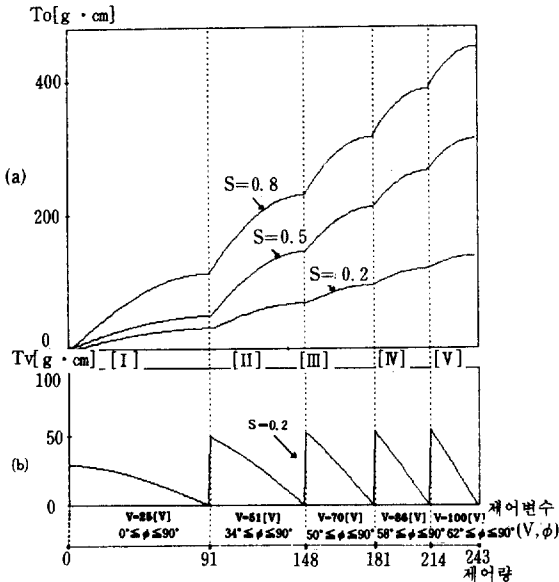


그림 12. 혼합제어방식의 수행시 제어량에 대한 평균토크(a)와 진동토크(b)의 특성
 Fig. 12. Average torque (a) and pulsating torque (b) as input in compound method.

이 같은 PWM전압파형을 인가한다.
 ii) 혼합제어방식의 수행구간을 n구간으로 나눈다.
 iii) 각 구간 사이의 토크의 제어는 전압제어에 의해 수행하며 각 구간에서의 입력전압은 고정시킨다. 이 때 각 구간의 입력전압에 해당하는 PWM전압파형은 한 주기의 점호각을 계산하여 ROM내에 저장한다.
 iv) 각 구간에서의 토크의 제어는 위상제어에 의해 수행한다. 이 때 위상차의 수행범위는 최대각 90° 에서 최소각 θ° 까지로 한다.

그림12. a)은 $V/f=10/6, K=1, S=0.2, 0.5$ 및 0.8 로 하고 위와 같은 방법에 의해 혼합제어방식을 수행하였을 때 제어량에 대한 평균토크의 특성을 식(29)에 의해 간단한 예로써 보여주고 있다. 이 때 수행구간은 5구간으로 나누었으며 각 수행구간의 입력전압 및 위상차의 수행범위는 그림과 같다. 이 그림에서 제어량은 각 구간의 수행위상차를 합한 값이며 제어량이 마이크로프로세서에 입력이 되면 이에 대응하는 입력전압 및 위상차가 자동적으로 결정되며 2상인버터에 입력이 되어 2상유도전동기를 구동한다. 이 그림에서 보듯이 각 구간의 입력전압과 수행 위상차를 적절히 함에 따라 제어량에 대한 평균토크의 특성을 선형에 가깝게 만들

수 있어서 위상제어방식의 단점의 하나로 지적되는 비선형성을 제거할 수 있다. S가 0.2일 때의 진동토크는 식(38)에 의해 그림12. b)와 같은 특성을 가지며 이를 그림 7 과 비교해 보면 진동토크가 현저하게 감소했음을 알 수 있다. 예로써 보인 그림12보다 구간을 더욱 세분하게 되면 위상제어방식의 수행시에 나타나는 진동토크를 대부분 제거할 수 있을뿐 아니라 제어량에 대한 평균토크의 특성을 선형적으로 바꿀 수 있으리라고 생각되어진다.

5. 결론

본 논문에서는 2상인버터로 구동되는 2상유도전동기를 위상제어방식으로 운전하는 경우에 발생하는 토크를 두 상의 입력전압의 크기가 다르고 위상차가 ϕ 인 기본파 전압이 A상, B상에 인가되는 원리모델에 의해 Okada씨의 수식 전개 방식을 이용하여 해석하였고, 더불어 발생토크를 실용상의 관점에서 검토하기 위해 등가회로 정수로 표시된 평균토크와 진동토크로 구분하여 계산식을 유도하였다.

다음으로, 일례로써 평형권선을 가진 서어보용 2상유도전동기를 대상으로하여 유도된 계산식에 의해 계산식의 변수인 두 상의 입력전압의 비 K와 위상차 ϕ , 또는 속도에 대한 평균토크 및 진동토크의 특성과 진동토크가 평균토크에 미치는 영향을 검토하였다. 여기서 위상차에 대한 평균토크가 이미 밝혀진 바와 같이 sine곡선에 가까운 특성인데 반해, $K=1$ 일 때의 진동토크는 cosine 곡선에 가까운 대칭적인 특성을 볼 수 있었다.

끝으로, 위상제어방식에서 두 상간의 전압 위상차를 작게 할 때 발생하는 진동토크를 감소시키기 위해 위상제어와 전압제어를 병용하는 구동방식, 즉 혼합제어방식을 2상인버터의 새로운 구동방식으로 제시하였으며, 아울러 이 구동방식을 취함으로써 위상제어방식으로 구동할 때 나타나는 비선형성을 제거할 수 있는 가능성을 보였다. 이 구동방식에 관한 자세한 서술과 실험은 다음의 기회에 발표하기로 한다.

참고 문헌

1) T. A Lipo, P.C. Krause and H.E. Jordan, "Harmonic torque and speed pulsations in a rectifier-inverter induction motor drive", IEEE Trans. PAS-88, No. 5, pp. 579~586, 1969

- 2) S.D.T. Robertson and K.M. Hebbar, "Torque pulsations in induction motors with inverter drives", IEEE Trans. IGA-7, No. 2, pp. 318~323, 1971
- 3) K.Y.G.Li, "Analysis and operation of an inverter-fed variable-speed induction motor", IEE Proc. Vol. 116, No. 9, pp 1571~1578, 1969
- 4) L.M.C. Mhango and G.K. Creighton, "Novel two-phase inverter-fed induction motor drive", IEE Proc. Vol. 131-B, No. 3, pp. 99~104, 1984
- 5) G. Rojat, J.L. Mertz and A. Foggia, "Theoretical and experimental analysis of a two-phase inverter-fed induction motor", IEEE Trans. IA-15, No. 6, pp. 601~606, 1979
- 6) Y. Okada and S. Shinomiya, "Analysis of the Generating Torque Characteristics of 2-phase induction motor driven with 2-phase square wave inverter and its investigation", JIEE B31, pp. 49~56, 1978
- 7) Y. Okada and S. Shinomiya, "The generating torque characteristics of 2-phase servomotor driven with voltage type inverter", JIEE B1, pp. 188~194, 1984
- 8) N. Matsui and H. Andoh, "Step drive of two phase servomotor and its analysis", JIEE B4, pp. 25~32, 1975
- 9) K. Koga, "Instantaneous torque of two-phase induction motor operating on general periodic current", JIEE B89, pp. 771~778, 1985
- 10) H. Kuroku, "An analysis of vibrating torque characteristics of 2-phase servomotor", JIEE B1, pp. 94~100, 1978
- 11) S. Sinomiya, Y. Okada and S. Sato, "Analysis of alternating torque of 2-phase servomotor with m-th harmonic component in control windings current", ミステムと制御, Vol. 19, No. 3, pp. 114~151, 1975
- 12) S. Imao and Y. Murakami, "The positional control system with 2-phase servomotor controlled by series thyristor inverters", JIEE B1, pp. 197~204, 1981
- 13) C.A. Karybakas, "Generalized Torque Performance of Two-phase Induction Motors Controlled by Triac-An Approximate Analysis", IEEE Trans. IECI-28, No. 1, pp. 40~45, 1981
- 14) 원중수, 장도현, "인버터구동 2상서어보전동기의 마이크로프로세서에 의한 위상제어", 대한전기학회지, Vol. 36, No. 2, pp. 80~87, 1987
- 15) 박민호, "유도기기", 동명사, pp. 326~328, pp. 540~559
- 16) 西村, "自動制御用電氣機器 I", 朝倉書店, pp. 228~252, 1964