

그림 2. PWM 인버터

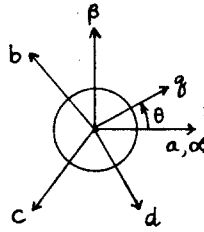


그림 3. 기저력축

$$\begin{aligned} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + w \cos \theta &= v_{an} \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + w \cos(\theta - 120^\circ) &= v_{bn} \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + w \cos(\theta - 240^\circ) &= v_{cn} \quad (1) \end{aligned}$$

단 L : 정규화 부실 인덕턴스 [e]

R : 정규화 저항

$i_{a,b,c}$: 정규화 전류

$v_{an,bn,cn}$: 정규화 전압

w : 정규화 회전속도

이다. 그런데 중성점 연결이 따로 없으므로

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2)$$

이 성립하고 따라서

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad (3)$$

이 되며 θ 와 w 는

$$\frac{d\theta}{dt} = p\Omega_n \quad (4)$$

p : 극쌍의 수

Ω_n : 정격 회전 각속도 [rad/e]

의 관계가 있다.

영상분을 가정하여 전압 전류에 대한 다음과 같은 α - β 축으로의 변환을 생각하면

$$f_{\alpha,\beta,0} = C f_{a,b,c} \quad C = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$f_{\alpha,\beta,0}$: α - β 축 전압, 전류

$f_{a,b,c}$: a,b,c 축 전압, 전류

역변환 행렬 C^{-1} 는

$$C^{-1} = \frac{3}{2} C^T \quad (6)$$

이며 (2)식과 (3)식에서 f_0 는 0 이다. (1)식에서

(5)식의 변환을 적용하면

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + w \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{pn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

이 된다. 다시 d-q 축으로 변환을 생각하면 그림3으로부터

$$f_{d,q} = A f_{\alpha,\beta} \quad A = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

을 얻을 수 있다.

(5)식과 (8)식의 변환을 적용하고 에너지 보존법칙을 이용하면 기계적 마찰이 없다고 할 때 다음 관계식이 얻어진다.

$$\frac{3}{2} (i_\beta - i_L) = J \frac{dw}{dt} \quad (9)$$

i_L : 원주변환 정규화 부하 토크전류

J : 정규화 inertia [e]

직축 기준전류를 없도록 하면 α - β 축 기준전류는

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} i_\beta^* \quad (10)$$

이 되며 i_β^* 의 변화가 i_α , i_β 의 변화에 비하여 훨씬 느리다고 가정하면 (7),(10)식으로부터

$$\begin{aligned} L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha - i_\alpha^* \\ i_\beta - i_\beta^* \end{bmatrix} + p\Omega_n L i_\beta^* w \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \\ + R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + w \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{pn} \end{bmatrix} \quad (11) \end{aligned}$$

결국 전류제어 PWM 문제는 (11)식에서 $\begin{bmatrix} i_\alpha - i_\alpha^* \\ i_\beta - i_\beta^* \end{bmatrix}$ 가 0이 되도록 $\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{pn} \end{bmatrix}$ 을 정하여 주는 것이다.

3. PWM 방법

그림2에서 각상에 연결된 스위칭 소자 2개중 언제나 1개만 on이면 가능한 스위칭 상태수는 8개인데 이중 모두 위에 붙은 경우와 모두 아래에 붙은 경우는 공급전압은 같으므로 구분되는 스위칭 상태는 7개이다. 각각의 경우 (11)식의 $\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{pn} \end{bmatrix}$ 은 그림4로 계산된다. (11)식에서 $p\Omega_n L \ll 1$, $R \ll 1$ 이면

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha - i_\alpha^* \\ i_\beta - i_\beta^* \end{bmatrix} + w \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{pn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

이것을 벡터로 나타내면

$$L \frac{d}{dt} (\mathbf{i} - \mathbf{i}^*) + \mathbf{w} = \mathbf{v} \quad (13)$$

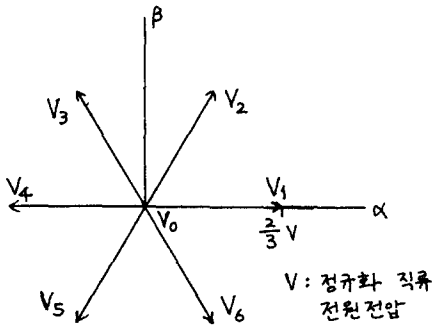


그림 4. 공급전압 벡터

(18)식에서 회전자의 위치와 속도로부터 ω 를 쉽게 알 수 있으므로 $i^* - i$ 의 방향에 따라 u 를 정하여 줄 수 있다. 종래의 PWM 방법은 ω 를 고려하지 않고 $i^* - i$ 만을 생각한 것인데 $|i^* - i|$ 의 값이 일정범위 이내일 때는 ω 를 고려하여 $u - \omega$ 의 크기를 작게 함으로써 전류왜곡을 줄일 수 있다. 이렇게 정한 스위칭 논리가 그림 5이다.

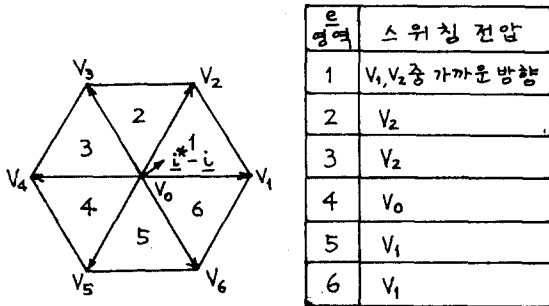


그림 5. 스위칭 논리

그림 5에서 ω 가 4영역에 있을 때는 V_0 를 택함으로써 V_1 또는 V_2 를 택하는 것보다 $|u - \omega|$ 가 작아짐을 알 수 있다.

4. SIMULATION 결과

전동기 상수들을 적당한 값으로 가정하고 전류왜곡률을 10%가 되도록 스위칭 한다고 할 때 정상상태의 경우 simulation한 결과가 그림 6 - 8이다. 속도가 낮을수록 V_0 를 선택하면 $|u - \omega|$ 가 작아지므로 스위칭 주파수를 낮추는 효과가 큰 것을 볼 수 있다. 전동기 상수들이 달라지면 결과가 달라지겠지만 정상적으로는 같은 효과를 기대할 수 있을 것이다.

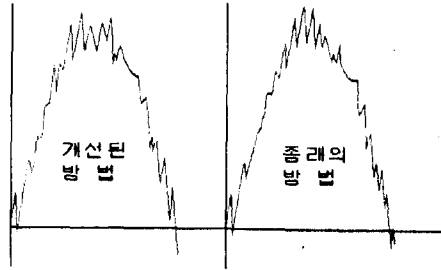


그림 6. 전류파형 비교 ($m = 1$)

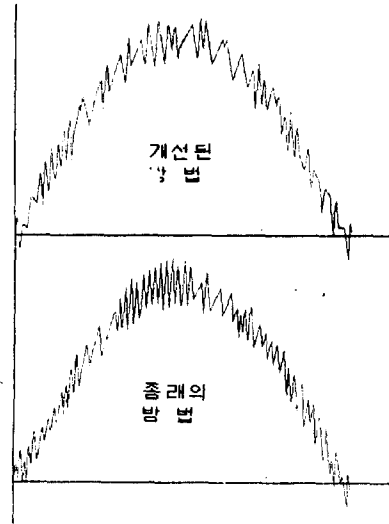


그림 7. 전류파형 비교 ($m = 0.5$)

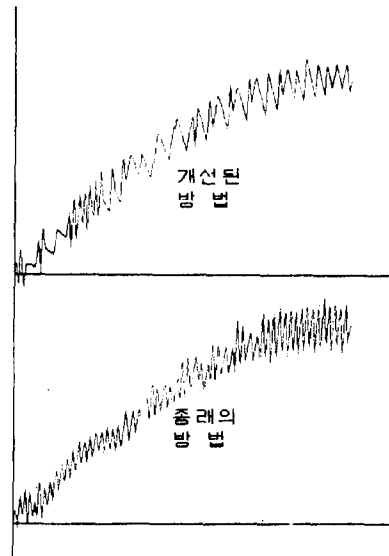


그림 8. 전류파형 비교 ($m = 0.25$)

5. 결론

브러시리스전동기의 PWM 구동을 위하여 회전자 위치에 따른 역기전력까지 고려함으로써 정상상태에서 스위칭 주파수를 낮출 수 있는 PWM 방법을 제시하고 simulation으로 효과를 확인하였다. 알고리즘이 복잡하지 않기 때문에 저속용에는 컴퓨터 software로 고속의 경우도 간단한 논리회로로 실현 가능할 것이다.

참고문헌

- [1] Pfaff, G., Weschta, A., and Wick, A.F., "Design and experimental results of a brushless AC servo drive", IEEE Trans., IA-20(4), 814-821 1984.