

*정재원
김종준
신휘범
윤명중

한국과학기술원
전기및전자공학과

I. 서론

현재 산업계의 많은 분야에서 원동기로서 전동기를 사용하고 있다. 그런데 속도제어를 하는 분야에서는 주로 직류전동기를 사용하고 있으나 가격, 정비유지 및 잡음현상 등으로 인하여 점차 유도전동기로 대체되어 가고 있다.

그래서 유도전동기의 속도/위치제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 특히 PWM 인버터에 의한 유도전동기 제어가 널리 연구되고 있다. 이러한 PWM기법에 의하여 주파수 및 전압제어를 하면서 인버터의 고조파 성분을 감소시킬 수 있다. [1,2]

일반적으로 한 주기당 펄스 수를 증가시키는 데 따라 좀 더 정현파에 가까운 출력전압을 얻을 수 있으며 전동기의 속도가 낮을수록 더 많은 펄스수를 가하게 된다. [3]

그러나 한 주기당 펄스 수가 증가할 수록 고조파 손실은 감소하나 인버터의 스위칭 손실은 증가하게 된다. 따라서 유도전동기/인버터로 이루어진 시스템의 효율은 유도전동기의 효율과 인버터 효율의 곱으로 나타나므로 두가지 효율이 적당히 타협하는 점에서 최대 효율이 된다.

본 연구에서는 인버터의 펄스 수에 따른 유도전동기의 손실과 인버터의 손실을 시뮬레이션을 통하여 구하고, 전체 시스템의 효율을 최대토 하는 펄스 수를 구하였다.

II. 가변속 유도전동기/PWM 인버터 시스템

1. 유도전동기

유도전동기 해석을 위해 고정자에 기준을 둔 기준축을 사용하여 각 고조파에 대한 전압방정식을 쓰면 다음과 같다. [4]

$$\begin{bmatrix} V_{qs}(n) \\ V_{ds}(n) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pM & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pM \\ pM & -\omega_r M & R_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & pM & \omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}(n) \\ i_{ds}(n) \\ i_{qr}(n) \\ i_{dr}(n) \end{bmatrix}$$

여기에서 R_s = 고정자 저항

R_r = 회전자 저항

L_s = 고정자 인덕턴스

L_r = 회전자 인덕턴스

M = 자화 인덕턴스

n = 고조파 차수

p = $j\omega$ 수

ω_r = 회전자 주파수

ω_s = 고정자 주파수

이것은 $V(n) = Z(jn\omega_s)I(n)$ 형태이고 $I(n) = Z^{-1}(jn\omega_s)V(n)$ 으로 구할 수 있다. 여기에서 V 는 SPWM(Sinewave PWM)인버터의 3상 출력 전압을 D-0 축으로 변환시켜 사용하고 있으며 이식을 사용하여 구한 전류로 유도전동기의 기본파 및 고조파 동손을 구하였다. 그외 철손과 풍손 및 마찰손은 고려하지 않았다.

2. PWM 인버터

다음 그림.1과 같은 인버터/유도전동기 시스템에 대하여 생각한다. 전압원 인버터는 트랜지스터가 스위칭됨에 따라 V_{dc} 와 그라운드를 교대로 전동기 단자에 인가하게 된다. 상전압(Phase voltage) V_{AN} 은

$$\begin{aligned} V_{AN} &= 1/3(2V_A - V_B - V_C) \\ &= 1/3 \sum_{k=1}^{\infty} V_k(n) [2\cos - \cos 2n\pi/3 - \cos 4n\pi/3] \\ & \quad n = 1, 2, \dots, \infty \end{aligned}$$

으로 표시되며 이것은 기본파와 고조파를 포함하는 식이 된다. [5] 즉, V_A 의 푸리에 급수를 안다면 상전압의 푸리에 급수를 알게된다. V_A 의 푸리에 급수는 스위칭 시간에 따라 결정되며 여기에서는 스위칭 시간을 삼각파와 기준파의 교점에 의하여 결정하고 있다. 즉,

$$\begin{aligned} A \cdot \sin 2\pi n t / T &= (-1)^M \sin(2\pi n(t/T - M/4N)) \\ A(\text{모듈레이션 인덱스}) &= \text{기준파 크기} / \text{삼각파 크기} \end{aligned}$$

N (초핑비)=삼각파 주파수/기준파 주파수
 $M = 1, 2, \dots, N-1$

의 해로서 주어진다. SPWM에 의하면 인버터 출력 전압의 기본파 및 위상은 기준파와 일치되며, $0 < A < 1$ 구간에서 기본파의 크기는 A 와 선형인 관계가 있다.[2] 초핑비(Chopping ratio)는 서브하모닉을 억제하기 위해서 정수값을 사용한다. 즉, 삼각파와 기준파가 동기되어야 한다.[5,6]

트랜지스터 인버터의 손실은 전도 손실과 스위칭 손실로 나눌 수 있으며, 순간 전도손실 W_c 는 $W_c = i(t)R_f + i(t)V_f$, 스위칭 손실 W_s 는 $W_s = (1/2)E_i(t)t_{sw}$ 로 표시된다.[7] 그리고, 유도전동기의 구동 방식은 10(Hz) 이하에서 전압보상을 갖는 일정전압/주파수 방식을 사용하여 각 고정자 주파수에서의 모듈레이션 인덱스를 구하였다.

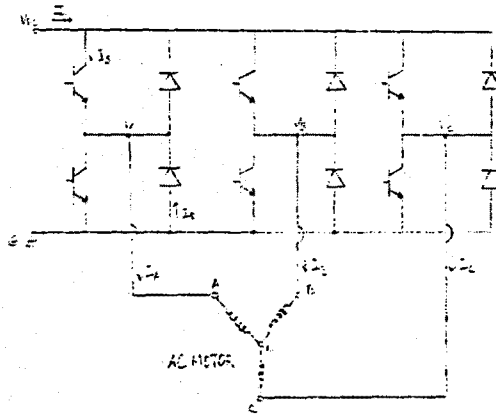


그림 1. 3상 전압원 인버터-유도전동기시스템.

과 성분이 두드러지는데, N 을 3의 배수로 선택 하였을 경우에 두드러진 고조파 성분 역시 3의 배수가 되고 유도전동기는 Y-결선되어 3차의 배수에 해당하는 고조파가 모두 제거되기 때문이다. 그런데 N 이 3의 배수가 아닌 경우에도 N 차의 고조파가 역시 두드러지게 나타나는데 이것은 3의 배수가 아니므로 Y-결선에 의한 효과를 얻을 수 없으므로 유도전동기의 상전압에 그대로 나타나게 된다. 이러한 효과는 고정자 주파수가 30Hz이고 $N=30$ 인 경우와 $N=31$ 인 경우의 유도전동기의 고정자 전류를 그림.6,7에 나타내었다.

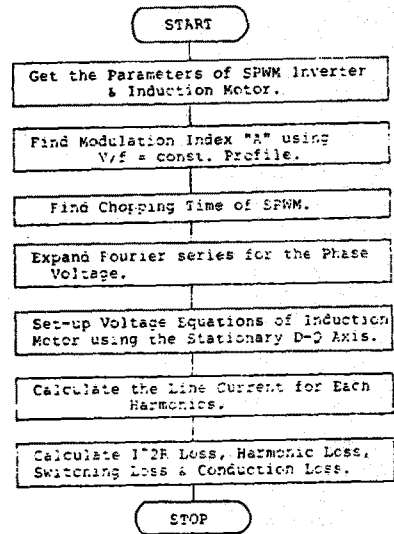


그림 2. 시뮬레이션 흐름도.

III. 시뮬레이션 및 검토

시뮬레이션의 흐름도는 그림.2와 같으며 VAX-11/780 을 사용하였다. 시뮬레이션 대상으로서 3 상 1/4[HP], 208[V], 1670[rpm], $R_s=0.0410$, $R_r=0.0405$, $X_s=X_r=0.0524$, $X_m=0.7445$ [pu] 인 농형 유도전동기와 $t_{on}=t_{off}=3.5\mu\text{sec}$, 트랜지스터의 순방향 전압강하 $V_{f1}=2.0$ [V], 다이오드의 순방향 전압강하 $V_{f2}=1.2$ [V] 인 트랜지스터 모듈을 사용하였다.

시뮬레이션 결과, 고정자 주파수가 60Hz, 30Hz, 10Hz 일때의 고조파 등은, 인버터의 스위칭 손실 및 전도 손실이 N 값에 따라 변화하는 것을 그림.3,4,5에 보여주고 있다. 전반적으로 고조파 손실은 N 이 증가함에 따라 감소하고 스위칭 손실은 N 이 증가함에 따라 증가하고 전도 손실은 거의 일정하였다. 특히 고조파 손실은 N 이 3의 배수 일때와 아닐때의 차이가 매우 심하였다. 이것은 초핑비 N 에 따라 N 차의 고조

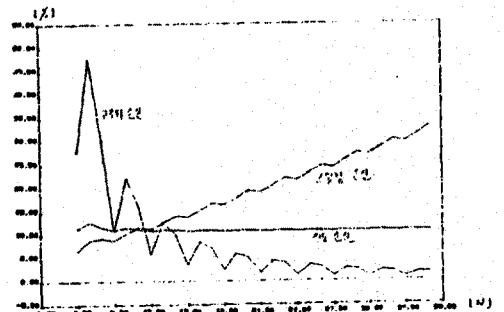


그림 3. $f_s = 60$ Hz 일 때의 손실.
 ($A = 0.95$)

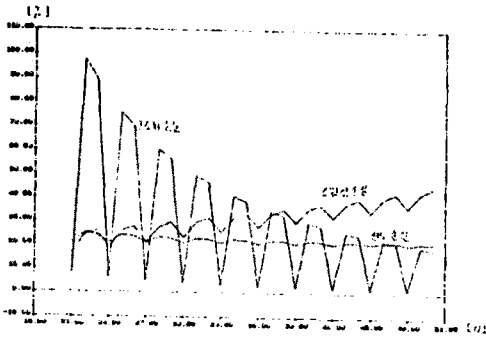


그림 4. $f_s = 30$ Hz 일 때의 손실.
($A = 0.5$)

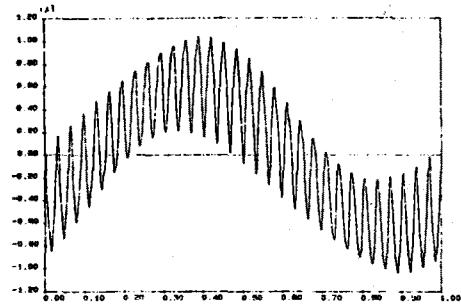


그림 7. $N = 31$ 일 때의 고정자 전류.

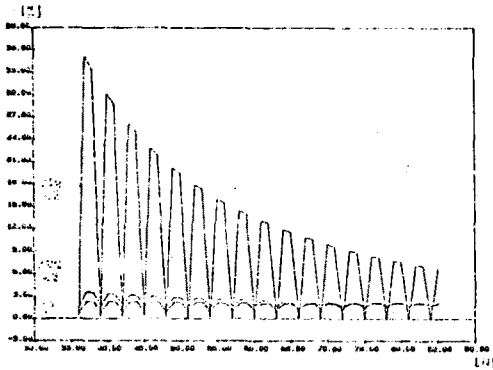


그림 5. $f_s = 10$ Hz 일 때의 손실.
($A = 0.2$)

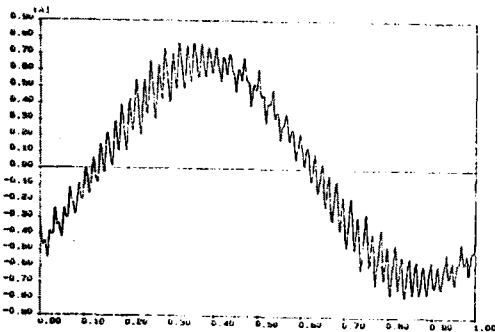


그림 6. $N = 30$ 일 때의 고정자 전류.

그리고 시스템의 최대효율은 고정자 주파수가 60Hz 일때 $N=18$, 30Hz 일때 $N=30$, 10Hz 일때 $N=57$ 일때이며 그때의 효율은 각각 82.49%, 75.83% 및 43.70%로 나타났다. 그런데 최대효율을 이루는 점 부근에서 N 에 대한 효율의 감도가 낮아서 60Hz의 경우 $N=12$ 에서 $N=33$ 사이의 값중에서 3의 배수에 해당 되는 값을 선택했을때 82% 이상의 효율을 얻을 수 있었다. 이 경우 정현파 입력에 대한 효율은 85% 이다.

IV. 결 론

유도전동기와 PWM 인버터로 이루어진 시스템의 효율을 높게하는 초핑비틀 시뮬레이션 을 통하여 구하였다. Y-결선된 유도전동기의 경우 초핑비틀 3의 배수중에서 선택함으로써 특히 높은 효율을 얻을 수 있으며 트랜지스터 인버터의 손실을 유도전동기의 손실과 함께 고려하여 전속도 범위에서 높은 효율을 얻을 수 있는 초핑비틀 선정할 수 있는 기준을 제공하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] G.S.Buja & G.B.Indri, "Optimal pulsewidth modulation for feeding AC motors", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-13, pp. 38-44, Jan./Feb. 1977.
- [2] J.Zubek et al., "Pulsewidth modulated inverter motor drives with improved modulation", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-11, pp.695-703, Nov./Dec. 1975.
- [3] R.D.Adams and R.S.Fox, "Several modulation techniques for a pulsewidth modulated inverter", IEEE Trans. Ind. Appl.,vol.IA-8, pp. 636-643, Sep./Oct. 1972.
- [4] 윤명중, "산학협동 단기강좌 전력전자와 전동기구동", KAIST, 1983.
- [5] G.B.Kliman and A.B.Plunkett, "Development of a modulation strategy for a PWM inverter drive". IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-15, pp.72-79, Jan./Feb. 1979.
- [6] R.M.Green and J.T.Boys, "PWM sequence selection and optimization: a novel approach", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.IA-18, pp. 146-151, Mar./Apr. 1982
- [7] S.Williamson and R.G.Cann, "A comparison of PWM switching strategies on the basis of drive system efficiency," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. IA-20, pp. 1460-1472, Nov./Dec. 1984.