

에어컨 인버터의 3 차원 Vector 제어

Three Dimensional Vector Control of Airconditioner Inverter

° 장재석*, 이장명**

*LG 전자 (Tel:+82-551-69-3486,Fax:+82-551-66-9115,E-mail:jangjs@lge.co.kr)

**부산대학교 전자공학과(Tel:+82-51-510-2378,Fax:+82-51-515-5190,E-mail:jmlee@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

Abstracts In this paper, we investigate the control methodology of inverter Airconditioner, using the three dimensional vector scheme. The method of three dimensional vector aims at the determination of optimal switching patterns for PWM to reduce switching loss and to improve the performance supplied voltage. The induction motors are widely used for home Airconditioners. These motors can be classified into two types: on or off control of Airconditioner and the speed control of motor. For speed control of motors, generally PWM methods are used. The PWM method based upon the modulation of triangular wave can not afford to supply line voltage to the motor sufficiently because of the capacity of processing speed of micro processors. Therefore airconditioner can not be operated efficiently. This problem can be solved with the method of three dimensional vector since it can increase the supplied voltage and maximum operating frequency of motor to 173V and 96Hz, respectively. As The result, this method shows 10 - 15% increase of voltage and 10% increase of operating frequency over the modulation of triangular wave. According to a theoretical study, the number of switching in the method of three dimensional vector is smaller than that of the modulation of triangular wave. The power consumption can be reduced and the supplied voltage can be increased. In other words, the efficiency of Airconditioner can be improved. We show that the method of three dimensional vector can supply higher voltage than the modulation of triangular method through the experiments and verify the degree of improvement of efficiency theoretically.

Keywords inverter, vector,

1. 서론

현재 가정용 Aircon에서 Compressor에 사용되어지고 있는 모터는 대부분이 유도전동기이며, 단순히 Compressor를 On/Off시키는 Type과 모터의 속도를 제어하는 Type의 2가지가 있으며, 최근에는 BLDC 전동기를 탑재한 Compressor도 사용되어지고 있으나, 적용 초기 단계이기 때문에 미미한 상태이고, 대부분 유도전동기를 사용하고 있다.

또한 유도전동기에서의 Inverter PWM 제어 알고리즘으로는 신호파를 Sine파로 하고, 삼각파 변조 방식을 사용하는 것이 일반적이고, 대부분 사용되어지고 있으나, 이러한 Sine파의 삼각파 변조 방법에 있어서는 제어 프로세스의 연산 처리능력 및 속도 문제 때문에 모터에 인가시킬 수 있는 전압이 100% 변조시 $E_{dc}/2\sqrt{2}$ [Vrms] (3상 Inverter인 경우)이고,

선간 전압에서는 $\sqrt{3} \times E_{dc}/2\sqrt{2} = 0.612E_{dc}$ [Vrms]이기 때문에 효율적으로 에어컨을 운전시킬 수 없으며, 또한 전력 소비도 그만큼 크게 된다.

본 논문에서는 Sine파의 삼각파 변조 방식 보다 10~15% 정도의 전압을 더 이용할 수 있는 알고리즘 방법중의 하나인 3차원 Vector 제어 (자속 원근사법)를 이용하여 에어컨 Compressor에 적용하고, 비교 실험 결과를 보였다.

120°의 위상차를 갖기 때문에 각 트랜지스터의 스위칭 타이밍은 각相마다 다르다.

신호파의 수식은 (1)식과 같다.^[8]

$$e_0 = a \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (1)$$

그림 2는 3상 정현파 신호 U,V,W를 삼각파 변조한 경우에 얻어진 PWM 파형 Ux,Vy,Wz와 Power TR의 Base PWM출력 파형 Bu,Bv,Bw,Bx,By,Bz를 Dead Time을 고려하지 않고 나타내었다.

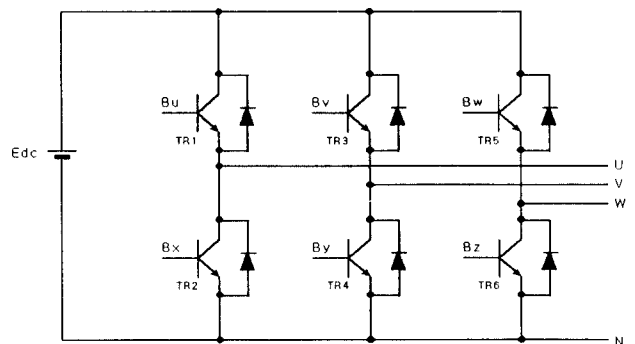


그림 1 3상 인버터 회로도

2. 본론

2.1 신호파가 Sine 정현파인 삼각파 변조 방식

3상 교류 전압은 그림 2에 나타난 U,V,W의 상에서처럼

단상 Inverter의 경우 기본파 성분의 실효값은 100% 변조시에 $E_{dc}/2\sqrt{2}$ [Vrms]로 되지만, 3상 Inverter의 경우 우선 그림 1의 N점에서 본 각상의 성분이 100% 변조시에 $E_{dc}/2\sqrt{2}$ [Vrms]로 되기 때문에 선간 전압에서는

$$\sqrt{3} \times E_{dc} / 2\sqrt{2} = 0.612 E_{dc} \text{ [Vrms]} \quad (2)$$

로 된다. ^{[21],[8]}

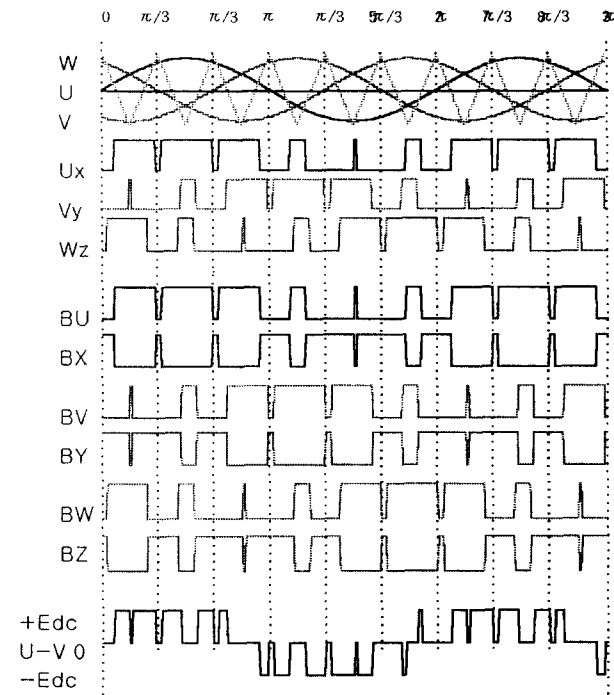


그림 2 신호파가 정현파인 삼각파 변조 방식

이것을 실제의 PWM 파형으로 나타낸 것이 그림 2의 선간 전압 U-V 이다. 그림 2의 $0 < \theta < 2\pi$ 의 전 영역에서 Switching이 이루어지고 있음을 볼 수 있다. U-V의 선간 전압은 신호파의 $\sin(\omega_0 t)$ 의 전압 크기(Amplitude)에 따라 Pulse 폭 변조(PWM)가 이루어짐을 볼 수 있다.

실제 에어컨에 적용한 경우의 Compressor에 흐르는 상 전류의 파형을 그림 3에 나타내었다.

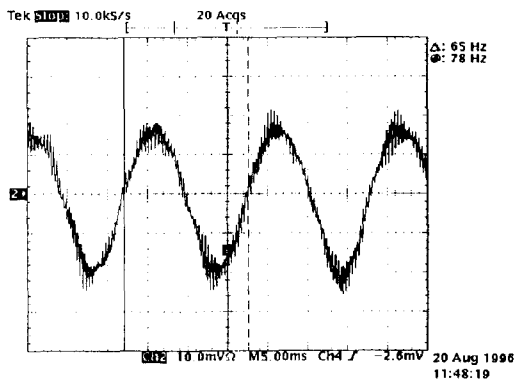


그림 3 정현파 삼각파 변조 방식의 상전류 곡선

2.2 3차원 Vector 법(자속 원근사법)의 삼각파 변조

전압 이용율을 높이고, 또한 Switching 손실을 줄이기 위해 신호파 e_0 를 정현파에 근사시키는 것이 아니라 자속 벡터의 궤적을 원에 근사 시키도록 스위칭 패턴을 선택하는 PWM 방법으로 복소평면에서 나타내는 출력전압식은 다음과 같이 된다. ^[7]

$$V_0(t) = \frac{2}{3} \cdot (V_{oa} + V_{ob} \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} + V_{oc} \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi}) \quad (3)$$

그림 1에서 U,V,W 전압이 평형 3상 전압이라 가정하면, 3상 전압을 발생시키는 전압 벡터는 DC 양으로 나타난다. 이때 전압 벡터는 선간 전압이 0인 제로 점(v_0, v_7)과 전압을 발생시키는 이웃하는 두 벡터로 이루어진 6개의 삼각형으로 이루어진 그림 4와 같은 정육각형을 회전한다.

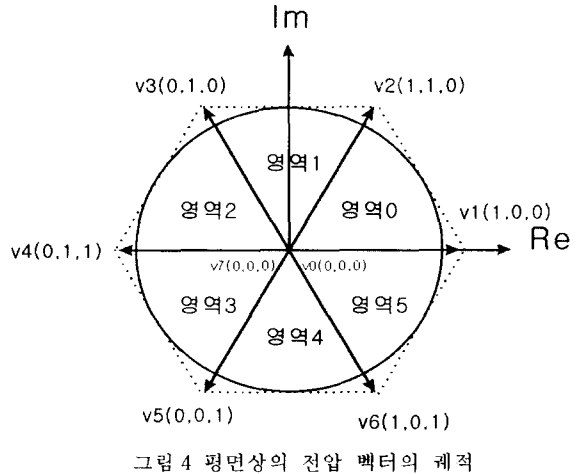


그림 4 평면상의 전압 벡터의 제적

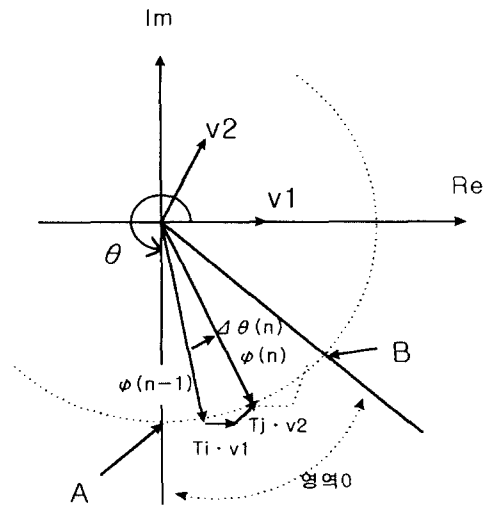


그림 5 동일 평면의 전압 벡터와 자속 벡터

합성 전압 벡터로 생각하면 그림 5에서처럼 전압 벡터 V_1 과 V_2 의 각각을 인가 시간 T_i 와 T_j 에 대해서 시간 적분하고, 합성한 벡터가 자속 벡터의 변화량이므로 자속 벡터 궤적을 원근사하는 것은 합성전압벡터의 궤적을 원근사하면 된다. 각각의 벡터 별 합성 전압 벡터의 체적 시간은 다음과 같다. ^{[4],[7]}

$$T_1 = m T_s \sin(\pi/3 - \theta), \quad (4)$$

$$T_2 = m T_s \sin \theta,$$

T_s : 스위칭주기, θ : 변조각, m : 변조율

여기서 변조율 식은 다음과 같다.

$$m = \frac{|V_0(t)|}{E/\sqrt{3}} \quad (5)$$

또한, v_0 를 유지하는 시간 T_0 는 다음식으로 나타난다.

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (6)$$

자속 원근사를 원이라 가정하고, 각 섹터별 합성 전압 벡터 식을 시간의 영역으로 변환하여 표현하면 다음과 같은 신호파의 수식으로 나타낼 수 있다.^{[5],[6]}

영역 0, $0 \leq \omega_0 t \leq \pi/3$ 에서

$$\begin{aligned} e_u &= \sin(\omega_0 t + \varphi) \\ e_v &= 0 \\ e_w &= \sin(\omega_0 t + \pi/3 + \varphi) \end{aligned} \quad (7)$$

영역 1, $\pi/3 \leq \omega_0 t \leq 2\pi/3$ 에서

$$\begin{aligned} e_u &= 1 \\ e_v &= 1 - \sin(\omega_0 t + \varphi) \\ e_w &= 1 - \sin(\omega_0 t - \pi/3 + \varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

영역 2, $2\pi/3 \leq \omega_0 t \leq \pi$ 에서

$$\begin{aligned} e_u &= \sin(\omega_0 t - \pi/3 + \varphi) \\ e_v &= \sin(\omega_0 t - 2\pi/3 + \varphi) \\ e_w &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

영역 3, $\pi \leq \omega_0 t \leq 4\pi/3$ 에서

$$\begin{aligned} e_u &= 1 - \sin(\omega_0 t - \pi + \varphi) \\ e_v &= 1 \\ e_w &= 1 - \sin(\omega_0 t - 2\pi/3 + \varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

영역 4, $4\pi/3 \leq \omega_0 t \leq 5\pi/3$ 에서

$$\begin{aligned} e_u &= 0 \\ e_v &= \sin(\omega_0 t - \pi + \varphi) \\ e_w &= \sin(\omega_0 t + 2\pi/3 + \varphi) \end{aligned} \quad (11)$$

영역 5, $5\pi/3 \leq \omega_0 t \leq 2\pi$ 에서

$$\begin{aligned} e_u &= 1 - \sin(\omega_0 t - 4\pi/3 + \varphi) \\ e_v &= 1 - \sin(\omega_0 t - 5\pi/3 + \varphi) \\ e_w &= 1 \end{aligned} \quad (12)$$

3상 교류 전압은 그림 6 에 나타난 U,V,W 의 상에서처럼 120° 의 위상차를 갖고, 각 트랜지스터의 스위칭 타이밍은 역시 마찬가지로 각 상마다 다르다. 그림 6 에서 식(7)~(12)의 시간 영역 함수 신호 U,V,W 를 삼각파 변조한 경우에 얻어진 PWM 파형 U_x, V_y, W_z 와 Power TR의 Base PWM 출력 파형 $B_u, B_v, B_w, B_x, B_y, B_z$ 를 Dead Time 을 고려하지 않고 나타내었다. 3상 Inverter 의 경우, 100% 변조 시에 선간 전압에서는

$$\sqrt{2} \times E_{dc} / 2 = 0.707 E_{dc} \text{ [Vrms]} \quad (13)$$

로 된다. 이것은 2.1 에서 신호파가 SINE 정현파인 신호파의 삼각파 변조방법에 비해 15% 정도 높은 전압을 인가할 수 있는 것이 된다. 이것을 실제의 PWM 파형으로 나타낸 것이 그림 6 의 선간 전압 U-V 이다. 그림 6 의 $0 < \theta < 2\pi$ 의 전영역을 6 등분하여 각 구간에서는 U,V,W 상 중에서 어느 1 상은 Switching 을 하지 않고, 나머지 2 개 상 만 Switching 이 이루어지고 있음을 볼 수 있다. U-V 의 선간 전압은 기본파 식(7)~(12)의 전

압 크기(Amplitude)에 따라 Pulse 폭 변조 (PWM) 가 이루어짐을 볼 수 있다.

실제 에어컨에 적용한 경우의 Compressor 에 흐르는 상 전류의 파형을 그림 7 에 나타내었다.

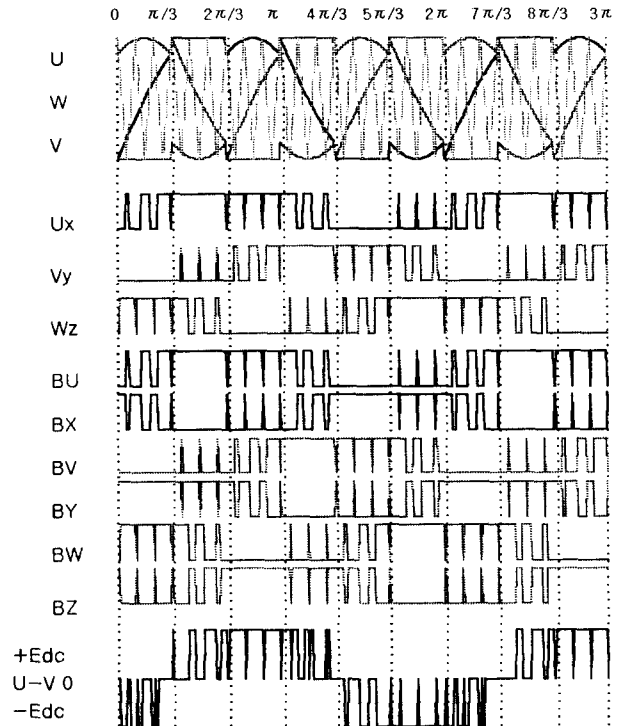


그림 6 자속 원근사법의 삼각파 변조

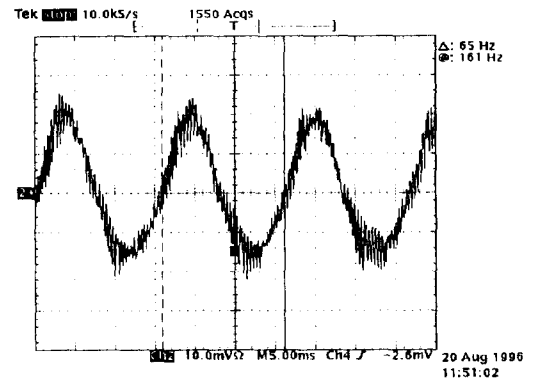


그림 7 자속 원근사법의 상 전류 파형

2.3 f/v 특성 전압 비교

지금까지 살펴본 2.1-2.2 의 각각의 알고리즘에 대한 주파수에 대해 동일한 시스템과 동일 f/v data 를 LOOK UP Table 로 해서 실험한 출력 전압의 결과를 그림 8 에 나타내었다. 그림 8에서 보는 것 처럼 신호파가 Sine 정현파인 삼각파 변조 방법이 계산식과 마찬가지로 3 차원 Vector 법(자속 원근사법)에 비해 같은 주파수에 대해 출력전압이 10%-15% 적게 나옴을 알 수 있다. 따라서 에어컨의 고속 운전 시 2.1의 방법은 출력전압을 그만큼 올려 줄 수 없기 때문에 에어컨의 능력 Up 을 그만큼 기대하기 어렵다.

또한 마찬가지로 조건으로 해서 실험한 에어컨의 소비전력결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9 에서 보는것처럼 3 차원 Vector 법(자속 원근사법)이 같은 주파수에 대해 소비전력이 적게 나옴을 알 수 있다.

F/V 특성 전압 비교

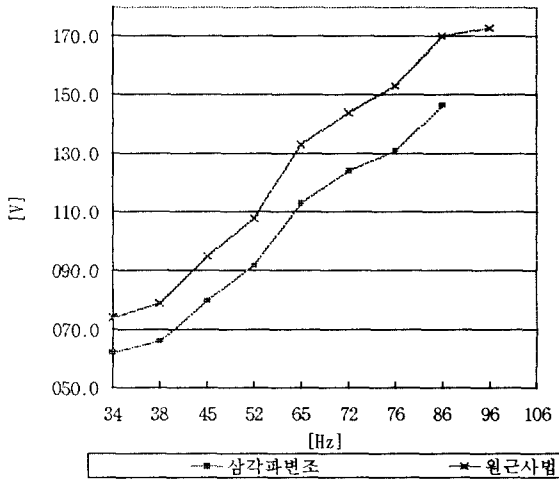


그림 8 F/V 전압 비교

소비전력비교

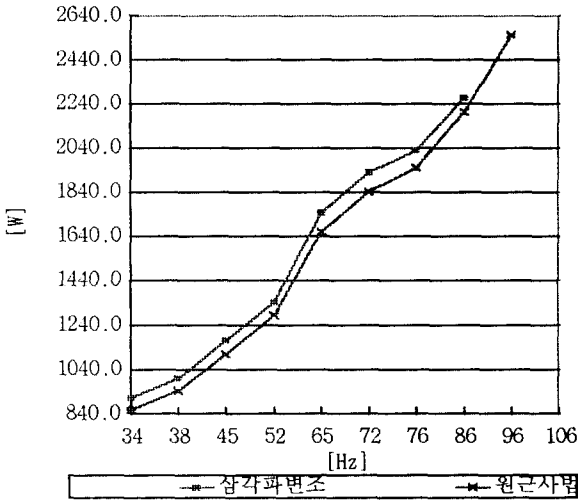


그림 9 소비 전력 비교

EER 비교

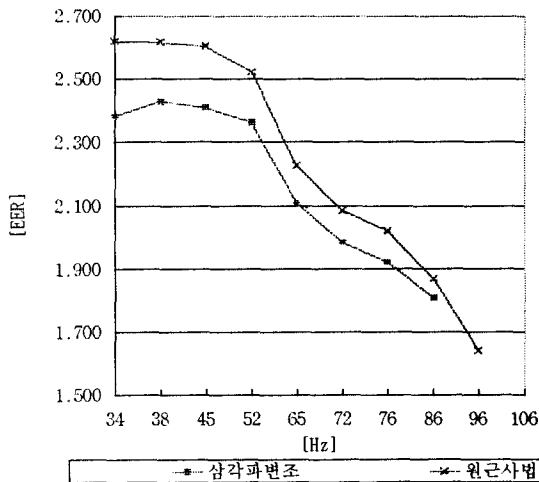


그림 10 EER(Energy Efficiency Ratio) 비교

EER(Energy Efficiency Ratio)의 실험결과도 그림 10 에서 보는 것처럼 3 차원 Vector 법(자속 원근사법)이 같은 주파수에 대해 EER(Energy Efficiency Ratio)이 좋게 나옴을 알수있다.

3. 결론

본 논문에서는 전압사용의 효율을 높이기 위하여 3 차원 Vector 법을(자속 원근사법) 사용한 PWM 제어를 에어컨의 Compressor 제어에 사용 하였다.

3 차원 Vector 법(자속 원근사법)에 의한 신호파가 Sine 정현 파인 삼각파 변조 방식 보다 Switching 횟수를 적게 필요 하므로 Compressor의 Motor 에 인가할 수 있는 전압을 올려줄 수 있었으며, 에어컨의 소비 전력을 줄일 수 있었고, 결과적으로 에너지 효율(EER)도 올려 줄 수 있었다.

3 차원 Vector 법(자속 원근사법)은 기존의 방식에 비하여 모터에 높은 전압을 이용할수 있는 방법임을 확인하였고, 에어컨 인버터의 고속 운전 제어에는 3 차원 Vector 법(자속 원근사법)이 적합함을 실험 결과 확인하였다.

4. 참고문헌

- [1] B.D.Bedford and R.G.Hoft, "Principles of Inverter Circuits", Wiley, New York, pp.121-164, 1964.
- [2] B.K.Bose, "POWER ELECTRONICS AND AC DRIVES", PRENTICE-HALL, Englewood Cliffs, N.J. 07632
- [3] Fujitsu, "Microcontrollers Data Book(P²MC-8L Family)", Fujitsu, Tokyo, 1996.
- [4] K.Ogata, "State Space Analysis of Control Systems", PRENTICE-HALL, Englewood Cliffs, N.J., 1967
- [5] K.Takashi, "Power Electronics for the Microprocessor Age",
- [6] 瀧口 裕廣/大橋 隆登, "인버터制御용 마이공徹底マスター", CQ 出版社, Tokyo.
- [7] 日本工業調査會, "인버터의 實用設計",
- [8] 장승식, "인버터 응용 메뉴얼", 技多利, 서울, 1995.