

Energy Saving을 위한 V/f 추종제어

신우석*, 최재영
금성사 생활시스템 연구소

이돈시, 최규하
건국대학교 전기공학과

V/f Tracking Control for Energy Saving

Woo-Seok Shin*, Jae-Young Choe
GOLDSTAR Living System Lab.

Don-Si Lee, Gyu-Ha Choe
Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University

Abstract - This paper describes a simple but effective V/F control method for energy saving of a special-purpose Induction motor driven by PWM inverter. The proposed method is based on efficiency control with no speed sensor that the V/F patterns could be changed to load variations. The experimental result shows great improvement of both efficiency and power factor and usefulness of the method.

1. 서론

요즘 산업계에서 에너지 저감 및 자동화, 쾌적성에 대한 요구에 따라 가변속 Motor와 인버터의 사용이 가전 및 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 최근의 인버터 개발 경향은 그 기능 보다는 경제성을, 고급제어 기술보다는 신뢰성과 Application을 중요시하고 ASIC(Application specific IC) 기술의 발달과 IPM(Intelligent power module)등의 개발로 인버터가 Module화, 부품화 되고 있는 추세에 있다. 또한 우수한 마이크로프로세서의 이용은 성능향상 뿐만 아니라 신뢰성과 제어의 유연성 측면에서 그 의미가 크게 부여되고 있다. [1]

기존의 범용 인버터는 유도 전동기와 부차시 용량을 선정하는데 어려움이 있고 사용이 불편한 것과 운전 특성의 저하 때문에 최근에는 전용 Motor와 전용 인버터에 대한 관심이 높아지고 있다.

본 논문에서는 에너지 Saving과 가격절감을 위해 속도 센서 없이 부하에 따라 V/F pattern을 효과적으로 제어하기 위해 인버터로 구동시 유도전동기 복성과 Software 기법들 이용하였으며 전체 제어시스템은 TMS370 싱글칩 마이크로프로세서를 이용한 3상 인버터와 750[W] 전용 Motor로 구성하였고 그 실험결과를 나타내었다.

2. 인버터 구동시스템

본 논문에서 사용한 인버터 구동시스템 전체에 대한 계정도도는 그림 1과 같다. 마이크로프로세서가 있는 제어부, 전력회로부, 전용 인버터Motor로 구성되어 있다.

마이크로프로세서는 전동기 구동시 요구되는 빠른 처리속도, A/D 변환기와 Timer가 내장되어 있고, 많은 I/O port와 저렴한 가격을 충족시키는 프로세서의 하나로 TMS370계열을 선정하였다.

전체적인 동작은 조절판넬로 부터 여러 입력신호를 받아들이고 그에 맞는 V/F pattern 기준신호를 A,B,C port를 통해 발생하며 이 3상 기준신호는 삼각파 발생 번조신호와의 비교를 통해서 PWM 파형을 만들어 이것은 다시 gate 구동회로를 지나 전력회로의 각각의 MOSFET를 온,오프하게 된다. 각종 보호회로 신호는 외부 인터럽트를 통해 입력되고 D port를 통해 현재 주파수 상대 및 고장상태를 표시한다. 또한, 이때 인버터 출력단에 부착된 전류센서에서는 현재의 부하상태를 감지하여 A/D 변환기로 보내주면 마이크로프로세서는 부하에 따라 빈한시 복성 및 효율이 좋은 조건에서 운전할 수 있도록 3상 기준신호를 제어한다.

3. 자속 제어

인버터로 유도 전동기를 제어하는 이유는 속도와 토크를 제어하기 위한 것이다. 이러한 요소를 제어하기 위한 가장 보편적인 방법이 전압과 주파수를 제어하는 자속제어이다.

유도전동기에서 토크는

$$T = K_1 * \phi * I_2 * \cos \theta_2$$

(K₁:상수, ϕ :자속, I₂:ROTOR전류, θ_2 :ROTOR 위상각)

낮은 slip조건에서 $\cos \theta_2 \approx 1$ 로 되며

$$T = K_1 * \phi * I_2 \text{ 로 된다. (1)}$$

ROTOR 전류 I₂는 그림 2 동가회로로 부터

$$I_2 = \frac{SE}{\sqrt{[R_2]^2 + (SX_2)^2}} \quad (S: slip, E: 유기기전력)$$

운전중에 $SX_2 \ll R_2$ 이므로

$$I_2 = \frac{SE}{R_2} = \frac{f_2}{f_1} * \frac{E}{R_2} \quad (2)$$

(f₁: 1차 frequency, f₂: 2차 frequency)

Air-gap flux ϕ 는 E/f₁에 비례하므로

$$I_2 = K_2 * \phi * f_2 * \frac{1}{R_2} = K_3 * \phi * f_2 \quad (K_3 = K_2 * \frac{1}{R_2})$$

따라서, $T = K_1 K_3 \omega^2 f_2$

$$= K_3 \left(\frac{E}{f_1} \right)^2 f_2 \quad (3)$$

그러므로 전압과 주파수를 함께 변화시켜 부하에 따라 공급 속도를 제어해야 한다. 이때 과여자가 되면 철손과 자화전류가 증가하고 부족여자가 되면 동일한 부하에서 슬립과 2차 동손이 증가하는 반면 자화전류와 철손은 감소한다. [5] 따라서 효율을 개선시키기 위해 각각의 부하상태에서 이 두 가지 요소를 적절히 조절하여 손실을 최소화시켜야 한다. 인버터로 Motor 구동시 주파수와 부하에 따라 다음 요소를 고려해야 한다.

즉, 인버터에서 제어하는 전압 $V = E + (R_1 + jX_1)I_1$ 에서 $(R_1 + jX_1)I_1$ 의 전압 drop분을 보상에 주어야 한다. 특히, 주파수가 감소함에 따라 리액티브는 감소하지만 저항은 일정하게 유지되고 풍량이 감소하므로 1차 저항에 의한 전압 drop분을 보상해주어야 한다.

또한 1차 전류가 최소가 되도록 조정되어야 한다.

$$I_1 = I_m + I_2 = \frac{E}{jX_m} + \frac{E}{(R_2/S) + jX_2} \quad (4)$$

$$= \left[\frac{E}{f_1} \right] \left[\frac{R_2 + j(2\pi L_{22})f_2}{(2\pi L_m)^2 f_2 - (2\pi L_m)(2\pi L_{22})f_2 + j(2\pi L_m)R_2} \right]$$

자화 인덕턴스 : L_m
회전자 인덕턴스 : $L_{22} = L_2 + L_m$

따라서, 부하에 따라 전압 drop분을 보상하면서 1차 전류가 최소가 되도록 V/F pattern을 제어하여야 한다.

4. V/F pattern 구현

기존의 범용 인버터는 특성 문제에 있어 2가지 한계성이 있다. 첫째, V/F 패턴이 100% 부하시에 맞추어져 있어 부하가 낮은 경우 필요없는 에너지를 낭비하는 것이다. 둘째, 부하에 따라 V/F 패턴을 추종제어 하기 위해서는 외부에 부하의 상태를 알기 위해 속도센서를 부착해야 하는 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 각 부하별로 최적의 V/F 패턴을 시뮬레이션과 실험을 통해 구한 다음 그 데이터를 마이크로프로세서에 그림 3에서의 같이 100% 부하시에는 V/F1, 75% 부하시는 V/F2, 50% 부하시는 V/F3의 최적 패턴으로 기억시킨다. 또한 속도센서 없이 부하의 상태를 기준 신호에 대한 전류의 응답량으로 알기 위해 기준신호에 의해 전동기 입력전압을 낮추는 기법을 이용하였다. 즉, 그림 4와 같이 전동기에 어떤 전류가 흐를때 그것이 실제 부하의 경우 인지 과여자인지를 판단하기 위해 입력전압을 낮추면 과여자인 경우 전류는 감소하고 실제 부하인 경우 그렇지 않은 특성을 이용하여 부하의 상태를 판단할 수 있다. 부하에 따라 V/F를 제어하는 추종용도는 그림 5와 같다.

주파수와 가감속 시간이 결정되면 한 루우프 당 가감속 주파수량이 결정되고 주파수에 따라 인버터 출력 전압량이 V/F 패턴에 의해 결정되고 주파수를 출력하기 위한 Timer 인터럽트양이 결정된다. 처음에는 전동기에 기동력을 주기 위해 V/F1으로 출력하고 1초의 시간지연 후에 부하전류를 읽는다. 이때 부하전류는 CT (Current Transformer)에 의해 감지되고 평활화된 전류가 A/D 변환기를 통해 1/200초 마다 한번씩 샘플링 된다. 그 부하 전류는 사전에 설정된 부하 level Load와 비교하여 부하전류가 작으면 그 아래 부하

level과 비교하고 부하전류가 크면 그 값을 레지스터에 저장하고 10[%] 낮은 기준신호를 출력하고 부하전류가 안정되기를 기다린후에 부하전류와 기준에 저장된 값을 비교한다. 이때 부하전류가 작으면 과여자에 의한 현상으로 마이크로 프로세서가 판단하여 V/F2를 출력하고 그렇지 않은 경우 실제 부하이므로 V/F1을 출력한다. 이러한 과정을 반복함으로써 부하상태를 확인하여 이에 적절한 V/F 패턴을 출력한다.

5. 실험결과

본 논문에서는 전용 인버터 Motor와 전용 인버터로 VVF (Variable Voltage Variable frequency) 시스템을 구현 하였다. 인버터 Motor는 750W, 3상4극 Induction Motor type 이며 $R_1 = 6.91[\Omega]$, $R_2 = 5.75[\Omega]$, $X_1 = 4.9[\Omega]$, $X_2 = 5.77[\Omega]$, $X_m = 185.6[\Omega]$ 이고 인버터 스위칭 주파수는 10[KHz]로 하여 그림 3과 같이 시스템을 구현하였다.

부하에 따라 인버터 출력전압과 주파수를 제어하기 위해 마이크로프로세서 출력 port에서 D/A 변환기를 통해 발생하는 기준신호는 그림 6과 같다. 그림 7은 75, 50[%]의 부하에서 V/F 패턴을 변화시 각각의 주파수에서 부하 전류의 변화를 나타내고 있다. 75, 50[%] 부하시 V/F1에 비해 V/F2, V/F3로 운전시 전류가 줄어들음 알수있고 부하가 낮아질수록 그 효과가 크며 특히 30Hz 이하에서는 1차 전압 drop분 보상과 과여자에 의한 영향 때문에 그 차이가 두드러짐을 알수있다. 그림 8과 그림 9는 30[Hz]로 구동시 각각 과여자인 경우와 실부하인 경우의 부하전류의 응답 특성을 대비한 것으로 V/F 패턴을 제어하는 기준 신호를 10[%] drop시 과여자인 경우는 전류가 감소하고 실부하인 경우 그 반대 현상을 보임을 알수 있다. 따라서 이러한 과정을 반복함으로써 현재 부하상태를 확인하고 가장 효율적인 V/F 패턴으로 운전시킬 수 있다. 이때 인버터의 스위칭 주파수는 10[KHz]로 하여 그즈파로 인한 문제를 개선하도록 하였다.

그림 10은 각 주파수별 효율 특성을 보여주고 있고 75[%] 부하시 V/F1에 비해 V/F2 운전이 전대역에 걸쳐 2~3[%] 효율 개선효과가 있음을 알수 있고 50[%] 부하시는 30[Hz] 이상에서는 5[%] 정도 30[Hz]이하에서는 7~8[%]의 효율 개선 효과가 있으며 주파수가 낮아질수록 부하가 작을수록 기준의 방법 (V/F1 운전)에 비해 그 효과가 커짐을 알수있다.

역률 또한 그림 11과 같이 부하에 따라 과여자로 인한 문제를 해소함으로써 전대역에 걸쳐 2~5[%] 개선됨을 알수있고 부하가 작을수록 그 개선 효과가 크다.

6. 결 론

1. 싱글칩 마이크로프로세서를 이용하여 인버터 부하변동에 따른 V/F 추종 제어를 구현하였고 실험결과를 통해 그 유효성을 입증하였다.
2. 부하 변동에 따른 V/F 제어를 실현하여 효율과 역률을 개선시킴으로써 에너지 Saving에 기여하였다.
3. Motor 특성과 Program 기법을 이용하여 V/F 추종제어시 필요한 부가적 속도센서의 필요성을 제거함으로써 가격상승 요인을 제거하였다.

항후, 본 논문에 적용된 V/F 추종제어를 모든 Induction Motor에 적용시키기 위해 Program을 범용화 시키는 작업을 수행되어야 할 것이고 보다 가혹한 환경조건에서는 신뢰성 향상과 더불어 고성능, 저 가격화를 위한 보다 많은 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] Adel Gastli and Nobuyuki Matsui, "Stator Flux controlled V/F PWM Inverter with Identification of IM Parameters," IEEE Trans. Ind. Electro., Vol. 29, No. 4, pp. 334-340, 1992.
- [2] T.M. Rowan and T.A. Lipo, "A quantitative analysis of induction motor performance improvement by SCR voltage control," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-19, No. 4, pp. 545-553, 1983.
- [3] S. Kirschen, et al, "Optimal efficiency control of an induction motor drive," IEEE Trans., Vol. EC-2, No. 1, pp. 70-75, 1987.
- [4] Hideo Tomita, et al, "Optimal Efficiency Control for energy saving of variable speed AC Motor," European conference on Power Electronics and Applications, pp. 819-822, 1988.
- [5] J.M.D. Murphy, "Thyristor control of A.C. Motor," New York Pergamon press, 1973

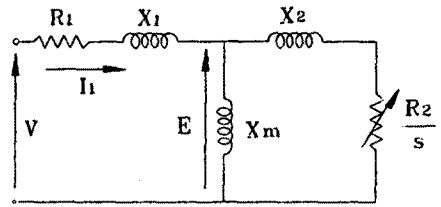


그림 2 유도전동기 등가회로

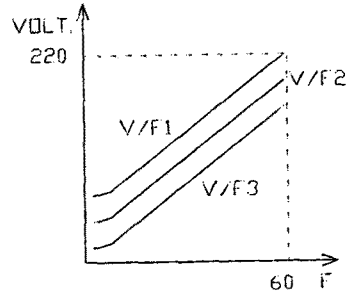


그림 3 부하에 따른 최적 V/F 패턴

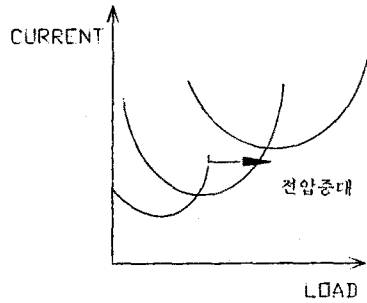


그림 4 전압 변화에 따른 유도전동기 부하특성

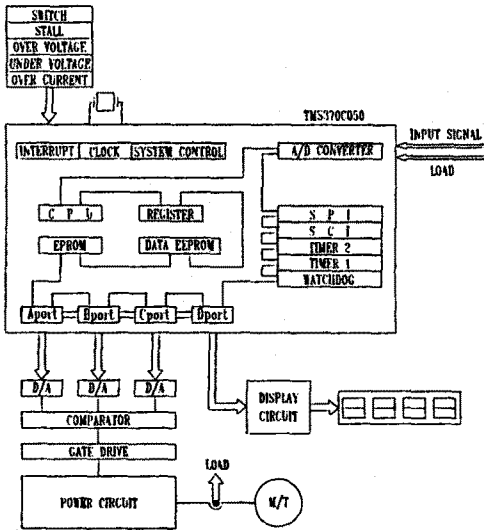


그림 1 인버터 시스템 구성도

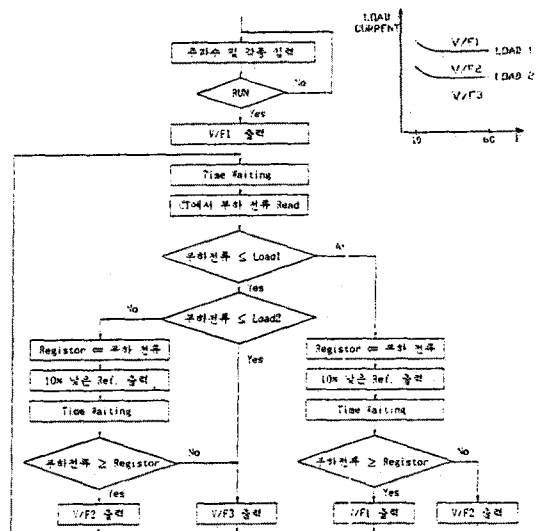


그림 5 V/F 제어 주흐름도