

디지털 브리지형 인버터로 구동되는 3상유도전동기의 LC 필터에 의한 전류 및 전력 파형 개선

정주윤*, 박진길**, 강창남**

*: 동의공업전문대학 **: 한국해양대학교

The Current and Power Waveform Improvement of a 3Φ Induction Motor with LC Filter Driven by a Digital Bridge Inverter

J. Y. Chung*, J. G. Park**, C. N. Kang**

*: Dongeui Tech. Junior College **: Korea Maritime University

ABSTRACT

This paper concerns with a method to improve the current and power waveforms of the variable speed 3Φ AC motor system driven by the single-pulse PWM, and the current waveforms and 3Φ power waveforms are analyzed by FFT under various running conditions.

By the performance analysis through the experiments, the following results have been obtained. AC source of pseudo sine waveform can be obtained from the modulated alternating square voltage by means of the well designed LC filter. It is confirmed that current waveforms and 3Φ power waveforms can be improved by utilizing the high order low pass LC filter than that of lower order. Especially, current waveforms and 3Φ power waveforms can be much improved at low frequency domain. 3Φ power waveforms have a smaller ripple and bigger power by utilizing the high order low pass LC filter than that of lower order. Also, the running condition of 3Φ AC motor is good at low frequency domain.

1. 서 론

가변속 유도전동기를 제어하기 위하여 직류-교류 전력변환 장치인 반도체전력소자를 이용한 PWM 인버터가 주로 사용되는데 이는 출력단의 진압 및 주파수를 제어할 수 있고, 또한 전동기에 입력되는 고조파(Harmonics)진압 및 전류로 인해 전동기의 손실을 증가시키고 온도상승과 토크 맥동의 원인이 되는 고조파의 영향을 저감시킬 수 있는 장점 때문에 일반 산업체에 널리 응용되고 있다. 본 연구에서 사용한 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)는 power-MOSFET의 고속 스위칭(Switching) 성능과 양극성 트랜지스터(Bipolar Transistor)의 고전압·대전류 처리 능력을 함께 가진 신형 소자로써 범용 인버터로 많이 사용되고 있으며, 과거에 일정속도로 운전하던 범용유도전동기는 범용인버터를 그대로 사용하여 간단하게 가변속운전을 할 수 있다.

본 연구에서는 단펄스(Single-pulse) PWM에 저역통과 LC 필터를 사용하여 보다 단순하면서 용이하게 구형파진압에 의하여 유사정현과 전류를 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 전브리지형 인버터와 저역통과 LC필터를 이용하여 가변주파수에도 비교적 깨끗한 정현파 전류를 얻기 위하여 이미 알려진 많은 필터들의 특성을 시뮬레이션에 의한 파형분석을 통하여 교류진원의 파형과 3상순시전력파형을 FFT 분석을 통하여 비교·분석해 본 결과 기존의 LC필터는 실제로 용용하기엔 여러 가지 제약이 따르므로 실험장치에 사용된 모터에 적합한 수정(Revised)된 3차계와 9차계 필터를 설계하고 교류전류와 3상순시전력파형의 실험결과를 FFT 분석을 통하여 비교·분석해 본다.

2. LC필터의 해석

Fig. 1은 전브리지형 인버터의 주회로도이다. 이 때 LC필터에 주어지는 공급전압 $v(t)$ 는 식(1)과 같이 주어진다.

$$v(t) = E[u(t-A) - u(t-B) - u(t-C) + u(t+D)] \quad (1)$$

Fig. 1의 진압파형을 고려하여 식(1)을 라플라스변환하면 식(2)와 같이 된다.

$$V(s) = \frac{E}{s}(e^{-As} - e^{-Bs} - e^{-Cs} + e^{-Ds}) \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= kT_p, & B &= T_p(k+0.5T_s) \\ C &= T_p(k+0.5), & D &= T_p[k+0.5(1+T_s)] \\ k &= 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

단, T_p : 주기, T_s : 전력이용률($2T_u/T_p$)

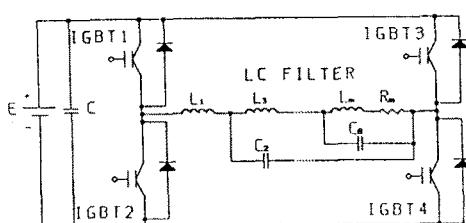


Fig. 1 Main circuit of the full-bridge inverter with a low pass LC filter

3. 실험 결과 분석

구성된 LC필터의 일부인 실제 모터의 저항과 인덕턴스의 값은 기존의 LC필터의 값과 차이가 있어서 응용하기엔 여러 가지 제약이 따르므로 실제 모터에 적용할 LC필터를 설계 한다. 이 필터를 편의상 수정된(Revised) 필터라 한다. 본 연구에서는 유도전동기의 가변속구동을 고려하여 $\omega=503$ [rad/sec] (80Hz)로 LC필터를 설계하고 전동기의 저항과 인덕턴스는 회전자 구속시험(Blocked-rotor test)과 무부하시험(No-load test)을 통해 근사적으로 구할 수 있다. 실험 전동기를 기준하여 $R_m=85.0[\Omega]$ 과 $L_m=275.0[\text{mH}]$ 로 하였다. 여기에서 실험한 자료는 입력단의 전원전압이 $80[V]$ 에서 실험하였다.

3.1 수정된 3차계 필터로 구동한 경우

3차계 LC필터회로에서 $R_m=85.0[\Omega]$, $L_1=180.0[\text{mH}]$, $C_2=40.0[\mu\text{F}]$, $L_m=275.0[\text{mH}]$ 일 때 대역폭이 $503[\text{rad/sec}]$ 인 수정된 저역통과 LC필터를 얻는다. 위의 파라메타를 식(2)에 대입하고 $I_d(s)$ 의 관계식을 구하면 식(5)과 같다.

$$I_3(s) = \frac{E}{s} \frac{505050.47}{F_3(s)} (e^{-As} - e^{-Bs} - e^{-Cs} + e^{-Ds}) \quad (5)$$

여기서,

$$F_3(s) = s^3 + 309.091s^2 + 229798.0s + 42929290.0$$

Fig. 2a는 20Hz에서 $T_s=50\%$ 와 $T_s=80\%$ 일 때 실제 전류 $i_3(t)$ 의 과형이다. 전력이용률 T_s 에 관계없이 리풀이 포함된 유사정현과 형태를 보이고 있으며 T_s 가 클수록 진폭이 약간 증가하고 있다. Fig. 2b는 20Hz에서 $T_s=80\%$ 일 때 실제 전류 $i_3(t)$ 의 FFT 분석이다. 기본파의 1/2 크기인 제3고조파와 기본파의 1/9 크기인 고조파가 있다. Fig. 3a는 20Hz에서 $T_s=50\%$ 와 $T_s=80\%$ 일 때 실제 3상순시전력 $P_{3\phi}(t)$ 의 과형이다. 전력이용률 T_s 가 클수록 진폭이 증가되고 리풀도 증가함을 알 수 있다. Fig. 3b는 20Hz에서 $T_s=80\%$ 일 때 실제 3상순시전력 $P_{3\phi}(t)$ 의 FFT 분석이다. 20Hz의 3배인 60Hz에서 DC성분의 1/9 크기인 고조파가, 6배인 120Hz에서 DC성분의 1/1.3 크기인 고조파가, 9배인 180Hz에서 DC성분의 1/22 크기인 고조파가 나타난다.

Fig. 4a는 50Hz에서 $T_s=50\%$ 와 $T_s=80\%$ 일 때 실제 전류 $i_3(t)$ 의 과형이다. 전력이용률 T_s 의 크기에 관계없이 정현파에 근사하고 진폭은 T_s 가 클수록 증가함을 알 수 있다. Fig. 4b는 20Hz에서 $T_s=80\%$ 일 때 실제 전류 $i_3(t)$ 의 FFT 분석이다. 기본파만 존재하는 정현파임을 알 수 있다. Fig. 5a는 20Hz에서 $T_s=50\%$ 와 $T_s=80\%$ 일 때 실제 3상순시전력 $P_{3\phi}(t)$ 의 과형이다. T_s 가 클수록 진폭이 증가함을 알 수 있다. Fig. 5b는 50Hz에서 $T_s=80\%$ 일 때 실제 3상순시전력 $P_{3\phi}(t)$ 의 FFT 분석이다. 50Hz의 3배인 150Hz 전후에서 DC성분의 1/30 크기인 고조파가, 6배인 300Hz에서 DC성분의 1/18 크기인 고조파가 나타난다.

전류파형인 Fig. 2a와 Fig. 4a를 비교·분석하면 주파수가 높을수록 정현파에 가까워지거나 진폭은 다소 감소하고, 전력이용률 T_s 가 클수록 진폭이 증가함을 알 수 있다. 3상순시전력파형인 Fig. 3b와 Fig. 5b를 비교·분석하면 주파수가 높을수록 리풀이 감소하고 진폭도 증가하였다.

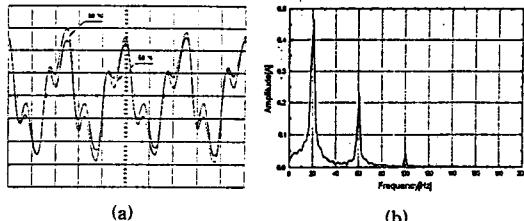


Fig. 2 Current waveforms and FFT analysis with revised 3rd order filter in the case of $T_s=50\%$ and $T_s=80\%$ at 20Hz (0.3 A/DIV, 20 ms/DIV)

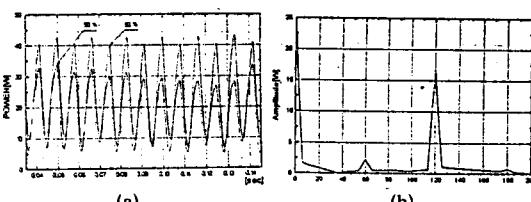


Fig. 3 3φ power waveforms and FFT analysis with revised 3rd order filter in the case of $T_s=50\%$ and $T_s=80\%$ at 20Hz

3.2 수정된 9차계 필터를 사용한 경우

9차계 LC필터 회로에서 $R_m=85[Ω]$, $L_1=120.0[mH]$, $C_2=50.0[\mu F]$, $L_3=140.0[mH]$, $C_4=50.0[\mu F]$, $L_5=140.0[mH]$, $C_6=50.0[\mu F]$, $L_7=140.0[mH]$, $C_8=40.0[\mu F]$, $L_m=275.0[mH]$ 일

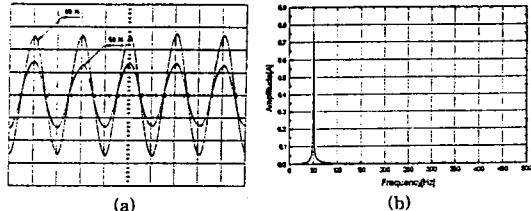


Fig. 4 Current waveforms and FFT analysis with revised 3rd order filter in the case of $T_s=50\%$ and $T_s=80\%$ at 50Hz (0.3 A/DIV, 10 ms/DIV)

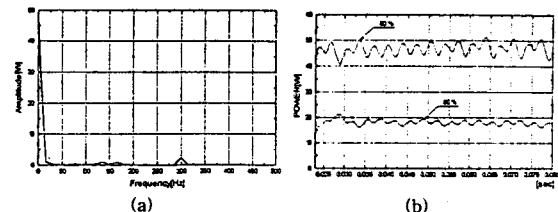


Fig. 5 3φ power waveforms and FFT analysis with revised 3rd order filter in the case of $T_s=50\%$ and $T_s=80\%$ at 50Hz

때 대역폭이 503[rad/sec]인 개정된 저역통과 LC필터를 얻는다. 위의 파라메타를 식(2)에 대입하고 $I_3(s)$ 의 관계식을 구하면 식(4)과 같다.

$$I_3(s) = \frac{V_s}{s} \frac{2.20867 \times 10^{21}}{F_{3\phi}(s)} (e^{-As} - e^{-Bs} - e^{-Cs} + e^{-Ds}) \quad (7)$$

여기서,

$$F_{3\phi}(s) = s^9 + 309.091s^8 + 1150433.0s^7 + 3.2748 \times 10^8 s^6 + 4.2957 \times 10^{11} s^5 + 1.0802 \times 10^{14} s^4 + 5.6597 \times 10^{16} s^3 + 1.1376 \times 10^{19} s^2 + 1.8000 \times 10^{21} s + 1.8773 \times 10^{23}$$

Fig. 6a는 20Hz에서 $T_s=50\%$ 와 $T_s=80\%$ 일 때 실제 전류 $i_3(t)$ 의 과형이다. 전력이용률 T_s 에 관계없이 약간의 리풀이 포함된 유사정현파형이다. Fig. 6b는 20Hz에서 $T_s=80\%$ 일 때 실제 전류 $i_3(t)$ 의 FFT 분석이다. 기본파의 1/4 크기인 제3고조파와 기본파의 1/16 크기인 제5고조파가 나타난다. Fig. 7a는 20Hz에서 $T_s=50\%$ 와 $T_s=80\%$ 일 때 실제 3상순시전력 $P_{3\phi}(t)$ 의 과형이다. T_s 가 클수록 진폭이 증가되고 리풀도 증가함을 알 수 있다. Fig. 7b는 50Hz에서 $T_s=80\%$ 일 때 실제 3상순시전력 $P_{3\phi}(t)$ 의 FFT 분석이다. 20Hz의 6배인 120Hz에서 DC성분의 1/27 크기인 고조파가 나타난다. 전류파형인 Fig. 6a와 Fig. 8a는 주파수가 높을수록 정현파에 가까워지거나 진폭은 감소하고, 전력이용률 T_s 가 클수록 진폭이 증가함을 알 수 있다. 전류파형의 형태는 Fig. 6a와 Fig. 8a의 9차계 필터로 구동한 경우가 Fig. 2a와 Fig. 4a의 3차계 필터로 구동한 경우 보다 개선이 되었음을 알 수 있다. 특히 50Hz의 전류파형 보다는 20Hz의 전류파형이 많이 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 전류의 진폭은 다소 감소하였다. 3상순시전력파형도 Fig. 7a와 Fig. 9a의 9차계 필터로 구동한 경우가 Fig. 3a와 Fig. 5a의 3차계 필터로 구동한 경우 보다 개선이 되었음을 알 수

있다. Fig. 9b는 50Hz에서 $T_s=80\%$ 일 때 3상순시전력 $P_{3\phi}(t)$ 의 FFT 분석이다. 50Hz의 6배인 300Hz에서 DC성분의 1/27 크기인 고조파가 나타난다. 전류파형인 Fig. 6a와 Fig. 8a는 주파수가 높을수록 정현파에 가까워지거나 진폭은 감소하고, 전력이용률 T_s 가 클수록 진폭이 증가함을 알 수 있다. 전류파형의 형태는 Fig. 6a와 Fig. 8a의 9차계 필터로 구동한 경우가 Fig. 2a와 Fig. 4a의 3차계 필터로 구동한 경우 보다 개선이 되었음을 알 수 있다. 특히 50Hz의 전류파형 보다는 20Hz의 전류파형이 많이 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 전류의 진폭은 다소 감소하였다. 3상순시전력파형도 Fig. 7a와 Fig. 9a의 9차계 필터로 구동한 경우 보다 개선이 되었음을 알 수

있다. 모터의 구동상태도 9차계 필터로 구동한 경우가 낮은 주파수영역에서 보다 양호한 운전 상태를 보여주었다.

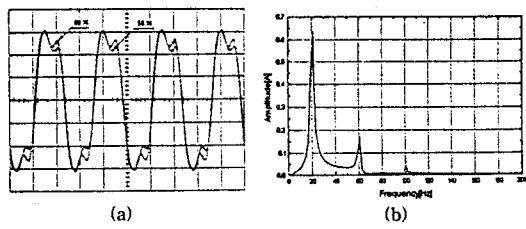


Fig. 6 Current waveforms and FFT analysis with revised 9th order filter in the case of $T_s=50\%$ and $T_s=80\%$ at 20Hz (0.26 A/DIV, 20 ms/DIV)

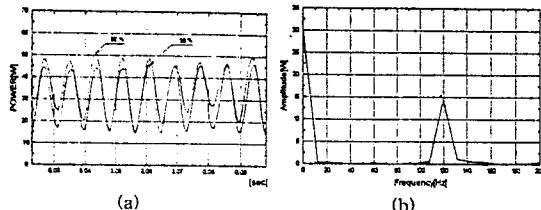


Fig. 7 3Φ power waveforms and FFT analysis with revised 9th order filter in the case of $T_s=50\%$ and $T_s=80\%$ at 20Hz

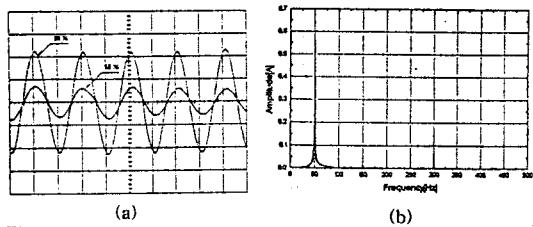


Fig. 8 Current waveforms and FFT analysis with revised 9th order filter in the case of $T_s=50\%$ and $T_s=80\%$ at 50Hz (0.26 A/DIV, 10 ms/DIV)

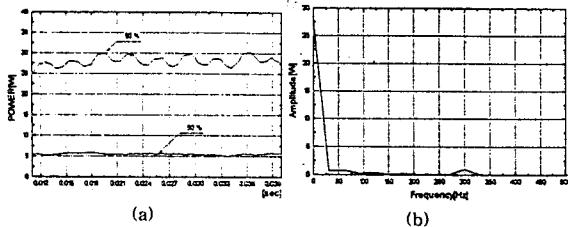


Fig. 9 3Φ power waveforms and FFT analysis with revised 9th order filter in the case of $T_s=50\%$ and $T_s=80\%$ at 50Hz

4. 결 론

본 연구의 실험장치는 일반적인 Δ 결선의 3상유도전동기에서 각 상을 독립시켜 3상을 구성하였으며 각 상을 완전히 독립시킴으로써 Δ 결선의 발생하는 각 상간의 상호 간섭을 배제하는 장점이 있다. 전브리지형 인버터로 구동되는 저역통과 LC필터가 부착된 이 실험장치에 구형파의 전압을 번갈아 주어질 때 전동기에 흐르는 전류파형과 순시전력파형을 실험을 통하여 각각 비교·분석하였고 정현파의 교류전원이 걸렸을 때와 유사하도록 LC필터를 설계하였다. 또한, 실험결과를 FFT 분석을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 설계한 LC 필터에 구형과 전압을 가하여 유사정현과 교류전원을 얻을 수 있었다.

2. 9차계 필터를 사용한 경우는 3차계 필터를 사용한 경우보다 전류의 진폭이 다소 감소하지만 파형은 개선이 되었다. 특히 낮은 주파수 영역에서 전류의 파형이 많이 개선이 되었다.

3. 3상순시전력파형은 9차계 필터를 사용한 경우가 3차계 필터를 사용한 경우보다 낮은 주파수에서 보다 리플이 작아 보다 안정된 전력을 얻을 수 있다. 모터의 구동상태도 낮은 주파수에서는 보다 양호한 운전 상태를 보여주었다.

- 20Hz~50Hz 이외의 주파수대와 상용화 가능한 보다 좋은 일반적인 LC필터 설계에 연구가 더 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. P. N. Enjeti, P. D. Ziogas, J. F. Lindsay, M. H. Rashid, "A New PWM Speed Control System for High-performance AC Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol.37, No.2, pp143-151, 1990.
2. 흥순육, 차재덕, 조규복, "시평균화방법을 이용한 PWM 신호 발생에 관한 연구", 대한전기학회 학계학술대회 논문집, pp. 1088-1091, 1992.
3. K. Inagaki, T. Furuhashi, A. Ishiguro, M. Ishida, "A New PWM Control Method for ac to dc Converter with High-Frequency Transformer Isolation", IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 29, pp. 486-492, 1993.
4. 김준석, 설승기, "공간 전압 베티 PWM의 새로운 기법", 대한전기학회 논문지, Vol. 44, No. 7, pp. 865-874, 1995.
5. A. B. Williams, F. J. Taylor, "Electronic Filter Design Hand-book", McGraw-Hill, pp. 11.1-11.14, 1990.
6. A. Antoniou, "Digital Filters: Analysis and Design", McGraw Hill, pp. 15-300, 1979.
7. M. H. Rashid, "Power Electronics Circuit, Device and Application", Prentice-Hall, pp. 241-297, 1988.
8. 정순배, 김대근, 이유선, "i80c196kc 구조(메카 트로닉스)", 도서출판 인텔기술, pp. 1.2 - 1.49, 1994.