

전력용 3상 PWM 파형의 상용전원 변환용 Filter 연구

여 환재 · 서 영택 · 오 철수
경북대학교 전기공학과

A study of power filter for conversion of 3 phase PWM
waveform to grid power line

Hwan-Je Yea Young-Taek Sea Chul-Soo Oh
Dept. of Electrical Eng. Kyung-Pook Nat. Univ.

Abstract

A low-pass L-C filter has been adopted for conversion of frequency variable 3 phase PWM waveform to a grid power line and it is used for attenuation of harmonics in the VSI PWM Inverter. A optimum design of the L, C parameters was derived. The result of the study show that the inductor L seems to have a certain air gap for linear I-V characteristics and the resonant frequency of the filter must be set below the 5th harmonics of the grid power line. Further, the voltage drop in L must be within a adequate limit compared to grid power voltage.

1. 서론

가변속도 동기발전기의 출력단에 PWM 인버터로 일정주파수를 만들어 상용전원과 연계시킬 수 있는 System이 주어졌 있다고 가정한다. 이러한 출력파형을 일정전압 및 주파수로 변환하여 계통선에 연계하기 위해 전압형(VSI) PWM Inverter에 포함된 높은 차수의 고조파를 제거하는 Low-Pass L-C Filter를 쓰는것이 정설이다. [3] 실제 사용에 있어서는 인버터 L의 히스테리시스 현상과 자기포화로 인해, 필터 출력단에 인버터 출력이 포함되어 있지 않은 제 3, 5고조파가 생긴다. 제 3고조파는 변압기 1 차축을 델타로 결선함으로써 제거될 수 있지만 제 5고조파는 여전히 제거되지 않는다. 이로 인해 filter의 출력파형은 60Hz 기본파에 비해 부하가 증가할 수록 비례해서 왜곡 되어지며, filter의 본기능에서 역작용이 나타난다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 철심에 공극을 삽입하여 인버터의 I-V 특성을 선형화 하였으며, 주어진 설비의 축소 simulation 실험결과로 전류용량이 확장된 filter의 최적 L, C 값을 유출할 수 있는 방법을 유도하였다. 축소 simulation의 실험에서는 출력파형을 GPIB를 통해 On-Line 으로 받아들여 푸리에 해석을 하고 filter에서 L과 C의 영향을 비교검토 하였다.

2. 3상 정현파 PWM 인버터.

기본적인 3상 PWM Inverter의 회로도에는 그림 1 과 같다.

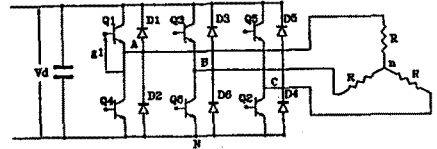


그림 1. 인버터 회로도

3상 인버터의 변조신호는 120°의 위상차를 가지는 정현파 콘트롤신호와 캐리어신호인 3각파를 비교함으로써 발생된다. 트랜지스터 Q1는 삼각파보다 정현파 Va가 클 때 도통되며, 반대로 Q4는 삼각파보다 작을 때 도통되어 두 트랜지스터는 동시에 도통될 수 없다. 마찬가지로 Q3과 Q6은 Vb와 Q5와 Q2는 Vc와 비교하여 6개의 Tr을 On-Off하게 되어 그림 2(b)와같은 변조신호를 발생하게 된다. [1]

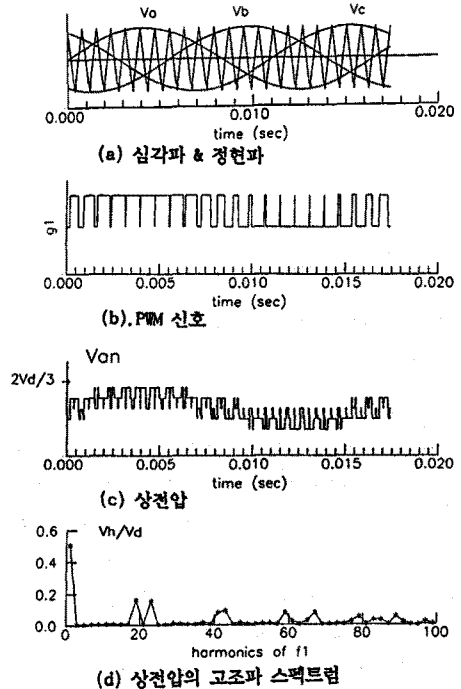


그림 2. 3상 PWM 파형 분석 (mf=21, M=1)

3상 인버터의 출력 선간전압과 상전압은 식 (1)과 (2)로 주어진다. [2]

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = V_d \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = V_d/3 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2)식에 의해 구한 순시 출력전압을 그림 2 (c)에 나타내었으며, 이때 변조율 $M=Ar/Ac=1$, 주파수비 $mf=fc/fr=21$ 이다.

그림 2의 출력파형은 모두 주기함수이며, 따라서 식 (3)의 푸리에 급수로 전개하여 각 주파수별로 분리할 수 있다. 정현함수의 한 주기동안 출력파형의 pulse 수를 p 라 할 때, 출력파형의 순시전압은 다음과 같다.

$$V(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^p [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \quad (3)$$

순시 선간전압에서 m 번째 쌍의 양의 pulse가 $\omega t = \alpha m$ 에서 시작해서 δ 만큼 지속되고, 음의 pulse가 $\pi + \alpha m$ 에서 시작해서 δ 만큼 지속되었다면, 전체 pulse p 개에 대한 푸리에 계수 A_n 과 B_n 은 식 (4), (5)로 표현된다. [2]

$$A_n = \sum_{m=1}^p \frac{2V_d}{\pi} [\sin n(\alpha m + \delta) - \sin(n\alpha m)] \quad (4)$$

$$B_n = \sum_{m=1}^p \frac{2V_d}{\pi} [\cos(n\alpha m) - \cos n(\alpha m + \delta)] \quad (5)$$

상전압의 순시치는 그 크기가 $2/3 V_d$ 또는 $1/3 V_d$ 가 되므로, 식 (6), (7)의 V_d 대신 m 번째 pulse의 크기 V_m 을 대입하면, 상전압의 푸리에계수를 유도할 수 있다. 식 (3)으로 V_{AN} 을 푸리에전개하여 각 고조파성분별로 계산한 것을 그림 2(d)에 나타내었고, 여기에서 인버터 출력전압의 고조파는 주로 mf 이상의 높은 차수의 것이며, 제 3고조파에서 제 mf 고조파 사이의 고조파 크기는 기본파에 비해 매우 작은 값을 알 수 있었다.

3. Low pass L-C 필터

그림 3은 일반적인 Low-Pass L-C filter의 회로도이다. 필터의 전달함수는 무부하 또는 저항부하 일때 다음과 같다.

$$\frac{E_L}{E_1}(\omega) = \frac{1}{-\frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{2\delta}{\omega_0} \omega + 1} \quad (6)$$

ω_0 : 공진주파수, δ : damping ratio

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}, \quad \delta = \frac{1}{2R} \sqrt{L/C}, \quad u = \frac{\omega}{\omega_0}$$

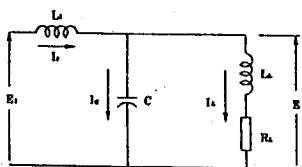


그림 3 L-C Filter 회로

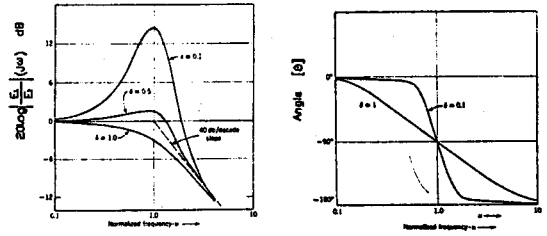


그림 4. 필터의 전압비와 위상특성

(6)식의 Bode 선도는 그림 4와 같으며 그림에서 보듯이, 공진 주파수에서 부하의 변화에 따라 전압변동이 크므로 인버터의 고조파를 제거하기 위해 filter의 공진주파수를 상용주파수 60Hz를 기준으로 하여 3고조파에서 mf 고조파사이의 주파수에 들어오도록 설계하여야 한다. 한편 실질적인 PWM 파형은 약간의 5고조파를 포함하고 있으므로 공진주파수의 범위를 더욱 축소하여 3에서 5고조파 사이로 잡아야 할 것으로 생각한다.

Filter에 대한 parameter를 선정하기 위해, 기본파 전류에 대한 변수 $K1$ 과 $K2$ 를 다음과 같이 도입하여 전개한다.

$$K1 = \left| \frac{X_{c,1}}{Z_{L,1}} \right|, \quad K2 = \left| \frac{X_{L,1}}{Z_{L,1}} \right| \quad (7)$$

$Z_{L,1}$: 기본파 전류에 대한 부하 임피던스

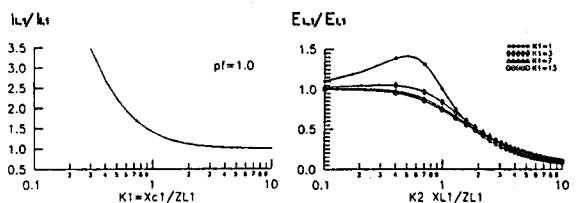
그러면 filter의 출력과 입력의 기본파 전류비는 식 (8)과 같다. [3]

$$\frac{I_{L,1}}{I_{L,1}} = \frac{\cos \theta + j(\sin \theta - K1)}{K1(\sin \theta - j \cos \theta)} \quad (8)$$

식 (8)에서 부하가 저항으로만 되어있을 경우(부하각 $\theta=0$)를 적용하면 그림 5(a)에서 처럼 $X_{c,1}$ 이 적을수록 기본파 전류비는 1에 가까워짐을 볼 수 있다. 그리고, 기본파 전압은 식 (9)과 같이 된다. [3]

$$\frac{E_{L,1}}{E_{1,1}} = \frac{K1(\sin \theta - j \cos \theta)}{\cos \theta + j(\sin \theta - K1)} \cdot \frac{K1(\sin \theta - j \cos \theta)}{\cos \theta + j(\sin \theta - K1)} + j K2 \quad (9)$$

식 (9)에서 전압비는 L,C 값 모두에 영향을 받음을 알 수 있으며, 이를 부하전류와 비례하는 $K2$ 에 따른 전압비를, $K1$ 변수로 하여, 그림 5(b)에 나타내었다.



(a) $K1$ 에 따른 전류비

(b) $K2$ 에 따른 전압비

그림 5. $K1, K2$ 에 따른 기본파 전류, 전압비

그림 5(b)에서 인버터의 출력단에 정격부하 Z_L 을 연결 했을 때, $E_a/E_1=0.85$ 즉, L 에의 전압강하가 입력단 기본파 전압의 15% 정도일 경우, 그림에서 $K1=7, K2=0.7$ 를 얻을 수 있으며, 이에 상응하는 L 과 C 값을 구할 수 있다. 여기에서 기본파 전압비를 높이려면 실제로 인버터에 약간의 5 고조파가 포함된 것을 고려하여 $K1$ 또는 $K2$ 값을 줄여서 filter의 최적치를 유도할 수 있다.

4. 실험 및 고찰

4.1 실험방법

그림 6의 회로에서 L 과 C 의 값을 변화시키면서 상전압의 순시치를 Scope로 측정하여 GPIB를 통해 컴퓨터에 읽어들이고, Discrete Fourier Transform (DFT)를 실행하여 기본파 성분과 고조파를 차수대로 나열하였다.

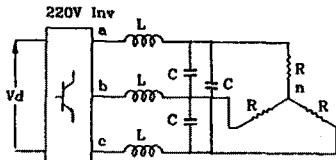


그림 6 3상 인버터의 필터회로

실험에 사용된 L 의 I-V특성은 그림 7과 같으며, 여기에서 철심에 공극을 삽입함으로써 선형적인 I-V 특성들을 가지는 L 은 얻을 수 있었다.

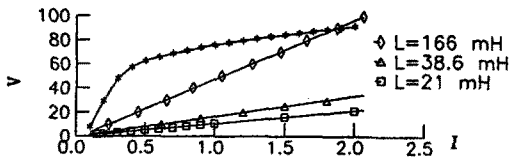


그림 7. 실험에 사용된 L의 I-V 특성

그리고, 측정파형을 각 고조파 성분별로 분석하기 위해 DFT을 이용하였으며, DFT와 푸리에 계수의 관계는 다음과 같다. 어떤 주기함수의 푸리에전개를 복소형태로 표시하면 식(10)과 같다.

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega t} \quad (10)$$

여기에서 $C_n = 1/2 (A_n + j B_n)$ 이며

$$C_n = 1/T \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-jn\omega t} dt \quad (11)$$

그러므로 n 차 고조파의 크기는 C_n 값의 2배가 된다.

한편 푸리에변환식은 식 (12)과 같다.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (12)$$

식 (11)과 (12)를 비교하면 $C_n \cdot T = F(\omega)$ 가 된다. 따라서 식 (12)를 컴퓨터로 계산하기 위해 식 (13)의 DFT 변환식을 다음과 같이 이용한다. [4]

$$F(f_n) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} f(t_k) e^{-j2\pi f_n t_k} = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} f(t_k) e^{-j2\pi k n / N} \quad (13)$$

$\Delta t = T/N$, $N = \text{Sample Numbers}$, $k=0, 1, 2, \dots$

실제 식 (13)의 활용에 있어서는 대신 $1/N$ 을 대입하여 계산하였다. 식 (13)를 이용하여 filter의 출력파형을 각 고조파 성분별로 나열하여 파형의 왜형을 및 고조파의 크기를 분석하였다.

4.2 실험결과

그림 8과 10(a)는 220V 3상 인버터의 선간 a-b 사이에 그림 7의 비선형 I-V특성을 가지는 L 을 직렬로 연결하고 2000을 부하에 연결하였을 때 V_{ab} 파형과 이 파형의 고조파 성분들을 나타내고 있다. 이 그림에서 비선형의 I-V특성을 가지는 L 로 인해, 부하단의 출력전압은 인버터에 포함되어 있지않는 제 3,5고조파를 함유함을 보았다.

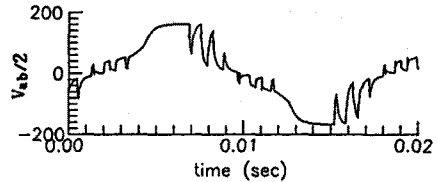


그림 8. 비선형 L, C=0μF 일때의 선간 출력파형

그림 9와 10(b)는 3.5μF 콘덴서 그림 6과 같이 연결하고, 제 3 고조파 전류가 부하단에 유입되지 못하게 하기위해 단상변압기 3대를 filter와 부하사이에 Δ-결선으로 했을 때의 출력과 고조파 성분이다.

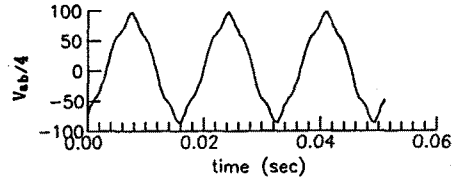
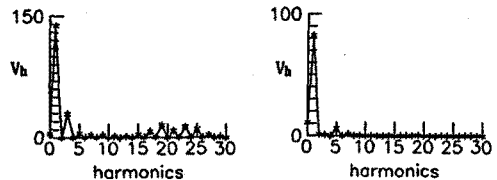


그림 9. 제 5고조파를 포함하는 선간 출력파형 (C=3.5 μF, Δ결선)



(a) 그림 8의 고조파 스펙트럼 (b) 그림 9의 고조파 스펙트럼

그림 10. 그림 8, 9의 고조파 스펙트럼

그림 10(b)에서 제 3고조파는 변압기 결선에 의해 부하단에 흐르지 못하나, 여전히 제 5고조파는 제거되지 않았다. 위 실험에서 전력용 필터에 사용될 L 은 선형의 I-V특성을 가져야함을 알 수 있다.

아래 그림 11, 12는 인버터 철심에 공극을 넣어 선형적인 I-V 특성을 갖는 L 을 사용하여 L 과 C 가 파형의 왜곡과 전압강하에 미치는 영향을 보여주고 있다.

그림 11은 L 을 21 mH 고정시키고 Δ결선된 하나의 C 값을 3.5μF에서 13.42 μF 까지 변화하였을 때의 출력파형의 전체왜곡율 (Total Harmonic Distortion)과 부하에 따른 기본파 전압비를 보여준다.

여기에서 입력부하에 대해 C가 증가할 수록 파형의 전체왜곡율은 줄어들고 기본파 전압비는 증가함을 볼 수 있다. 그러나 C값이 증가할 수록 그림 5와 같이 기본파 전류비가 증가하여 효율이 감소하게 된다. 그림 12는 C를 3.5μF로 고정하고 L을 166mH, 38mH, 21mH로 변화하였을 때의 상전압 출력파형의 전체왜곡율과 기본파 전압비를 나타내고 있다. 그림 12에서 L값이 증가할 수록 파형의 왜곡율은 줄어들지만 인덕터에서의 전압강하로 인해 출력과 입력의 기본파 전압비는 줄어들음을 볼 수 있다.

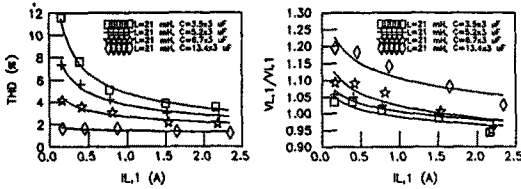


그림 11. C의 변화에 따른 출력파형의 THD(%)와 기본파 전압비

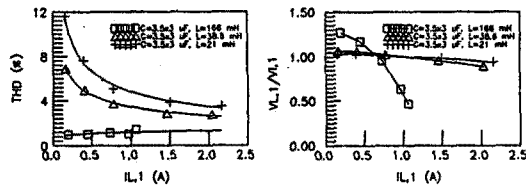
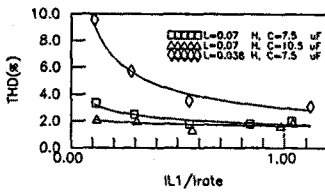
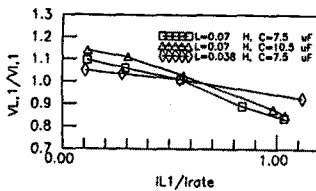


그림 12. L의 변화에 따른 출력파형의 THD(%)와 기본파 전압비

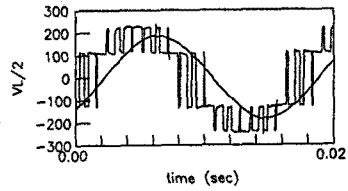
그림 13은 상전압 140V 이고, 정격부하전류 25A의 1/10 simulation model로서, 정격부하전류 2.5A 일때 즉, 정격부하 56Ω에 대해 L=70mH, 38mH, C=2.5μF, 3.5μF를 선간에 연결했을 때의 필터 출력파형의 전체왜곡율과 인버터와 부하단 상전압의 기본파 전압비를 나타내고 있다. 그림 13(b)에서 필터의 공진주파수가 상용전원의 제 5고조파 주파수 주변에 놓여있을때(L=38mH, C=2.5μF)에는 그 아래에 놓일때 보다 부하단의 출력파형은 상승되나, 그림 13(a)에서 보듯이 부하가 감소되었을 때 인버터 출력이 포함된 제 5고조파의 증대로 인해 필터의 출력파형은 정현파에 비해 상당히 많이 왜곡되어짐을 알 수 있다.



(a) 출력파형의 THD(%)



(b) 기본파 전압비



(c) 출력파형

그림 13. 축소모델의 출력파형 분석

따라서, 인버터의 출력파형을 개선하기 위한 최적의 L, C 값은 filter의 공진주파수가 제 5고조파 주파수 미만이 되는 최소의 L과 C값으로 하여야 함을 알 수 있다.

실험에서 파형의 전체왜곡율은 2% 이하이고, 정격부하에서의 기본파 전압비는 약 85%가 되었다. 부하에서의 정격전류를 실험값의 10배로 선정하였을때, 실험과 동일한 결과를 얻기 위해서는 실제모델의 정격부하에 대해 식 (9)를 이용하여 실험과 동일한 K1, K2 값으로 놓고 L과 C의 값을 계산하여 선정함으로써, 주어진 설비용량에 맞는 filter의 최적치를 구할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 전력용 3상 PWM 인버터의 출력파형을 상용전원으로 변환하기 위한 Low-Pass L C filter를 설계하였다. 실험에서 filter에 사용될 인덕터 L은 core에서 히스테리시스현상과 자기포화가 없는 선형의 I-V특성을 가져야 함을 보였다. 본 실험에서는 core에 공극을 삽입함으로써, 인덕터에서의 히스테리시스와 자기포화 현상을 현저히 줄어들게 하였으며 3상 PWM 인버터의 고조파 제거를 위한 filter의 최적 L, C값은 filter의 공진주파수가 제 5고조파 주파수 미만이 되는 최소의 L, C 값이어야 함을 보였다.

참고문헌

- [1] N. Tore, T.M. Undellad, W.P. Robbin "Power Electronics: converters, Applications, and Desine" Jone Wiley & Sons 1989
- [2] M.H.Rashid "Power Electronics circuits, device, and applications" Prentice-Hall, 1988
- [3] B.D Bedford and R,G Hoft "Pinciples of Inverter Circuits" John Wiley & Sone, 1964
- [4] W.H.Press, B.P.Flannery, S.A.Teukolsky, W.T.Vetterling "Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing" Cambridge University Press, 1988
- [5] 朴 貴泰, 柳 志潤, 安 錫均, 李 廷旭 "계통선 연계형 인버터의 설계 및 시제작" 電氣學會論文集 1993.1 Vol.42 NO 1.