

CVCF용 VSI의 출력필터 설계

김재식, 최재호
충북대학교 전기공학과

Output Filter Design of Voltage Source Inverter for CVCF System

Jaesig Kim, Jaeho Choi
Dept. of Electrical Engineering, Chungbuk National University

Abstract

This paper describes an optimal design method of VSI output filter for CVCF system. The cost function is used for design, and all parameters are described in p.u(per unit) so that can be adapted to the change of CVCF rating. The capacitor current feedback scheme is proposed to control the damping ratio of the filter plant to meet the system more stable. This means that the LC resonance can be suppressed well in transient condition and can use the same control gains under the change of system capacity. The validity of the proposed method is well verified with the theoretical analysis and simulation results.

1. 서 론

산업 사회의 발전에 따라 소비자의 고급화 성향과 이에 대응키 위한 각 산업체의 노력은 높은 정밀도를 가지는 전자장비들의 생산을 배가 시켰고 고성능 제품에 대한 개발을 더욱 촉진시켰다. 이들 고성능 전자제품들은 정전이나 순시전압강하 등과 같이 전원상태가 불량한 경우에 매우 민감한 반응을 보인다. 따라서 양질의 전원에 대한 수요가 증가하게 되고 전원의 품질을 높이기 위한 관심과 노력이 집중되고 있다.

정전압 정주파수의 이상적인 전압원으로 동작하는 CVCF(Constant Voltage Constant Frequency) 시스템은 주 전력변환회로로 인버터로 구성된다. 인버터는 전력용 반도체 소자의 스위칭을 제어하여 직류를 교류로 변환시키는데 출력파형에 포함된 고조파를 제거하기 위하여 커패시터와 인덕터로 구성된 저역필터를 출력단에 설치한다. 그런데 이들 수동소자들이 차지하는 무게와 부피와 가격의 비중이 스위칭 소자의 발달로 상대적으로 증가하게 되어 필터의 최적설계에

많은 연구들이 진행되었다.[1,2,3] 최근 스위칭소자의 속도가 개선되고 고속 마이크로프로세서의 실용화 기술의 발달 추세로 인하여 과도상태 응답특성을 개선하기 위한 순시제어기법 등의 활용이 점차 확대되었다. 이들 빠른 제어응답 성능을 가지는 현대제어기법들은 고차의 제어기를 요구하게 되고 이들 고차 제어기의 안정성확보에 많은 관심이 집중되고 있다.

본 논문에서는 IGBT를 이용한 CVCF용 인버터 시스템의 출력측 LC 필터의 최적화 설계기법을 제시하였다. 제안된 방식은 인덕터와 커패시터에 대한 가격 Cost 함수를 도입하여 최적화하도록 하였고 모든 값은 p.u. 단위를 사용하여 설계하였다. 또한 커패시터 제한제어기의 이득을 Manabe 형을 사용하여 설계함으로써 과도상태에서의 LC 공진을 최대한 억제하도록 하였고 제어기의 부담도 줄이고 용량 가변시 같은 제어기의 이득을 사용할 수 있도록 하였다. 이를 이론적으로 전개하고 ACSL을 이용한 시뮬레이션을 통하여 비교 검토하였다.

2. 필터설계

필터설계에 있어서 편의상 필터의 최적 LC 값을 선정하는 단계까지는 인덕터의 내부저항을 무시하여 진행하고 DC 전압과 커패시터 전류의 제한 이득을 계산하는 과정에서는 인덕터 내부저항을 고려하였다. 필터설계의 진행순서는 아래와 같다.

- 1) 필터 사양과 진행에 필요한 가정을 수립
- 2) 필터의 분석과 설계방법 설정
- 3) 설정된 방법에 따라 이론적 전개
- 4) 필터설계의 예를 제시하고 시뮬레이션과 비교

2.1. 필터설계 사양과 가정

필터설계의 사양은 아래와 같다.

- 1) 부하는 1~0.8의 지상부하로 가정한다.
- 2) 무부하에서 정격부하까지 각 고조파 성분의 크기는 3% 이하이고 THD는 5% 이하로 한다.

3) 변조율(Modulation Index, MI)이 낮으면 THD가 증가하므로 MI의 최소값은 0.7로 제한한다.

그리고, 필터설계시 다음 사항을 가정한다.

- 1) 필터의 입력 전압은 이상적인 정현파 PWM-VSI의 출력파형이며 필터에서의 손실은 없다.
- 2) 필터의 비용은 필터의 리액티브 용량에 비례한다.
- 3) 같은 용량의 인덕터는 커패시터에 비해 가격이 2배이다.
- 4) 필터의 출력측 정격전압과 부하전류의 실효치 기본과 크기를 각각 '1.0' p.u.로 한다.

2.2 출력 필터 분석과 설계방법

그림 1은 본 논문에서 진행한 출력필터 분석과 설계에 대한 순서도를 보여준다.

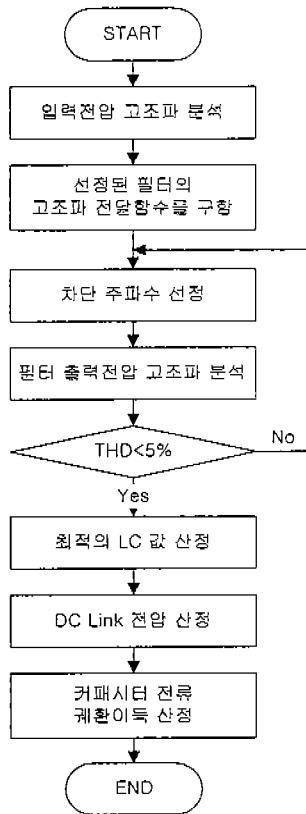


그림 1 필터설계 순서도

3. 필터 최적화 설계

3.1 입력전압 고조파 분석

정현파 PWM-VSI의 출력 전압은 DC 전압과 스위칭 함수의 곱으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{inv}(wt) = V_{dc} \cdot S(wt) \quad (1)$$

$$= V_{dc} M \sin(w_0 t) + V_{dc} \sum_{n=d}^{\infty} A_n \sin(nw_0 t)$$

여기서, d 는 최저 스위칭 고조파

식 (1)에서 기본파와 고조파 전압의 크기를 V_{dc} 로 정규화한 푸리에 계수는 표 1과 같다.[4]

표 1 V_n/V_{dc} 로 정규화된 푸리에 계수

Order	M=1	M=0.9	M=0.8	M=0.7
1	1.00	0.90	0.80	0.70
F_{sw}	0.60	0.71	0.82	0.92
$F_{sw} \pm 2$	0.32	0.27	0.22	0.17

3.2 고조파 전달함수

본 논문에서는 교류전원장치의 출력필터로 그림 2와 같이 가장 보편적으로 사용되는 LC 수동 필터를 사용하였다. 고조파를 포함한 입출력간의 전달함수를 구하면 식 (3)과 같이 표현된다.

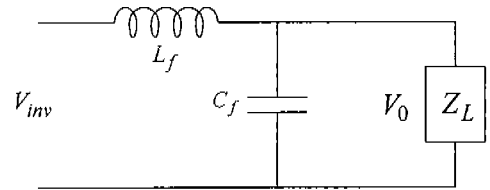


그림 2 LC 수동 필터

$$T_n = - \frac{1}{n^2 \frac{X_L}{X_C} - 1 - j \frac{nX_L}{Z_L}} \quad (3)$$

식 (3)에서 무부하 조건시 $nX_L \ll Z_L$ 이므로 분모의 가장 오른쪽 항을 무시하면 전달함수는 식 (4)와 같이 다시 표현될 수 있다.

$$T_n \approx - \frac{1}{n^2 \frac{X_L}{X_C} - 1} \quad (4)$$

3.3 차단 주파수 선정

사양 2)에 의거하여 가장 우세한 스위칭 고조파를 LC 필터에 의하여 3% 이하로 감쇄시키기 위하여 식 (4)를 식 (5)와 같이 변경하고 식을 전개하여 차단 주파수를 선정한다.

$$|T_n| = \frac{1}{n^2 \frac{X_L}{X_C} - 1} \leq 0.03$$

$$33.3 \leq n^2 \frac{X_L}{X_C} - 1 \quad (5)$$

$$\frac{34.3}{n^2} \leq \frac{X_L}{X_C}$$

3.4 출력전압의 THD 계산

이상적인 정현파 PWM 전압과형에 3.3절에서 구한 고조파 전달함수를 곱함으로써 LC 필터 출력전압을 계산할 수 있다. 출력전압의 THD를 식(6)에 의하여 계산한다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=3, odd}^{\infty} (V_{on})^2}}{V_{o1}} \quad (6)$$

계산된 THD가 5%를 초과하면 3.3절에서 언급한 3%를 감소 시키고 3.3절에서 차단 주파수를 다시 계산한다. 그리고 THD가 5% 이하를 만족할 때는 최적의 LC값을 다음과 같이 선정한다.

3.5 최적의 LC값 선정

Cost 함수를 식 (7)과 같이 정의하고 이 값이 최소가 되는 LC 값을 선정한다. 그리고 가정 3)에 의하여 인덕터는 커패시터 용량의 2배로 계산한다.

$$C_{Cost} = \frac{2KVAL + KVAC}{\sum_{n=1, odd}^{\infty} |V_{on}| |I_{on}|} \quad (7)$$

여기서,

$$KVAL = \sum_{n=1, odd}^{\infty} |I_{in}|^2 X_{Ln}$$

$$KVAC = \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{|V_{on}|^2}{X_{Cn}}$$

3.6 DC Link 전압 선정

일정한 필터 입력전압에서 부하가 0.8 지상일 때 필터의 출력전압이 가장 작으므로 이 때를 기준으로 DC 전압을 선정하면 정격 저항부하시 MI가 0.7 이하로 내려가게 되어 사양 3)을 만족시키지 못하므로 정격 저항부하일 경우를 기준으로 DC 전압을 선정한다. 인덕터의 내부저항을 고려하여 커패시터와 인덕터와 인덕터 내부저항 각각의 기본파 전압의 합으로 필터의 입력전압을 결정하고 이를 MI 나누어줌으로써 DC 전압을 선정한다. 이를 식 (8)에 나타내었다.

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{2} |V_{inv}|}{M} \sqrt{\left[V_c \left(1 - \frac{X_L}{X_C} + \frac{R_f}{Z_L} \right) \right]^2 + \left(\frac{X_L V_c}{Z_L} + \frac{R_f V_c}{X_C} \right)^2} \quad (8)$$

3.7 커패시터 전류제한 이득산정

필터인덕터의 내부저항을 고려하면 필터의 입출력 전달함수는 2차로 표현되는데 인덕터 내부저항값이

작아서 결국 제동비 ζ 가 작게되고 빠른 응답이 요구되는 경우에 시스템이 불안정하여 공진형상이 심화되며 CVCF 시스템의 용량을 변경하는 경우에 필터의 사용특성이 달라지게 된다. 따라서 그림 3의 블록도와 같이 커패시터 전류를 제한시킴으로써 식 (9)와 같은 제동비의 가변효과를 가지도록 하여 안정도를 개선하고 시스템 용량변화시 일정한 사용특성을 가지도록 제한이득을 결정하였다.

$$\zeta = \frac{R_f + K_d}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \quad (9)$$

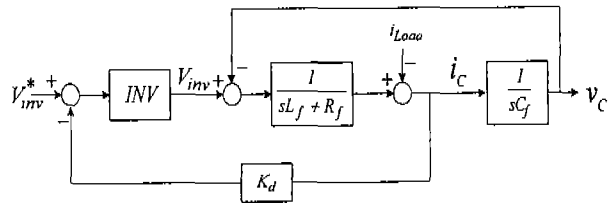


그림 3 커패시터 전류를 제한한 블록도

식 (10)과 같이 커패시터 전류제한후 구해진 필터 입출력 전달함수에서 식 (11)과 같은 Manabe형[5]을 적용하여 식 (12)와 같이 제한이득을 선정하였다.

$$\frac{V_0}{V_{inv}} = \frac{1}{L_f C_f s^2 + (R_f + K_d) C_f s + 1} \quad (10)$$

$$= \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}$$

$$a_2 = L_f C_f = \frac{a_0 r^2}{2.5}$$

$$a_1 = (R_f + K_d) C_f = a_0 r \quad (11)$$

$$a_0 = 1 = 1$$

$$K_d = \sqrt{2.5 \frac{L_f}{C_f} - R_f^2} \quad (12)$$

4. 필터 설계의 예시

- 정격전압 : 1상 220[V]/60[Hz]
- 정격출력 : 30[kVA]
- 스위칭 주파수 : 9.6[kHz]
- 인덕터 내부저항 : 0.05[Ω]
- 1 p.u 전류 : 136.36[A]
- 1 p.u 임피던스 : $\frac{220}{136.36} = 1.613 [\Omega]$
- 1 p.u 인덕터스 : $\frac{1.613}{377} = 4.279 [\text{mH}]$
- 1 p.u 커패시턴스 : $\frac{1}{1.613 \times 377} = 1,644 [\text{uF}]$

- 인덕터 저항 : $\frac{0.05}{1.613} = 0.031$ [p.u]
- 차단 주파수 : $\frac{X_L}{X_C} \geq 1340e^{-6}$
- 최적의 LC값 선정
 $L = 0.1099 \times 4.279e^{-3} = 470$ [uH]
 $C = \frac{1644e^{-6}}{82} = 20$ [uF]

X_c [p.u]	X_L [p.u]	COST 함수[p.u]
80	0.1072	0.44420
81	0.1085	0.44395
82	0.1099	0.44393
83	0.1112	0.44397
84	0.1126	0.44408

- V_{dc} 전압 선정 : $220 \times 2.09 = 460$ [V]
- 커패시터 전류제한 이득산정

$$K_d = \sqrt{2.5 \frac{470}{20} - 0.05^2} = 7.6$$

5. 시뮬레이션 결과

3절에서 설계된 값들을 적용하여 ACSL로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4와 5는 필터 출력 커패시터 전압과 THD 파형을 보여주고 그림 6과 7은 커패시터 전류 제한이 없을 경우와 있을 경우의 커패시터 전압과 부하전류 파형을 보여준다. 모든 값들은 설계된 이론치와 일치함을 알 수 있다. 또한 THD가 5% 이하임을 볼 수 있다.

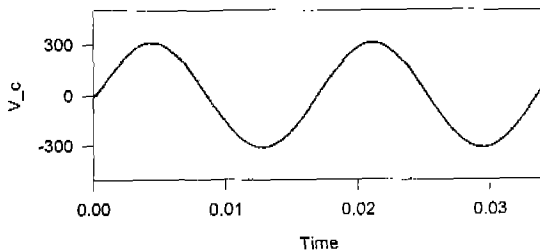


그림 4 LC필터의 출력커패시터 전압파형

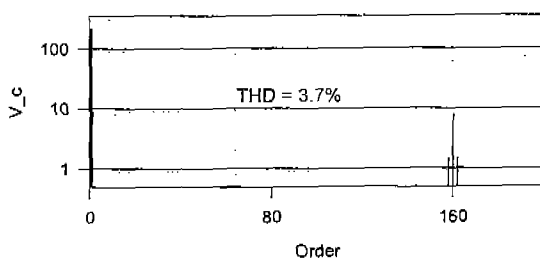


그림 5 LC필터의 커패시터 출력전압 THD분석 파형

6. 결 론

본 논문에서는 Cost 함수를 도입하여 CVCF와 VSI 시스템의 출력필터의 최적설계를 시도하였다. 커패시터 전류의 제한제어기를 구성하여 필터의 제동비를 가변할 수 있도록 하여 플랜트의 안정화를 향상시켜서 공진현상이 최대로 억제되고 시스템의 용량이 가변시에 같은 제어기의 이득을 사용할 수 있도록 하였다.

참고문헌

- [1] S. B. Dewan and P. D. Ziogas, "Optimum Filter Design for a Single-Phase Solid-State UPS System", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-15 no. 6, pp. 664-669, 1979.
- [2] S. B. Dewan, "Optimum Input and Output Filters for a Single Phase Rectifier Power Supply", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21 no. 3, pp. 282-288, 1981.
- [3] R. M. Hilloowala, et. al., "Selection and design of inverter output filters for UPS system" *INT. J. ELECTRONICS.*, vol. 91, no. 3, pp 371-385, 1986.
- [4] D. W. HART, *Introduction to Power Electronics*, Prentice Hall, pp. 312-317, 1997.
- [5] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method," *14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, pp. 199-210, 1998.

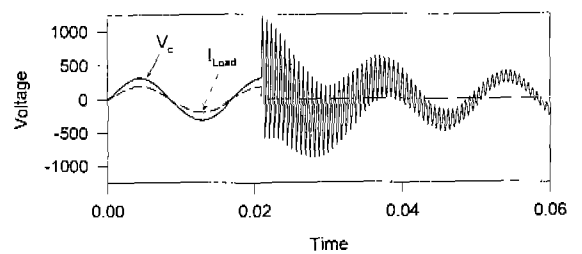


그림 6 전류제한 없는 경우 커패시터 전압, 부하전류 파형 (부하 100%→0%로 변동시)

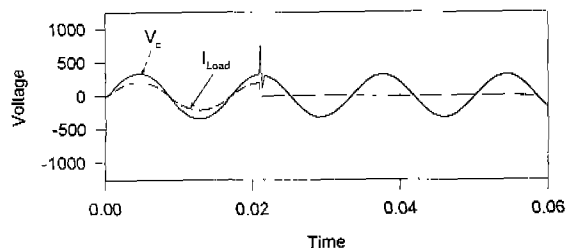


그림 7 전류제한을 사용하였을 경우 커패시터 전압, 부하전류 파형 (부하 100%→0%로 변동시)