

전압형 인버터의 출력전압 상승률 억제를 위한 출력 필터의 설계

김성준^o, 설승기
서울대학교 공과대학 전기공학부

Output Filter Design for Suppression of High Voltage Gradient in the Voltage-Fed PWM Inverter

Sung-Jun Kim^o, Seung-Ki Sul
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - This paper proposes a new filter topology that suppresses the high voltage gradient(dv/dt) in ac motor terminals. The high voltage gradient(dv/dt) causes over voltages on the motor windings, the degradation of motor insulation, and the bearing failure. Moreover surge voltage with high voltage gradient(dv/dt) in the PWM inverter fed drive system where long line cables are required causes more serious problem to the motor. Thus, the most advisable method is attaching output filter to the inverter output terminals. The conventional output filters have several problems such as bulky size, difficulty of parameter tuning. The proposed filter can be relatively smaller than the conventional filters. By the proposed filter, the shaping of PWM waveform can considerably suppress high dv/dt in motor feeding cable from the inverter. The effectiveness of the proposed filter is compared with that of the conventional one and is verified by the computer simulation.

I. 서론

최근의 전력전자분야에서의 주목할 만한 하나의 경향은 반도체 기술에 힘입어 스위칭 주파수가 점차로 증가하고 있다는 것이다. 그러나 스위칭 주파수의 증가와 더불어 스위칭 소자의 턴 온이나 오프시, 순간적으로 발생하는 높은 전압 스파이크 또한 더욱더 증가하여 교류전동기구동시스템에 심각한 문제를 발생시키게 되었다. 높은 전압 상승률은 교류전동기에서의 과전압을 초래하여 전동기의 절연 파괴나 베어링의 파괴 등을 유발한다[1-2].

많은 산업 현장의 적용에서 인버터와 교류전동기는 상당히 분리되어 있으므로, 수 미터에서 수백 미터까지 달하는 긴 선로의 연결이 요구된다. 그러므로 교류전동기와 이를 구동

하는 인버터사이의 긴 선로로 인해 전압 상승률(dv/dt)은 더욱 커지게 되어 교류전동기의 치명적인 문제를 유발시킬 수 있다[2-6]. 선로 내의 단위길이당의 누설 인덕턴스와 상호 커패시턴스는 고주파 노이즈를 유발시키는 원인이 되므로, 케이블 선로길이가 증가함에 따라 고주파 노이즈는 심해진다 [4-6]. 더욱이 긴선로의 적용시, 전압 상승률은 전동기 입력 전류 파형을 왜곡시켜서 교류전동기제어에 영향을 끼친다.

최근에 NEMA(National Electrical Manufacturers Association)와 IEC(International Electromechanical Commission)는 480[V]급 범용 전동기에 대해 전압 상승률을 500[V/μs] 까지 제한하기로 합의했다. 이러한 전압 상승률을 억제하기 위한 많은 시도가 있어 왔지만, 그 해결책을 찾기는 매우 어렵다. 일반적으로 그 해결책의 두가지 범주는 소프트스위칭과 하드스위칭으로 분류할 수 있는데, 본 논문에서는 하드 스위칭을 이용하여 교류전동기 구동 시스템에서의 전압 상승률을 억제할 수 있는 새로운 출력 필터회로를 제시한다.

II. 필터설계의 관점

전압형 인버터를 구동시킬 때, 전압상승률의 억제를 위한 일반적인 방법은 인버터 출력단에 그림 1과 같은 필터를 부착하는 것이다[5,8]. 출력 필터는 전송 선로에 의한 고주파 노이즈의 제거에 필수적이다. 또한, 출력 필터는 전동기의 권선에서의 표피 효과에 따른 손실과 철손에서의 와류손을 상당히 감소시킬 수 있다[5].

지금까지 출력필터는 다음의 두가지 목적에 의해 설계되어 왔다. 첫번째는 전압 구동용 인버터에서 발생하는 구형파를 정현파에 가까운 전압으로 만드는 것이다. 인버터 출력으로부터 필터를 거처나온 정현적인 전압의 사용은 고정자와

회전자의 급격한 진위차에 따른 손실을 제거한다[5]. 다른 하나는 소음이나 전자파와 같은 노이즈를 제거하기 위해서이다. 그러나 이러한 목적에 부합되는 필터의 설계는 여러 가지 문제점을 가진다. 하나는 일정한 주파수의 출력에서조차 단순한 필터로서는 설계 명세를 맞추기가 매우 힘들다는 것이다. 따라서 위의 필터에 의해 설계 명세를 맞추기 위해서는 필터의 상수 조정의 어려움이 뒤따른다. 다른 하나는 앞의 목적(정현적인 출력전압의 사용)에 따라 필터를 설계하게 되어, 필터의 크기와 부피가 상당히 커지게 되므로 비용의 증가도 발생하게 된다. 또한 필터의 용량이 커질수록 보다 큰 전력의 손실을 초래하게 되며, 필터된 전압의 위상 지연에 의해 속도나 토크와 같은 전동기의 성능에도 나쁜 영향을 미치게 된다.

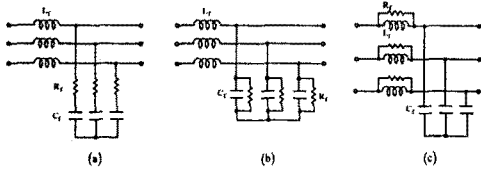


그림 1 상용적인 필터

III. 클램핑 필터의 구성

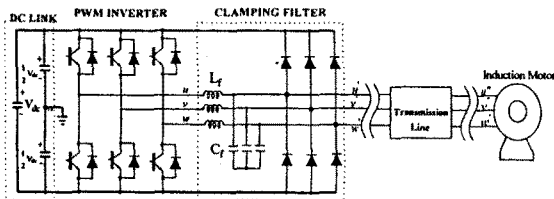
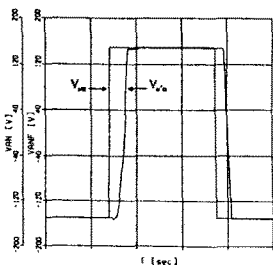


그림 2 제안된 클램핑 필터를 가진 교류전동기 구동 시스템

A. 동작 원리

그림 2는 인덕턴스 L_f 와 커패시턴스 C_f 그리고 6 개의 빠른 역회복 특성을 가진 다이오드로 구성된 클램핑 필터를 나타낸다. 인버터의 폴전압(pole voltage : V_{in}, V_{vn}, V_{vm})은 L-C 회로를 지나면서 L-C 공진에 의해 원래의 전압보다 더 커지려고 한다. 그러나 그 통과된 폴전압은 $+V_{dc}/2$ 보다 커지거나, 또 $-V_{dc}/2$ 보다 작아지지 않는다. 왜냐하면 직류링크와 연결된 다이오드가 그 순간에 도통하기 때문이며, 그때의 다이오드 전류는 인버터의 전원으로 희생하게 된다.



Time : 20 [μsec]

그림 3 인버터의 폴전압(V_{vm}) 클램핑 필터의 출력

그림 3에서는 인버터의 폴 전압 V_{in} 과 클램프된 전압 V_{vn} 을 나타내고 있다. 클램프된 폴전압은 작은 기울기를 가지고 있으며, 그 기울기의 상승 시간과 하강 시간은 수 마이크로 초 (micro second)이며 이것은 L-C 공진에 의해 정해진다. 따라서 이러한 공진 시의 상승과 하강 시간은 비교적 작은 L 과 C 로써 결정될 수 있다.

B. 제안된 필터의 특성

급격한 기울기를 가진 구형파 전압(the steep fronted voltage) 이 전동기에 인가될 때 야기되는 전동기의 파손이 보고되고 있다[1]. 일반적으로 이러한 구형파 전압은 전송선로를 통과할 때 높은 서지 전압을 발생시킨다. 제안된 클램핑 필터는 PWM 에 의해 발생하는 구형파 전압을 작은 기울기를 가지는 전압으로 만드는 것이다. 따라서 제안된 회로의 필터링에 의해 급격한 기울기의 전압에 의해 발생하는 전동기의 서지전압을 상당히 감소시킬 수 있다.

또한 제안된 클램핑 필터에서의 필터 상수는 상용 필터를 사용했을 때보다 훨씬 작아질 수 있다. 22[kW]의 유도전동기에서의 적용 시, 위의 두 회로(제안된 필터, 상용적인 필터)의 필터 상수의 적용 예가 표 1에서 보이고 있다. 그림 1에서 저항 R_f 는 실제 전력을 소모하며, L-C 공진 전압을 감소시키기 위해 사용했으나 제안된 필터는 저항소자를 사용하지 않는다. L-C 공진 전압은 고속역회복 특성의 다이오드에 의해 직류 링크와 같은 전압의 크기로 클램핑되며, 다이오드의 전류는 직류 링크를 통해 전원으로 희생하므로 그림 1에서의 R_f 와 같은 감소 작용을 한다.

IV. 시뮬레이션 결과

긴 선로를 가진 인버터구동시 전동기 단자에서의 전압 상승률의 영향을 정확히 분석하기 위해 시뮬레이션 S/W ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)을 이용하였다. 전동기와 연결된 긴 선로 케이블은 전송선로서 취급할 수 있으며, 그림 4에서와 같이 3차의 L-R-C 회로망으로 모델링하였다. 모델링한 선로케이블의 길이는 100[m]이고, 케이블의 상수값은 표 2에 제시되어 있다.

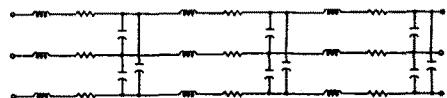
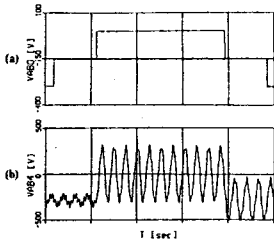


그림 4 선로 케이블의 모델링

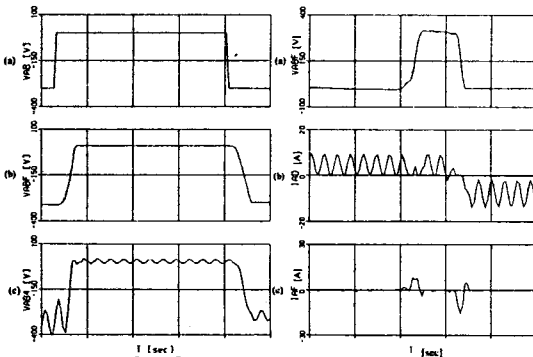


Time : 25 [μ sec]

그림 5 긴 선로 케이블을 가진 PWM 인버터의 선간전압 : 필터의 사용 없음
(a) 인버터 출력의 선간전압
(b) 전동기 출력에서의 선간전압

로 긴 선로를 가진 교류전동기 시스템에는 전동기 입력의 전압 상승률의 허용치를 만족시키기 위해 출력필터를 부착하여야 한다.

클램핑필터의 출력에서의 선간전압과 긴 케이블 선로를 통해서 나온 전동기 입력단에서의 선간전압이 그림 6의 (a), (c)에서 각각 보이고 있다. 그림 7은 제안된 필터에서의 다이오드 전류와 커패시터 전류를 나타내고 있다. 이때의 다이오드 전류는 -10A~10A 정도이며, 이 전류는 직류 링크로 회생된다. 비록 제안된 필터에서의 다이오드 도통손실은 존재하지만, 기존의 필터 내의 저항에 의한 손실보다는 비교적 작다.



Time : 20 [μ sec]

그림 6 긴 선로 케이블을 가진 PWM 인버터의 선간전압 : 제안된 필터(그림 2)의 적용
(a) 인버터 출력의 선간전압 (v_{uv})
(b) 상용필터의 출력선간전압 (v_{uv})
(c) 전동기 출력선간전압 (v_{uv})

Time : 20 [μ sec]

그림 7 긴 선로 케이블을 가진 PWM 인버터의 선간전압, 다이오드 전류 : 제안된 필터의 적용
(a) 클램프필터의 선간전압 v_{uv}
(b) 클램프필터의 다이오드 전류
(c) 클램프필터의 커패시터 전류

V. 결론

본 논문에서는 긴 선로가 요구되는 교류전동기 구동시스템에서의 전동기 입력단의 높은 전압 상승률을 억제할 수 있는 새로운 출력필터를 제안하였다.

기존의 출력필터의 여러가지 문제점을 분석하였고, 제안

된 필터의 특성을 기술하였다. 제안된 출력필터는 전동기 입력단에서의 높은 전압상승률을 상당히 억제할 수 있고, 상용의 필터에 비해 충분히 작아질 수 있다. 전동기 구동시 전송선로에 따른 전압상승률의 영향을 정확히 분석하기 위해 적절한 컴퓨터 모델이 개발되었고, 시뮬레이션을 통해 제안된 출력필터의 타당성을 입증하였다.

참고문헌

- [1] P. A Zotos, "Motor Failures due to Steep Fronted Switching Surge : The Need for Surge Protection- User's Experience," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 30, no.6, Nov./Dec. pp.1514-1524, 1994.
- [2] E. Persson, "Transient Effects in application of PWM Inverters to Induction Motors," *IEEE Trans.on Industry Applications*, vol. 28, no.5, pp.1095-1101, 1992.
- [4] H. Hemphill and Thomas Wiesman, "The Influence of Motor Cable Parameters on Conducted EMI and Motor Reliability", *PCIM*, 1993, October, pp.92-101, 1993.
- [5] H. Süsse, "Filtering Noisy Frequency Inverters," *PCIM, Europe*, pp.120-124, May/June 1995.
- [6] A. von Jouanne, P. Enjeti and W. Gray, "The Effect of Long Motor Leads on PWM Inverter fed AC Motor Drive System," *APEC in Proceedings*, pp.592-597, 1995.
- [7] Siemens, *Electrical Engineering Handbook*, John Wiley and Sons, New York, pp.374-525, 1990.
- [8] B. Mokrytzki, "Filters for adjustable frequency drives," *APEC in Proceedings*, pp.542-548, 1994.

APPENDIX

표 1. 시뮬레이션 조건(ACSL)

직류링크전압	300 [V]	
스위칭 주파수	5 [kHz]	
필터 상수 (filter parameters)	상용필터 (그림 1(a)의 경우) $R_f = 25 [\Omega]$ $C_f = 0.24 [\mu F]$ $L_f = 490 [\mu H]$	제안된 필터 $C_f = 0.24 [\mu F]$ $L_f = 80 [\mu H]$
케이블 길이	100 [m]	
유도전동기 4극, 22[kW], 220[V]	$R_s = 0.042 [\Omega]$ $R_r = 0.024 [\Omega]$ $L_s = 13.65 [mH]$ $L_m = 13.28 [mH]$ $L_r = 13.95 [mH]$	

표2. 케이블 상수 [7]

저항(copper)	0.728 (at 25°C)
인덕턴스 [mH / km]	0.294
커패시턴스 [μF / km]	도체 상호간 : 0.46 도체와 전선의 외장간 : 0.81