

H-Bridge 7-레벨 인버터 구동시 고압 유도전동기에서 발생하는 과도전압 저감을 위한 필터기술

(Filtering Techniques to Reduce the Transient Voltage of High Voltage Induction Motor on
H-bridge cascaded 7-level Inverte)

권영목* · 김재철 · 김용성 · 이양진
(숭실대학교)

(Young-Mok Kwon* · Jae-Chul Kim · Young-Sung Kim · Yang-Jin · Lee)
(Soong-Sil University)

Abstract

In this paper, we investigate a filtering technique to reduce the adverse effect of long motor leads on H-bridge cascaded 7-level inverter fed ac motor drive. The switching surge voltage becomes the major cause to occur the insulation failure by serious voltage stress in the stator winding of high voltage induction motor. However, the effect of switching surge appears more serious in high voltage induction motor than low voltage induction motor. Consequently, we demonstrated that the filter connected to the motor terminals greatly reduces the transient voltage stress and ringing, moreover we show lowers the dv/dt of the inverter switching pulse. The results of simulation show the suppression of dv/dt and the reduced peak voltage at the motor end of a long cable.

1. 서론

전력전자 스위칭 소자의 개발은 높은 주파수의 스위칭 동작을 가능하게 하였고, PWM 인버터의 발전으로 자체 손실 저감은 물론 유도전동기의 원활한 속도제어로 에너지를 효율적으로 사용할 수 있게 되었다.

중소형 유도전동기의 가변속 제어장치는 IGBT를 채용한 PWM 전압형 인버터를 주로 채용하고 있다.

일반적으로 정현파를 공급받는 유도전동기의 권선은 전압이 균등하게 분포되어 있다. 하지만 인버터로 제어되는 전동기의 경우 빠른 스위칭 동작의 소자를 채용한 인버터의 출력측에서 발생한 급준도의 펄스파형이 전동기 단자에 그대로 전달될 경우 유도전동기 권선에 나타나는 전압분포는 정현파를 공급받는 유도전동기와 달리 불균형하게 분포되어진다. 처음 몇몇 턴에 전체 전압의 50% 이상이 걸리는 현상이 나타난다. 이 전압스트레스에 의한 권선 절연고장이 발생할 수 있다[1].

이 인버터 스위칭 켜지로 인해서 발생하는 과도전압은 케이블의 길이와 스위칭 켜지의 상승시간에 영향을 받는다. 스위칭 켜지의 상승시간이 짧을수록 인버터 스위칭 켜지로 인한 과도전압은 상승한다.[4]

이러한 인버터 스위칭 켜지로 인해 발생하는 과도전압은 반복적으로 발생하기 때문에 전동기 절연에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 전동기 설계시 인버터 스위칭

켜지로 인한 과도전압을 감안하여 설계하여야 하는데 이때 중간에서 인버터와 전동기를 연결하는 전력 케이블에 의한 영향도 고려되어야 한다. 전력 케이블의 위치에 대해서는 큰 영향을 받지 않는 것으로 연구되었다.[1]

과도전압의 크기는 사용하는 인버터의 스위칭 소자의 종류와 운전 및 설치조건에 따라 부하측 단자에 다르게 나타날 수 있기 때문에 정확한 해석과 측정을 통해 영향을 최소화하여 권선의 절연수명을 높이는 것이 시스템의 신뢰도 증진을 위해 매우 중요하다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 과도전압을 감소시키기 위한 방안으로 H-bridge cascaded 7-level 인버터로 구동되는 고압 유도전동기에서 필터 설치시 케이블에 대한 영향을 분석하여 필터 적용방법을 제시하였다

2. 가변속 구동장치의 모델링

본 논문에서는 유도전동기 가변속 구동장치에 필터 설치시 과도전압의 대한 특성을 분석하고자 시스템 등가 모델을 인버터, 케이블 그리고 전동기 시스템을 그림 1과 같이 구성 하였다.[4]

필터는 1과 2의 위치 즉 인버터 출력단과 전동기 단자에 적용하였다.

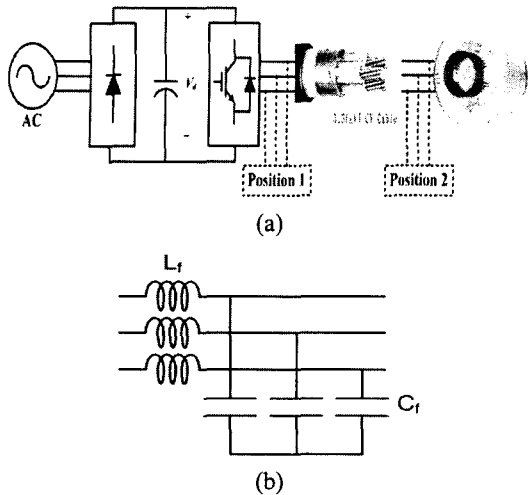


그림 1. (a) 시스템 모델 (b) 필터 구성
Figure 1. (a) System model (b) LC filter configuration

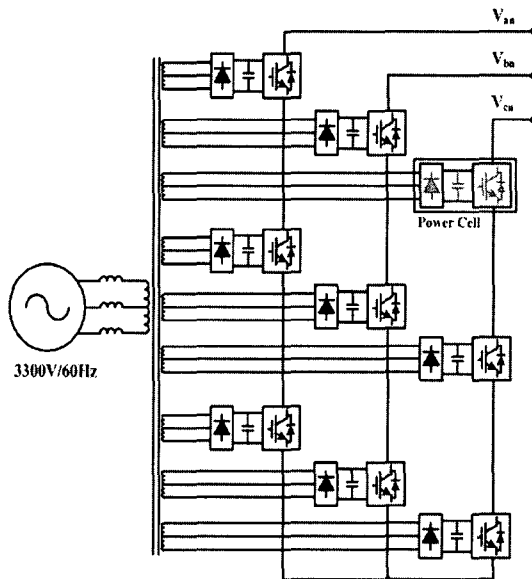


그림 2 H-bridge cascaded 7-level 인버터
Figure 2. H-bridge cascaded 7-level inverter

2.1 인버터 모델링

인버터는 H-Bridge Cascaded 7-level inverter로 모델링 하였다. 그림 2는 H-Bridge Cascaded 7-Level 인버터 구성도 이다. 이 인버터는 기존의 IGBT(1200[V]~1700[V]급)와 모듈을 그대로 사용하여 인버터를 고압화 할 수 있으며, power stack 제작 및 제어측면에 있어서도 다른 Topology에 비해 상대적으로 간단하다는 장점이 있다.

2.2 케이블 모델링

ATPDraw의 LCC(Line/Cable Constants) 프로그램을 이용하여 케이블의 기하학적 구조와 물리적인 데이터를 기반으로 지정된 주파수에 대해 케이블 파라미터를 산출하여 적용하였다.[5]

2.3 고전압 전동기의 모델링

EMTP에 있는 유도기, 동기기, 직류기 등 12종류의 회전기를 모델링 할 수 있는 UM(Universal Machine) Model을 이용하여 유도전동기를 모델링 하였다.[5]

이 UM Model은 전기적인 회로는 d-q-0축으로 표현하고 기계적인 요소는 전기회로로 유사화 하여 표현한다. 본 논문에서 사용될 유도전동기의 사양은 표 2에 제시하였다.

표 2. 고압 유도전동기 사양
Table 1. Parameter of high voltage induction motor

Rating	1500[kW], 3300[V], 6P, 60[Hz] Y-connected, squirrel cage	
Parameter	Stator resistance	0.341368[Ω]
	Rotor resistance	0.112588[Ω]
	Stator leakage Inductance	0.001543[H]
	Rotor leakage Inductance	0.001543[H]
	Mutual Inductance	0.029871[H]
Monet of Inertia	78.5[kg · m ²]	

3. 시뮬레이션

3.1 전압특성 비교

고압 유도전동기에 공급되는 전압이 3-level 인버터의 경우 그림 3의 PWM 3-level 인버터 선간전압과 같이 dv/dt가 크다.[3] 이 전압이 케이블을 통하여 전동기에 공급되면 유도전동기 단자에서 임피던스 부정합에 의한 과도 과전압이 발생한다. 이 과도 과전압을 억제하기 위하여 인버터는 구조적으로 개선되었다. 이러한 구조 개선중의 하나로 인버터의 멀티레벨화이다. 본 논문에서는 H-Bridge Cascaded 7-level 인버터를 적용하였다.

그림 4의 필터 적용 전 전동기 단자 선간 전압파형과 같이 H-bridge cascade 7-level 인버터는 좀더 다단 계로 전압이 상승시켜 dv/dt가 개선하였다.

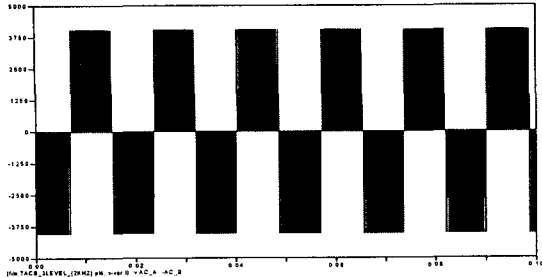


그림 3 PWM 3-level 인버터의 선간전압
Figure 3. Line-to-line voltage of PWM 3-level inverter

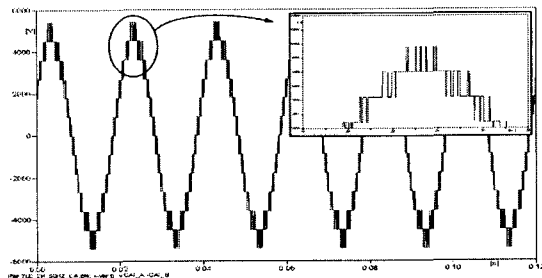


그림 4 H-bridge cascaded 7-level 인버터의 선간전압
Figure 4. Line-to-line voltage of H-bridge cascaded 7-level inverter

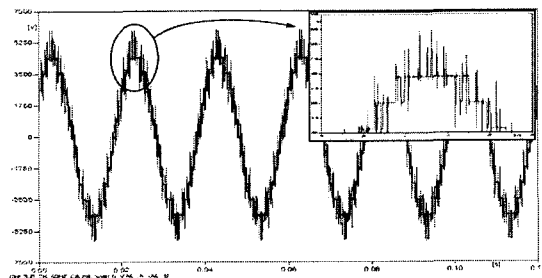


그림 5. 필터설치 전 경우 전동기 단자의 선간전압
Figure 5. Line to line voltage of motor terminal without filter

H-bridge cascade 7-level인버터를 적용하면 저압 전동기의 경우 과도 과전압이 충분히 개선되어 전동기 절연사고 원인을 제거 할 수 있다. 그렇지만, 고압에서는 전압의 크기로 인하여 dv/dt 가 높게 된다. 이러한 저압 보다 높은 dv/dt 의 전압이 인버터와 전동기 사이의 전력케이블을 통과하게 되면 그림 5.에서처럼 과도 과전압이 나타남을 볼 수 있다. 따라서 고압에서는 dv/dt 가 매우 높기 때문에 추가적인 대책을 세워야 한다.

3.2 필터 적용

인버터에서 공급되는 전원은 dv/dt 가 큰 과도과전압

으로 인하여 전동기 절연 사고에 원인이 된다. 이를 방지하기 위한 방법 중 하나인 필터를 사용하였다. 필터는 LC필터를 적용 하였다.

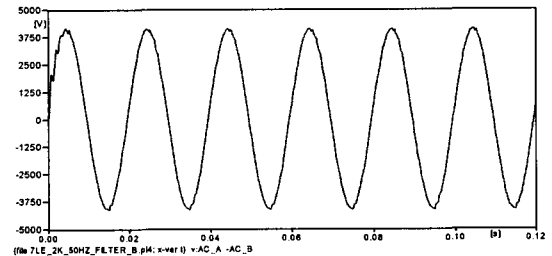


그림 6. 필터를 설치 후 전동기 단자의 선간전압
Figure 6. Line-to-line voltage of motor terminal with filter

그림 6.는 필터를 적용한 후 전동기 단자에서 나타나는 선간 전압 파형이다. 전압의 파형에서 과도 과전압이 없어졌음을 볼 수 있다. H-bridge cascade 7-level 인버터에 필터를 적용하여 전동기단자에 나타나는 과도 과전압의 원인이 되는 높은 dv/dt 를 개선하는 효과를 얻을 수 있었다.

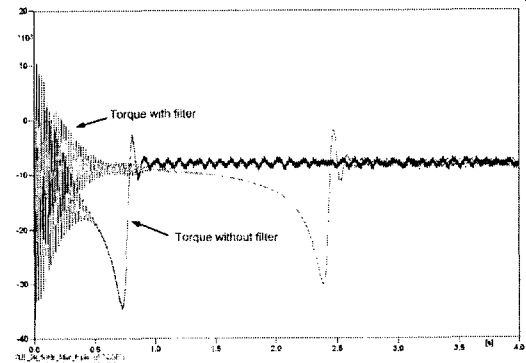


그림 7. 고압 유도전동기 토크 비교
Figure 7. torque of high voltage induction motor comparison

그림 7.에서 필터를 설치하였을 경우 전동기의 토크가 필터를 설치하지 않았을 경우 보다 안정되는 속도가 늦음을 볼 수 있다. 이는 필터의 적용으로 인하여 고압 유도전동기의 기동시간이 좀더 길어졌음을 알 수 있다. 따라서 필터의 적용은 전압의 파형을 개선시켰지만 전동기 기동특성에 영향 주는 것을 알 수 있다.

3.3 필터 위치에 따른 스위칭 서지 분석

인버터 출력측이나 전동기 단자측에 필터를 적용시 나타나는 스위칭 서지의 특성을 분석하기 위해 인버터

의 급준파형을 단위계단 함수로 모의하여 필터를 적용하여 보았다.

필터 설치전 케이블과 전동기의 특성 임피던스 부정함으로 인하여 전동기 단자에서는 그림 8.과 같은 파형을 볼 수 있다.

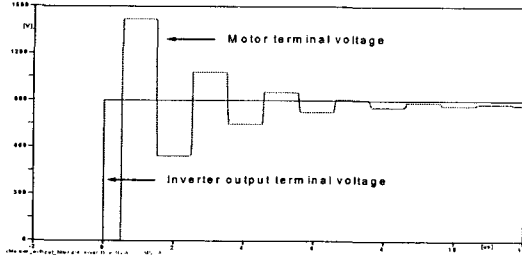


그림 8. 필터 설치 전 인버터 출력 전압과 전동기 단자 전압

Figure 8. Inverter output voltage and the motor terminal voltage without filter

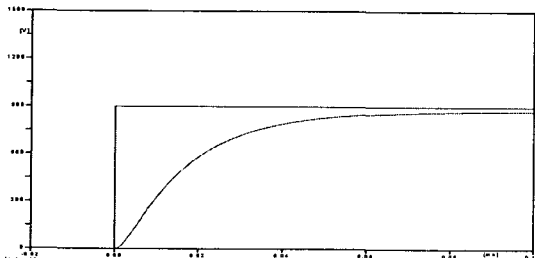


그림 9. 인버터 출력단 필터 설치 후 전동기 단자전압

Figure 9. Motor terminal voltage with filter installed inverter output terminal.

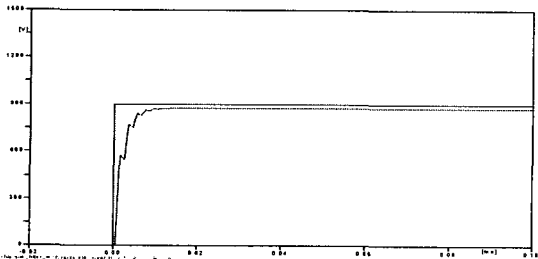


그림 10. 전동기 단자 필터 설치 후 전동기 단자 전압

Figure 10. Motor terminal voltage with filter installed motor terminal

그림 9.는 필터를 인버터 출력단에 적용한 파형으로 과 상승시간이 완만함을 볼 수 있다.

그렇지만 그림 10.과 같이 전동기 단자측에 필터를 적용한 파형을 보면 파의 상승시간이 인버터 출력측에 필터를 적용한 때 보다 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 필터는 전동기 단자측 보다 인버터 출력측에 설치하는 것이 높은 dv/dt의 과도 과전압을 개선할

수 있는 효과를 얻을 수 있다.

4. 결론

유도전동기 제어를 위한 구동용 시스템은 인버터 스위칭 서지에 대한 대책의 하나로 H-bridge cascaded 7-level인버터를 사용하였다. 이는 인버터 구조 개선으로 전동기 절연사고를 방지하기 위함이다. 그렇지만 고압 대용량 전동기는 전압의 특성상 구조적 개선만으로 충분한 효과를 얻지 못한다. 따라서 추가적인 개선책이 필요로 한다. 본 논문에서는 그 개선책으로 LC필터를 선택 하였다.

필터를 인버터 구동 고압유도전동기 회로에 적용시 전압파형의 개선은 뚜렷하게 나타났다. 하지만 필터의 영향으로 전동기의 기동시간이 길어짐을 볼 수 있었다.

또한 필터를 인버터와 전동기 사이에 설치할 때 인버터 출력측과 전동기 단자측 두 곳에 설치가 가능하다.

필터를 인버터 출력측 단자에 적용할 경우 dv/dt가 개선되어 스위칭 서지에 대한 대책으로 충분히 역할을 하였다. 그러나 전동기 단자측에 적용할 경우 필터가 역할을 제대로 하지 못 함을 볼 수 있었다.

결론적으로 인버터의 스위칭 서지에 대한 영향을 감소시키기 위해서 사용되는 필터는 전동기 단자 보다 인버터 출력측 단자에 설치하고 전동기의 기동특성을 고려하여야 한다.

감사의 글

본 논문은 에너지 관리공단의 연구비 지원으로 진행 되었습니다.

참고 문헌

- [1] Seung-Yeop Song, Jae-Chul Kim, Joong-Eun Shin, Young-Mok Kwon, Jin-Hee Lee, "The Analysis for Transient Effects of Large Induction Motor Fed by Inverter" 2004ICEE Vol.1 pp.510~515, 2004
- [2] von Jouanne, A.; Rendusra, D.A.; Enjeti, P.N.; Gray, J.W. "Filtering techniqueto minimize the effect of long motor leads on PWM inverter-fed AC motor drive systems" IEEE Transactions on Industry Application, Vol.32, No.4, July-Aug, 1996
- [3] Wang Yi, Li Heming, Shi Xinchunm Zhu Ling, "Harmonic analysis and filter design for medium -voltage multilevel PWM inverters" PEDS 2003, Vol.1 pp. 531-535, 17-20 Nov. 2003
- [4] Jong-Gyeum Kim, Jong-Ho Jeong, Eun-Woong Lee, "A measurementof Switching Surge Voltage Using Inverter devices", KIEE Trans. Vol.53P, No.1, pp.14-21, MAR. 2004
- [5] ATP Rule Book, ATP solford Version of EMTP. Vol 1, 2, Leuven EMTP Center, 1987