

# 멀티레벨 인버터 구동 고압유도전동기에서 발생하는 과도과전압 저감을 위한 RC필터의 효과분석

(Analysis on the effect of RC filter to mitigate transient overvoltage on the high voltage induction motor fed by Multi level inverter)

권영목\* · 김재철 · 김용성 · 이양진

(송실대학교)

(Young-Mok Kwon\* · Jae-Chul Kim · Young-Sung Kim · Yang-Jin · Lee)

(Soong-Sil University)

## Abstract

In this paper, we analyze on the effect of RC filter to mitigate transient overvoltage on the high voltage induction motor fed by H-bridge cascaded 7-level inverter. 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. The effect of switching surge appears more serious in high voltage induction motor than low voltage induction motor. Consequently, we demonstrated that the RC filter connected to the motor terminals greatly reduces the transient voltage stress and ringing. The results of simulation show the suppression of transient overvoltage at the motor end of a long cable. using EMTP

## 1. 서 론

전력용 반도체가 발전되면서 스위칭 속도의 향상을 가져오게 되었고, 이는 전동기 구동장치 기술의 발전으로 이어졌다. 이러한 전동기 구동장치의 발전은 유도전동기의 제어성능과 효율을 향상시켰지만 부수적으로 전동기 구동장치 스위칭 서지에 의한 과도과전압이 발생하는 문제점이 나타났다.[1][2]

전동기 입력단자에 나타나는 과도과전압은 높은  $dv/dt$ 의 인버터 출력전압과 전동기와 케이블간의 임피던스 부정합에 의해 발생한다. 이러한 과도과전압은 전동기 입력 단자 쪽 전동기 고정자 권선에 집중적으로 발생하고, 스위칭 속도가 빠를수록 또는 케이블 길이가 길어질수록 크게 발생한다. 스위칭이 매우 빠르게 주기적으로 반복되기 때문에 전동기권선 절연에 심각한 문제를 초래하여, 전동기 권선열화에 의한 고장이 발생하게 된다.[3][4]

이 문제를 해결하기 위하여 인버터로 구동하는 유도전동기에서 과도과전압에 의한 유도전동기 권선 사고에 대한 연구로는 대부분이 저압 유도전동기에 대해서 이루어 졌으며, 이를 예방하기 위한 과도과전압 저감 필터 설계도 저압에서 연구가 수행되었다. [5][6][7]

그렇지만, 산업의 발달과 가변속 구동시스템 제어기술의 발전으로 산업용 유도전동기는 소용량에서 대용량

으로 용량이 늘어나고 저압에서 고압으로 사용전압이 높아졌다. 이는 저압에서 효과적으로 과도과전압을 저감시키던 방법들이 고압에서는 미흡한 결과를 가져왔다. 고압 대용량이라는 환경의 변화로 인하여 발생하는 과도과전압은 더욱더 높아지고, 기본적인 전압이 매우 높아졌기 때문에 저압에서 사용하는 방법들을 적용하면 저감효과가 떨어져 고압 유도전동기 입력단자에는 과도과전압이 높게 나타나는 문제가 발생한다.

따라서 본 논문은 저압 소용량 유도전동기와 다른 환경의 고압 대용량 유도전동기에 적용 가능하도록 과도과전압 저감용 RC필터를 EMTP를 이용하여 모델링 하였으며, H-Bridge cascaded 7-level 인버터로 구동하는 3.3[kV]고압 유도전동기 시스템을 모델로 시뮬레이션과 전압파형의 변화를 통하여 RC필터의 과도과전압 저감 효과를 분석하였다.

## 2. 고압 유도전동기 구동시스템

본 논문에서는 가변속 구동장치로 운전하는 3.3[kV] 고압 유도전동기에 RC필터 설치 시 고압 유도전동기 단자에서 발생하는 과도과전압 저감효과를 분석 하였다. 이를 위하여 시스템 등가 모델을 H-bridge cascaded 7-level 인버터, 3.3[kV] CV 케이블 100[m] 그리고 3.3[kV] 1.5[MVA] 고압 유도전동기를 EMTP를 이용하

여 모델링 하였으며, RC 필터를 그림 1과 같이 전동기 입력단자에 적용하였다.

그림 1은 고압 유도전동기 구동을 위한 전체적인 시스템 모델이다.

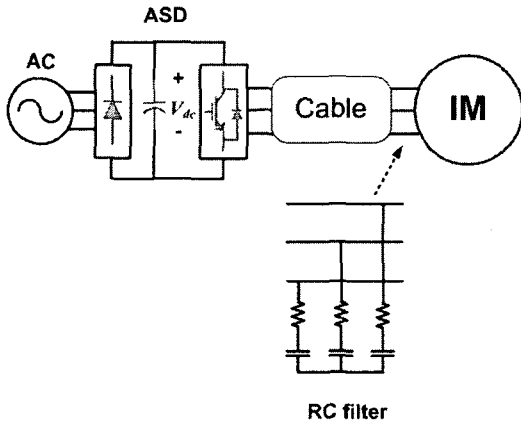


그림 1. 시스템 모델  
Fig 1. System Model

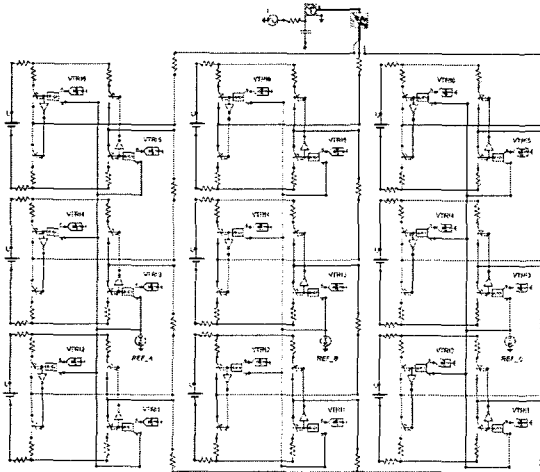


그림 2. EMTP ATPDraw를 이용한 H-bridge cascaded 7-level 인버터 모델  
Fig 2. H-bridge cascaded 7-level inverter model using EMTP ATPDraw

## 2.1 인버터 모델링

인버터는 H-Bridge Cascaded 7-level inverter로 모델링 하였다. 그림 2는 H-Bridge Cascaded 7-Level 인버터를 EMTP의 ATPDraw를 이용하여 모델링 한 것이다. 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 3.3[kV] CV 케이블 모델링

ATPDraw의 LCC(Line/Cable Constants) 프로그램을 이용하여 케이블의 기하학적 구조와 물리적인 데이터를 기반으로 지정된 주파수에 대해 케이블 파라미터를 산출하여 적용하였다. 표 1은 LCC 프로그램을 이용하여 계산되어진 3.3[kV] CV 케이블의 데이터이다.

표 1. LCC 프로그램에 의한 케이블 데이터  
Table 1. Cable data by LCC program

Velocity (m/μs)	Impedance (Ohm/m)		Admittance (S/m)		Charact. imp (Ohm)		Charact. Admit. (S)	
	Real	Imag.	Real	Imag	Real	Imag.	Real	Imag.
68.36	9.4E-5	2.2E-5	0	3.5E-7	12.9	-10.23	4.7E-2	3.7E-2

## 2.3 3.3[kV]고압 전동기의 모델링

EMTP에 있는 유도기, 동기기, 직류기 등 12종류의 회전을 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 2. 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 <sup>2</sup> ]	

## 2.4 RC 필터 모델링

RC 필터는 과도과전압 발생원인인 케이블과 유도전동기의 특성임피던스 부정합을 제거하여 유도 전동기 단자에서 발생하는 반사전압을 줄이는 필터로서 전동기

입력단자에 적용한다.

그림 3은 RC필터의 구성도이다.

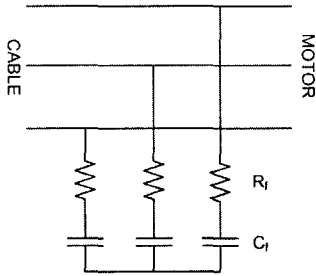


그림 3. RC 필터의 구성도  
Fig 3. Configuration of RC filter

RC 필터는 임피던스 매칭을 이용하여 전동기 단자에서 발생하는 반사파를 줄이기 위한 필터로 전동기 단자에서 발생하는 반사전압의 크기를 구하는 식 (1)을 이용하여 필터의 파라미터 값을 선정한다.[5]

$$e^2 = E - E \frac{2Z_0}{(R + Z_0)} e^{-[t/(Z_0 + R)]C} \quad (1)$$

- t : 부하단까지 걸리는 시간
- Z<sub>0</sub> : 케이블 특성임피던스
- R : 필터의 저항
- C : 필터의 정전용량
- E : 인버터의 출력전압

필터의 파라미터 선정의 주 원리는 첫 번째 반사된 전압파형이 제로가 되는 조건을 찾는 것이다. 반사계수에 의한 반사전압의 크기를 구하는 식 (2)에서 필터의 R은 케이블의 특성임피던스 Z<sub>0</sub>와 같다고 가정한다.

$$e^2 = E \frac{R - Z_0}{R + Z_0} \quad (2)$$

그리고 두 번째 입사파가 전동기 단자까지 걸리는 시간은 3t이고, 과도과전압을 5% 이내로 제한하면 식 (1)은 식 (3)으로 쓸 수 있다.

$$e^2 = E - E \frac{2Z_0}{(Z_0 + Z_0)} e^{-[3t/(Z_0 + Z_0)]C} = 0.05E \quad (3)$$

식 (3)을 C에 대하여 정리하면, 식 (4)와 같다.

$$C = - \frac{3(l_c \sqrt{L_c C_c})}{2Z_0 \ln(0.95)} \quad (4)$$

식 (4)를 간단히 정리하면 식 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$C = - \frac{l_c C_c}{0.034195} \quad (5)$$

식 (5)을 이용하여 3.3kV CV 케이블 100[m]에서의 RC필터의 파라미터를 구하면 케이블 특성임피던스(Z<sub>0</sub>)가 16.482[Ω]로 RC필터의 R값으로 주어지면 필터의 C값은 3.3061[μF]이 된다.

케이블 길이에 따른 필터 파라미터는 표 3 케이블 길이에 대한 RC 필터 파라미터에 정리하였다.

표 3. 케이블 길이에 대한 RC필터 파라미터  
Table 3. Parameter of RC filter for length of cable

케이블 길이[m]	10	50	100	200	400
R [Ω]	16.48	16.48	16.48	16.48	16.48
C [μF]	0.033	1.653	3.306	6.612	13.224

### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 RC필터의 과도과전압 저감효과 분석

설계된 RC필터의 과도과전압 저감효과를 분석하기 위해서 EMTP 시뮬레이션 및 전압파형을 통하여 분석하였다.

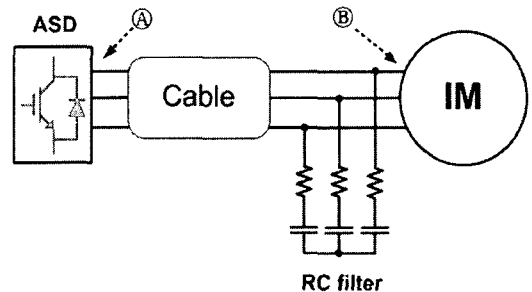


그림 4. 전압의 측정지점  
Fig 4. measure point of voltage

시뮬레이션 조건은 H-Bridge cascaded 7-level 인버터의 스위칭 주파수는 1250[Hz], 케이블은 3.3[kV] CV 케이블 100[m], 전동기의 운전주파수는 50[Hz], RC 필터의 R은 16.482[Ω], C는 3.306[μF]이다. 전압의

측정 지점은 그림 4. 전압의 측정지점에 표시된 인버터 출력 단자인 ㉔지점과 전동기 입력단자인 ㉕지점에서 측정하였다.

그림 5는 H-Bridge cascaded 7-level 인버터 출력단자의 선간전압이다. 최대 선간전압은 5,400[V]이다.

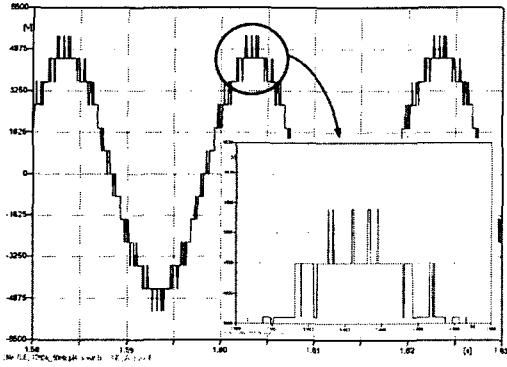


그림 5. H-bridge cascaded 7-level 인버터의 선간전압  
Fig 5. Line-to-line voltage of H-bridge cascaded 7-level inverter

그림 6은 RC 필터 설치 전 고압 유도전동기 단자의 선간전압이다. 최대 선간전압은 6,074[V]이다.

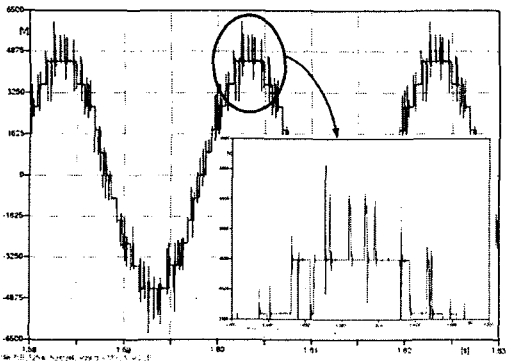


그림 6. RC필터설치 전 전동기 단자의 선간전압  
Fig 6. Line to line voltage of motor terminal without RC filter

인버터에서 출력된 전압은 전동기 단자에서 케이블과 유도전동기의 임피던스 부정합으로 인한 반사로 전동기 단자에서 과도과전압으로 나타난다. 이 과도과전압을 저감하기 위한 방안으로 고압유도 전동기에서는 멀티레벨 인버터를 사용한다.

그렇지만, 멀티레벨 인버터 사용시 고압유도전동기 단자에서 발생하는 과도 과전압의 상대적 크기가 1.2[p.u]로 줄어들었을 뿐, 절대적인 전압의 크기는 인버터 출력전압 보다 약 700[V] 높은 과도과전압이 전동기

단자에 나타난다.

따라서 과도과전압을 줄이기 위해서 추가적인 대책이 필요하다. 이를 해결하기 위해서 본 논문에서 RC필터를 설치하였다.

그림 7은 RC 필터를 설치 후 고압유도전동기 단자의 선간전압이다. RC 필터 설치 후 고압유도전동기 단자의 최대전압은 5,424[V]이다.

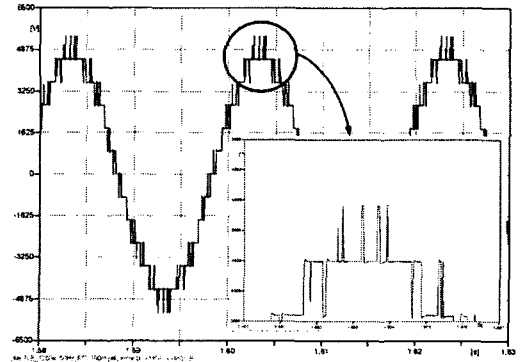


그림 7. RC필터설치 후 전동기 단자의 선간전압  
Fig 7. Line to line voltage of motor terminal with RC filter

그림 5 인버터 출력 선간전압과 그림 7 RC필터 설치 후 전동기 단자 선간전압을 비교하여 보면 RC필터가 효과적으로 그림 6에서 나타나던 과도과전압을 효과적으로 저감시킨 것을 볼 수 있다.

### 3.2 케이블 길이 변화에 대한 RC필터의 과도과전압 저감효과 분석

RC필터의 파라미터는 케이블 길이에 따라 변화된다. 필터의 파라미터가 일정할 때 케이블 길이 변화에 대한 과도과전압 저감효과의 변화를 분석하였다.

RC 필터의 파라미터는 케이블의 길이가 10m, 50, 100m 200m 400m일 때 각각 대응하는 파라미터로 설계된 5종류의 RC필터를 사용하였다. 필터의 파라미터는 표 3 케이블 길이에 대한 RC필터 파라미터와 같다. 각 필터에 케이블 길이 10m, 50m, 100m, 200m, 400m를 적용하여 시뮬레이션 하였다.

전동기 단자의 선간전압은 각 케이블 길이마다 5종류의 RC필터 설치 후 선간전압을 측정하였다. 인버터 출력단자의 전압은 5,400[V]이다.

표 4는 RC 필터 적용 후 케이블 길이에 대한 전동기 단자 선간전압이며 그림 8은 표 4를 차트로 정리한 것이다.

그림 8을 보면 필터의 정전용량 C가 커짐에 따라 전동기 단자에서 발생하는 단자전압은 적어지며 적은 용량의 필터 정전용량은 케이블이 길어지면 과도과전압 저감에 충분한 효과를 얻지 못하는 것을 볼 수 있다. 따라서 필터의 정전용량 C는 너무 작게 할 경우 케이블의 영향을 많이 받게 되는 것을 볼 수 있다.

표 4. RC필터 적용 후 케이블 길이에 대한 전동기 단자 선간전압(p.u.)

Table 4. line to line voltage of induction motor terminal by length of cable with RC filter

필터 파라미터 R=16.482[Ω]	케이블 길이 [m]				
	10	50	100	200	400
C [μF]					
0.3331	1.0058	1.0264	1.0273	1.0532	1.0689
1.6657	1.0015	1.0063	1.0093	1.0145	1.0194
3.3314	1.0007	1.0029	1.0044	1.0067	1.0080
6.6628	1.0001	1.0003	1.0001	0.9992	0.9949
13.3256	0.9998	0.9991	0.9980	0.9958	0.9893

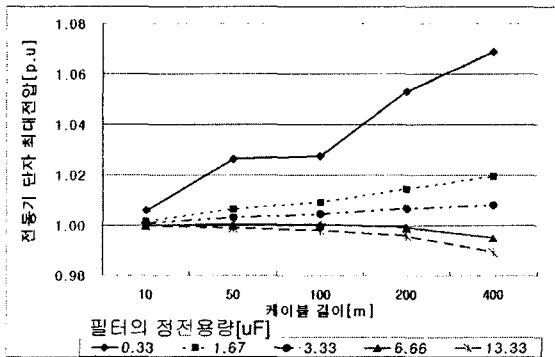


그림 8. 케이블 길이 변동에 따른 전동기 단자 선간전압 변화(p.u.)

Fig 8. Variation of line to line voltage of induction motor terminal as a function of length of cable(p.u.)

#### 4. 결론

인버터로 구동하는 유도전동기는 스위칭 서지에 의한 과도과전압이 전동기 단자 나타난다. 이것은 저압보다 고압에서 그 전압의 크기가 더 높게 나타나며 멀티레벨 인버터를 사용하여도 그 크기는 무시할 수 없는 높은 전압이다. 이 과도과전압을 저감하기 위한 추가적인 대책이 필요하다.

본 논문에서는 추가적인 대책으로 RC필터를 적용하였다. EMTP를 이용하여 3.3[kV] 고압 유도전동기 구동

시스템을 모델링 하였으며, RC필터를 적용하여 전체 시스템에서 시뮬레이션 및 전압파형 변화를 통하여 필터의 과도과전압 저감효과를 분석하였다.

시스템에 적용된 RC필터는 고압유도전동기 단자에서 발생하는 과도과전압을 효과적으로 저감시키는 것을 보였다. 케이블 길이에 따라 필터 파라미터는 변동되지만 일정한 필터 파라미터로 케이블 길이를 변화시켰을 때 필터의 정전용량이 큰 필터가 효과적으로 과도과전압을 저감시킨다. 그렇지만, 너무 커지면 전압은 인버터 출력전압보다 약간 낮아지고 작은 정전용량을 갖는 필터는 긴 케이블에 적합하지 않음을 보였다.

결론적으로 RC필터는 고압유도전동기에서도 효과적으로 과도과전압을 저감시키나, 케이블 길이에 따라 저감효과가 변화된다. 따라서 필터 설치시 낮은 정전용량 값은 적용할 수 있는 케이블의 길이가 짧게 제한됨을 고려해야 한다.

#### 감사의 글

이 논문의 연구는 산업자원부 지정 '전력신뢰도/품질 연구 센터'에서의 재정적인 지원을 받아 진행되었습니다. 본 센터에는 경상대, 서울대, 숭실대, 전북대의 교수님들과 대학원생들이 연구원으로 참여하고 있습니다

#### 참고 문헌

- (1) L. Gubbala, A. von Jouanne, P.N. Enjeti, C. Singh, H.A. Toliyat, "Voltage Distribution in the windings of an AC motor subjected to high dv/dt PWM voltages", Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95., 26th Annual IEEE, Vol 1, pp579-585, 1995
- (2) Christopher J. Melhorn, Le Tang, "Transients effects of PWM Drives on induction motor", IEEE Transactions on Industry Applications. VOL.33, No. 4, pp.1065-1072, July/August 1997
- (3) Don-Ha Hwang, Ki-Chang Lee, Yong-Joo Kim, Sung-Woo Bae, Dong-Hee kim, Chae-Gyun Ro, "Voltage Stress on Stator Windings of Induction Motors Driven by IGBT PWM Inverters", Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting, Vol.1 pp.439-444, 12-16 Oct. 2003
- (4) von Jouanne, A.; Haoran Zhang; Wallace, A.K, "An evaluation of mitigation techniques for bearing currents, EMI and overvoltages in ASD applications" Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 34, Issue 5, Sept.-Oct. 1998 Page:1113 - 1122
- (5) von Jouanne, A.; Enjeti, P.N."Design considerations for an inverter output filter to mitigate the effects of long motor leads in ASD applications" Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 33, Issue 5, Sept.-Oct. 1997 Page:1138 - 1145
- (6) Yilmaz Sozer, David A. Torrey, Suhan Reva. "New Inverter Output filter Topology for PWM Motor Drives" IEEE Transactions On Power Electricins Vol.15, No. 6 pp.1007-1017 2000. 11
- (7) Walter Santiago "Inverter Output Filter Effect on PWM Motor Drives of a Flywheel Energy Storage System" American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004-5628