

EMTP를 이용한 멀티레벨 인버터 구동 고압유도전동기에서 발생하는 과도과전압 저감필터의 효과분석

(Analysis on the Effect of Filter to Mitigate Transient Overvoltage on the High Voltage Induction Motor Fed by Multi Level Inverter using EMTP)

권영목* · 김재철**

(Young-Mok Kwon · Jae-Chul Kim)

요 약

본 논문에서는 인버터 구동 고압유도전동기 운전시 스위칭 서지로 인하여 고압유도 전동기 단자에서 발생하는 과도과전압을 저감하기 위한 필터로 인버터 출력단자에서 dv/dt 를 저감하는 LCR 필터와 전동기 입력단자에서 케이블과 유도전동기 특성임피던스를 매칭시키는 RC필터에 대한 과도과전압 저감특성을 분석하였다. 이 필터를 고압에 대용량 유도전동기에 적합하도록 EMTP(ElectroMagnetic Transients Program)를 이용하여 모델링 및 케이블 영향에 의한 필터의 과도과전압 저감효과를 전압파형과 고조파 스펙트럼으로 비교분석하고, 이를 토대로 고압 대용량 유도전동기에 사용될 필터를 제시하였다. 인버터 스위칭 서지에 의한 과도과전압은 유도전동기 고정자 권선에 심각한 전압 스트레스를 발생시켜 절연파괴를 일으키는 주요원인이 된다. 이러한 과도과전압을 저감위한 필터설계는 고압유도전동기 시스템에서 필수적인 요소임을 보였다. 또한 제시된 필터는 과도과전압을 효과적으로 저감시키는 것을 EMTP 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

Abstract

In this paper, filters are designed to reduce transients overvoltage in inverter fed high-voltage large-capacity induction motor drive system. Design issues for a LCR filter at the inverter output terminals to reduce the dv/dt of the inverter output pulse and a RC filter at the induction motor input terminals to match the characteristic impedance between cable and induction motor are examined in detail. These filters are modeled to be suitable to high-voltage large-capacity induction motor. The performance of the filter is evaluated through simulation using EMTP (ElectroMagnetic Transients Program). We presented filters that used high voltage large-capacity induction Motor on the basis of this. Effect of the filter is analyzed for variation of the cable length. Characteristics of filters are analyzed to reduce harmonic in voltage waveform of induction motor input terminal. The switching surge voltage became the major cause to occur the insulation failure by serious voltage stress in the stator winding of induction motor. Filter for to mitigate transients overvoltage presents a required component in drive system of high-voltage large-capacity induction motor. Also, proposed filters are proved through simulation using EMTP.

Key Words : ASD, Cable, EMTP, High-voltage Induction motor, PWM, Switching surge

* 주저자 : 공항철도(주)

** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수

Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780, E-mail : jckim@ssu.ac.kr

접수일자 : 2006년 8월 1일, 1차심사 : 2006년 8월 3일, 심사완료 : 2006년 8월 18일

1. 서 론

1950년대 말 Thyristor의 발명과 함께 반도체를 이용하여 전력을 제어하는 전력전자 공학이 시작된 이래 전력용 반도체의 비약적인 성능향상과 컴퓨터에 의한 제어기술의 발전은 전동기 보급에 지대한 영향을 끼치고 있다. 전력용 반도체가 발전되면서 스위칭 속도의 향상을 가져오게 되었고, 이는 전동기 구동장치 기술의 발전으로 이어졌다. 이러한 전동기 구동장치의 발전은 유도전동기의 제어성능과 효율을 향상시켰지만 부수적으로 전동기 구동장치의 스위칭 서지에 의한 과도과전압이 발생하는 문제점이 나타났다[1-3].

전동기 입력단자에 나타나는 과도과전압은 높은 dv/dt 의 인버터 출력전압과 전동기와 케이블간의 임피던스 부정합에 의해 발생한다. 이러한 과도과전압은 전동기권선에서 전압이 전동기 입력 단자쪽에 집중적으로 발생하고, 스위칭이 매우 빠르게 주기적으로 반복되기 때문에 전동기권선 절연에 심각한 문제를 초래하여, 전동기 권선열화에 의한 고장이 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 저압 유도전동기 입력단자에서 발생하는 과도과전압을 저감하기 위한 방법으로 전동기 입력단자에 병렬로 RC필터 또는 인버터 출력단자에 LCR필터를 설치하여 과도과전압을 저감하는 방법들은 적용하였다. 이 방법 중 인버터 출력필터에 설치하는 LCR필터는 저압 소용량 유도전동기에서 효과적인 방법으로 많이 사용되고 있다[4-6].

그렇지만 산업의 발달로 인하여 유도전동기는 소용량에서 대용량으로 용량이 늘어나고, 저압에서 고압으로 사용전압이 높아졌다. 이는 저압에서 효과적으로 과도과전압을 저감시키던 방법들이 고압에서는 미흡한 결과를 가져왔다. 고압 대용량화르 발생하는 과도과전압은 더욱더 높아지고, 인버터의 멀티레벨이라는 환경의 변화로 저압에서 사용하는 방법들을 적용하면 저감효과가 떨어져 고압 유도전동기 입력단자에서는 과도과전압이 높게 나타나는 문제가 발생한다[7].

따라서 본 논문에서는 저압 소용량 유도전동기와 다른 환경의 고압 대용량 유도전동기에 적용 가능한

인버터 스위칭 서지에 의해 발생하는 과도과전압을 저감시키기 위한 필터의 특성을 분석하고자 한다.

2. 고압 유도전동기 구동시스템

본 논문에서는 가변속 구동장치로 운전하는 3.3[kV]고압 유도전동기에 LCR필터 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[mm]그리고 3.3[kV] 1.5[MVA] 고압 유도전동기를 EMTP를 이용하여 모델링 하였다[7].

그림 1은 고압 유도전동기 구동을 위한 전체적인 시스템 모델이다.

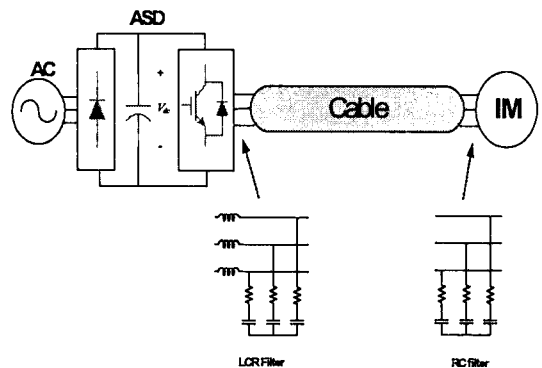


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

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. 인버터의 스위칭 주파수는 1250Hz로 모델링 하였다. 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.

EMTP를 이용한 멀티레벨 인버터 구동 고압유도전동기에서 발생하는 과도과전압 저감필터의 효과분석

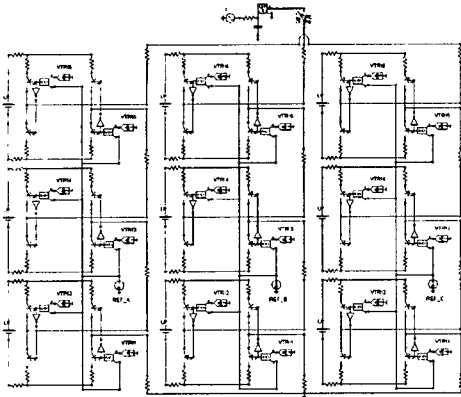


그림 2. EMTP ATPDraw를 이용한 H-Bridge cascaded 7-level 인버터 모델
Fig. 2. H-Bridge cascaded 7-level inverter model using EMTP ATPDraw

2.2 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.

2.3 3.3[kV]고압 전동기의 모델링

표 1. 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]
Moment of Inertia	78.5[kg · m ²]	

EMTP에 있는 유도기, 동기기, 직류기등 12종류의 회전기를 모델링 할 수 있는 UM(Universal Machine) Model을 이용하여 유도전동기를 모델링

하였다. 이 UM Model은 전기적인 회로는 d-q-0축으로 표현하고 기계적인 요소는 전기회로로 유사화하여 표현한다. 본 논문에서 사용될 유도전동기의 사양은 표 1에 제시하였다.

2.4 LCR 필터 모델링

본 논문의 필터의 모델링방법은 저압필터 설계방법의 개념을 적용하였다. 고압에서 전압의 크기를 고려하여 적용가능 하도록 과도과전압 발생을 저압에서 설계시 20[%]이하로 제한하지만 본 논문에서는 5[%]이하로 모델링하였다. LCR 필터는 과도과전압의 원인 중에 하나인 인버터 출력전압 상승률을 억제하기 위한 저역통과 필터로서 인버터 출력단에 설치한다. LCR 필터는 인버터 출력 측에 설치한다는 설치상의 이점과 1대의 인버터로 다수의 전동기를 운전할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그림 3은 LCR 필터의 구성도이다.

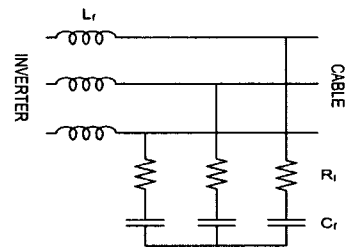


그림 3. LCR 필터의 구성도
Fig. 3. Configuration of LCR filter

LCR 필터는 전동기 단자에서 반사되는 전압비율을 줄이기 위하여 전동기단자에 걸리는 최대전압을 계산하는 식 (1)을 이용하여 필터의 파라미터를 선정한다.

$$V_{peak, L-L} = \frac{3 \times I_c \times E \times \Gamma_L}{v \times t_r} + E \quad (1)$$

- t_r : 입력 전압의 상승시간
- Γ_L : 부하단에서의 반사계수
- E : 인버터의 출력전압 크기
- l_c : 케이블의 길이
- v : 전파 속도

필터의 파라미터를 구하기 위해서는 첫 번째로 차단주파수를 계산해야 한다. 감쇠비가 -3[dB]를 갖는 차단주파수의 선정방법은 다음과 같다.

차단 주파수는 입력전압의 상승시간을 이용하여 계산한다. 이는 상승시간에 따라 식 (2)처럼 과도전압의 크기가 달라지는 특성을 이용하기 때문이다.

식 (1)은 반사되는 전압비율을 구하는 식으로 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\frac{V_{peak, L-L}}{E} = \frac{3 \times I_c \times \Gamma_L}{v \times t_r} + 1 \quad (2)$$

과도과전압의 비율을 5[%]이하로 하기 위한 입력 전압의 상승시간은 그림 4를 이용하면 100[μs] 케이블에서 상승시간이 3.6[μs]보다 커야 하는 것을 볼 수 있다. 따라서 상승시간을 3.6[μs]로 선정한다.

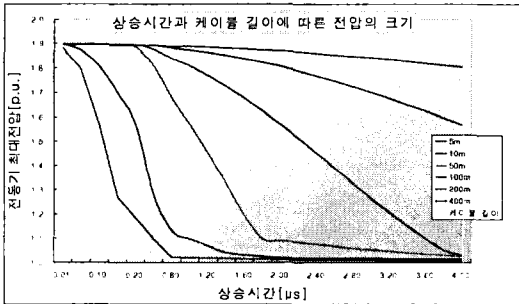


그림 4. 상승시간과 케이블 길이에 따른 전동기 단자 전압의 크기

Fig. 4. Magnitude of motor terminal voltage by rise time and cable length

구형파의 경사는 높은 주파수 성분에 의해 결정된다. 따라서 구형파인 PWM 인버터 펄스의 주기 T_c 는 상승시간의 2배 이상이어야 한다. 이를 이용하면

$$T_c = 2t_r \quad (3)$$

그리고 차단주파수 f_c 는 식 (4)와 같다.

$$f_c = \frac{1}{2t_r} \quad (4)$$

식 (4)와 그림 4를 이용하여 케이블 길이가 100[m]

일 때, 과도과전압을 5[%]이하로 제한하기 위한 차단주파수는 140[kHz]가 된다.

차단주파수를 이용하여 필터의 L_f , C_f 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

LCR 필터의 전달함수는 식 (5)와 같다.

$$H = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1 + j\omega R_f C_f}{1 - \omega^2 L_f C_f + j\omega R_f C_f} \quad (5)$$

감쇠비 A는 식 (6)과 같으며

$$A = 20 \log \left| \frac{1}{H} \right| \quad (6)$$

필터의 저항성분은 과제동회로에서 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$R_f \geq \sqrt{\frac{4L_f}{C_f}} \quad (7)$$

여기서 필터의 저항 R_f 는 3.3[kV] CV 케이블의 100[mm²]의 특성임피던스와 같게 한다. 식 (5)~(7)의 관계를 이용하여 감쇠비 -3[dB]와 140[kHz]의 차단주파수를 갖는 필터의 파라미터를 계산하면 L_f 는 0.0234[mH], C_f 는 1.37[μF]의 값을 갖는다.

표 2에서 LCR필터의 저항변화 없이 차단주파수의 변화에 의한 필터의 L_f 과 C_f 값의 변화는 선형적으로 변화되는 것을 볼 수 있다.

표 2. 차단주파수 변화에 따른 필터 파라미터
Table 2. Parameter of filter by variation of cutoff frequency

차단주파수 [kHz]	0.1	1	10	100	1000
R_f [Ω]	16.482	16.482	16.482	16.482	16.482
L_f [mH]	32.72	3.272	0.327	0.033	0.003
C_f [μF]	1637.9	163.79	16.38	1.638	0.164

2.5 RC 필터 모델링

RC 필터는 과도과전압 발생원인인 케이블과 유도

EMTP를 이용한 멀티레벨 인버터 구동 고압유도전동기에서 발생하는 과도과전압 저감필터의 요과분석

전동기의 특성임피던스 부정합을 제거하여 유도 전동기 단자에서 발생하는 반사전압을 줄이는 필터로서 전동기 입력단자에 설치한다. 그림 5는 RC필터의 구성도이다.

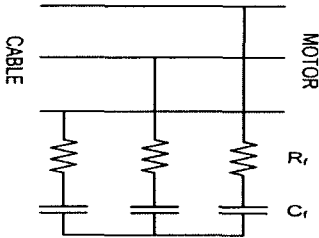


그림 5. RC 필터의 구성도
Fig. 5. Configuration of RC filter

RC 필터는 임피던스 매칭을 이용하여 전동기 단자에서 발생하는 반사파를 줄이기 위한 필터로 전동기 입력단자에서 발생하는 반사전압의 크기(e_2)를 계산하는 식 (8)을 이용하여 필터의 파라미터 값을 선정한다.

$$e_2 = E - E \frac{2Z_0}{(R_f + Z_0)} e^{-t/(Z_0 + R_f)C_f} \quad (8)$$

e_2 : 전동기 입력단자에서 발생하는 반사전압의 크기

t : 부하단까지 걸리는 시간

Z_0 : 케이블 특성임피던스

R_f : 필터의 저항

C_f : 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 (9)에서 필터의 저항 R_f 는 케이블의 특성임피던스 Z_0 와 같다고 가정한다.

$$e_2 = E \frac{R - Z_0}{R + Z_0} \quad (9)$$

그리고 두 번째 입사파가 전동기 단자까지 걸리는 시간은 $3t$ 이고, 과도과전압을 5[%] 이내로 제한하면

식 (8)은 식 (10)으로 쓸 수 있다.

$$e_2 = E - E \frac{2Z_0}{(Z_0 + Z_0)} e^{-3t/(Z_0 + Z_0)C_f} = 0.05E \quad (10)$$

식 (10)을 필터의 정전용량 C_f 에 대하여 정리하면, 식 (11)과 같다.

$$C_f = - \frac{3(t \sqrt{L_c C_c})}{2Z_0 \ln(0.95)} \quad (11)$$

식 (11)을 간단히 정리하면 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$C_f = - \frac{l_c C_c}{0.034195} \quad (12)$$

식 (12)를 이용하여 3.3[kV] CV 케이블 100[m]에서의 RC 필터의 파라미터를 구하면 케이블 특성임피던스(Z_0)가 16.482[Ω]로 RC필터의 저항 R_f 값으로 주어지면 필터의 정전용량 C_f 의 값은 0.1653[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]	20	50	100	200	400
R[Ω]	20	20	20	20	20
C[μF]	0.05	0.10	0.14	0.18	0.20

3. 시뮬레이션

2장에서 모델링 되어진 필터들은 길이와 구조 등에 영향을 받아 필터의 파라미터가 변화되는 것을 보았다. 이러한 케이블 환경이 필터의 과도과전압을 저감시키는 성능에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다.

LCR필터와 RC필터를 3.3[kV] CV 케이블 단심과

3심에 적용하여 케이블 구조에 따른 필터의 과도과전압을 저감하는 효과를 비교하였으며, 각각의 케이블 구조로 길이가 변화 되었을 때 필터의 과도과전압 저감효과를 비교분석하였다.

3.1 케이블 구조에 따른 필터의 효과분석

케이블은 3.3[kV] 단심 CV 케이블 100[mm]과 3.3[kV] 3심 CV 케이블 100[mm]를 사용하였으며, 길이는 각각 100[m]로 모델링하였다.

3.1.1 LCR 필터 적용

2장에서 설명되었던 LCR필터의 차단 주파수로 단심 케이블은 140[kHz]이고, 3심 케이블은 200[kHz]로 필터를 모델링하였다. 케이블의 구조차이에 따라 발생하는 과도과전압의 크기와 케이블의 특성 임피던스 등이 다르기 때문에 차단 주파수가 다르게 선정된다. 다음 표 4는 단심과 3심 케이블에 따른 LCR필터의 파라미터이다.

표 4. 케이블 구조에 따른 LCR 필터의 파라미터
Table 4. Parameter of LCR filter for configuration of cable

	$R \text{ } [\Omega]$	$L \text{ } [\text{mH}]$	$C \text{ } [\mu\text{F}]$
단심 CV 케이블	20	0.03	1.2
3심 CV 케이블	45	0.045	0.35

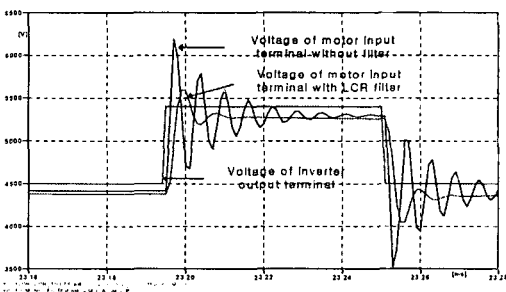


그림 6. 단심케이블에 LCR 필터 적용시 과도과전압
Fig. 6. Transient overvoltage of motor terminal on single core cable with LCR filter

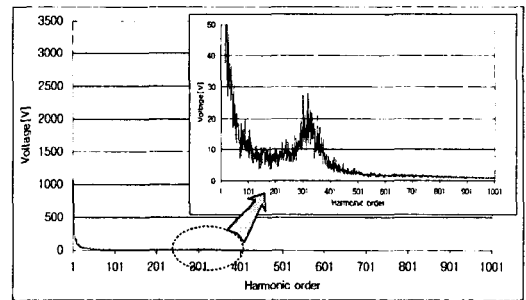


그림 7. LCR 필터 적용 전 전동기 단자전압 고조파 스펙트럼(단심케이블)
Fig. 7. Harmonic spectrum of motor terminal without LCR filter(single core cable)

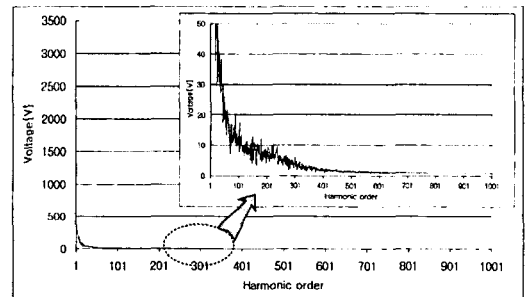


그림 8. LCR 필터 적용 후 전동기 단자전압 고조파 스펙트럼(단심케이블)
Fig. 8. Harmonic spectrum of motor terminal with LCR filter(single core cable)

그림 6과 그림 9는 단심과 3심케이블에 LCR 필터를 적용하였을 때 나타나는 전압파형을 확대한 그림으로 케이블 구조가 달라도 LCR필터는 과도과전압을 효과적으로 저감시키는 것을 볼 수 있다.

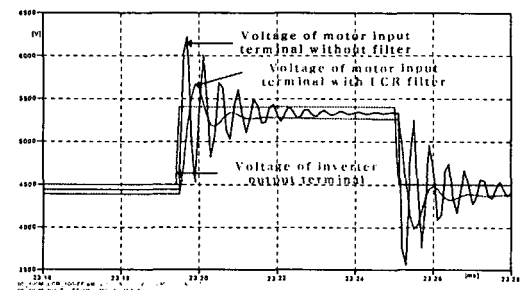


그림 9. 3심케이블에 LCR 필터 적용시 전압파형
Fig. 9. Transient overvoltage of motor terminal on Three core cable with LCR filter

EMTP를 이용한 멀티레벨 인버터 구동 고압유도전동기에서 발생하는 과도과전압 저감필터의 효과분석

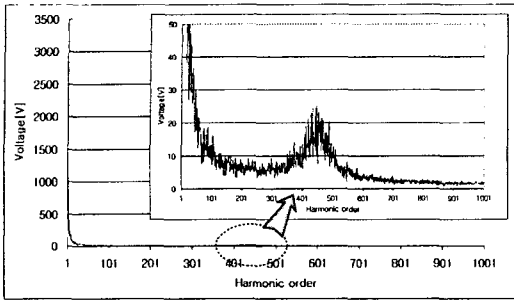


그림 10. LCR 필터 적용 전 전동기 단자전압 고조파 스펙트럼(3심케이블)
Fig. 10. Harmonic spectrum of motor terminal without LCR filter(three core cable)

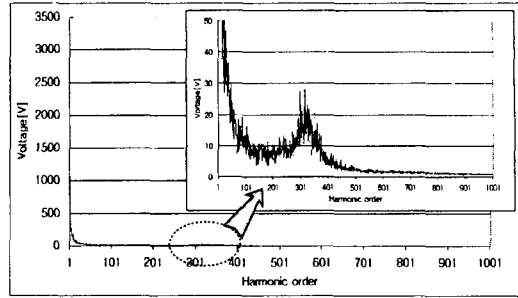


그림 13. RC 필터 적용 전 전동기 단자전압 고조파 스펙트럼(단심케이블)
Fig. 13. Harmonic spectrum of motor terminal without RC filter(single core cable)

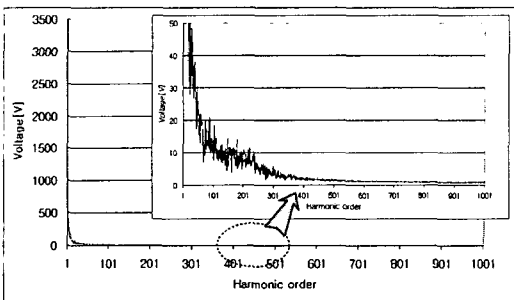


그림 11. LCR 필터 적용 후 전동기 단자전압 고조파 스펙트럼(3심케이블)
Fig. 11. Harmonic spectrum of motor terminal with LCR filter(three core cable)

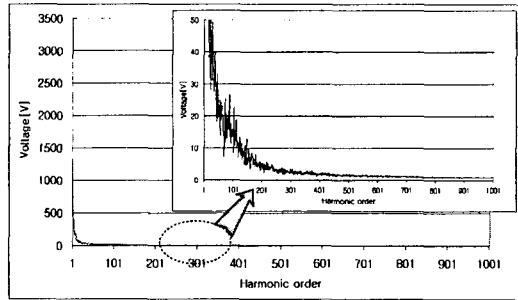


그림 14. RC 필터 적용 후 전동기 단자전압 고조파 스펙트럼(단심케이블)
Fig. 14. Harmonic spectrum of motor terminal with RC filter(single core cable)

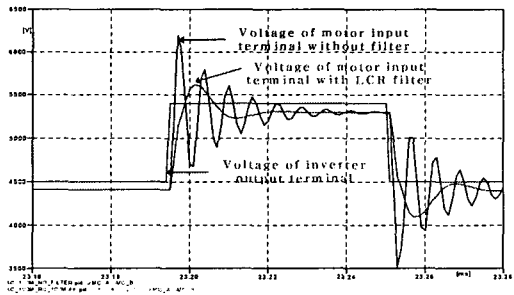


그림 12. 단심케이블에 RC 필터 적용시 과도과전압
Fig. 12. Transient overvoltage of motor terminal on single core cable with RC filter

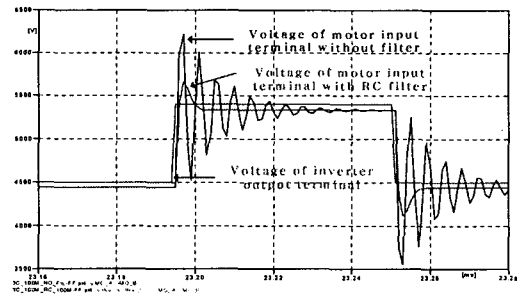


그림 15. 3심케이블에 RC 필터 적용시 과도과전압
Fig. 15. Transient overvoltage of motor terminal on three core cable with RC filter

단심 케이블의 고조파 스펙트럼을 확대한 그림 7, 그림 8과 3심 케이블의 고조파 스펙트럼을 확대한 그림 10, 그림 11을 보면 LCR필터 적용전에 나타나던 높은 차수의 고조파가 LCR필터 설치 후 단심과 3심 케이블 모두 고조파가 제거되는 것을 볼 수가 있다.

3.1.2 RC 필터 적용

다음 표 5는 단심과 3심 케이블에 따른 RC필터의 파라미터이다. 그림 12와 그림 15는 단심과 3심케이블에 RC 필터를 적용하였을 때 나타나는 전압과형을 확대한 그림으로 RC 필터 또한 케이블 구조에 크

계 영향을 받지 않는 것을 보여준다.

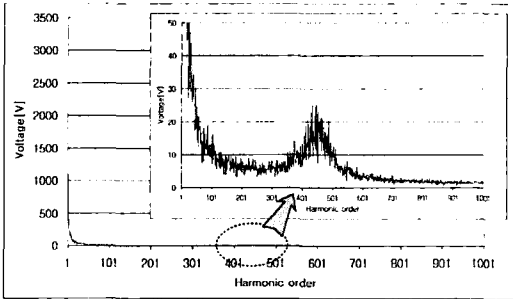


그림 16. RC 필터 적용 전 전동기 단자전압 고조파 스펙트럼(3심케이블)
Fig. 16. Harmonic spectrum of motor terminal without RC filter(three core cable)

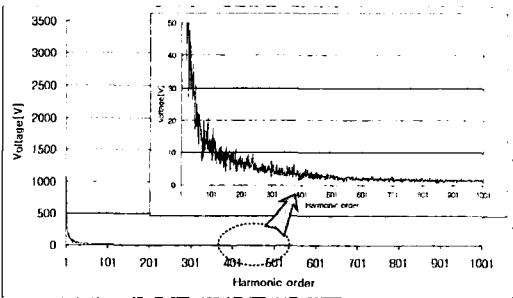


그림 17. RC 필터 적용 후 전동기 단자전압 고조파 스펙트럼(3심케이블)
Fig. 17. Harmonic spectrum of motor terminal with RC filter(three core cable)

단심 케이블의 고조파 스펙트럼을 확대한 그림 13, 그림 14와 3심 케이블의 고조파 스펙트럼을 확대한 그림 16, 그림 17을 보면 RC필터 적용전에 나타났던 높은 차수의 고조파가 RC필터 설치 후 단심과 3심 케이블 모두 고조파가 제거되는 것을 볼 수가 있다.

표 5. 케이블 구조에 따른 RC 필터의 파라미터
Table 5. Parameter of RC filter for configuration of cable

	$R \mu\Omega$	$C \mu F$
단심 CV 케이블	20	0.14
3심 CV 케이블	45	0.06

3.2 케이블 길이 변화에 대한 필터의 효과분석

LCR필터와 RC 필터의 과도과전압 저감효과에 영향을 줄 수 있는 케이블의 길이를 20[m], 50[m], 100[m], 200[m], 400[m]로 변화를 시키면서 EMTP로 시뮬레이션 하였다. 이때 필터는 각각 케이블 길이에 적당한 필터 파라미터로 모델링 하였다. 이 필터 파라미터는 전동기 입력단자에서 발생하는 과도과전압이 인버터 최대 출력전압의 5% 이내로 저감하도록 하였다. 각각의 필터는 5가지 길이에 적용되었다.

3.2.1 케이블 길이 변화에 대한 LCR 필터 효과분석

그림 18은 3.3[kV] CV케이블에 LCR필터를 적용한 구성도를 보여준다. 전압은 인버터 출력단자 지점인 A와 전동기 입력단자 지점인 B에서 측정하였다.

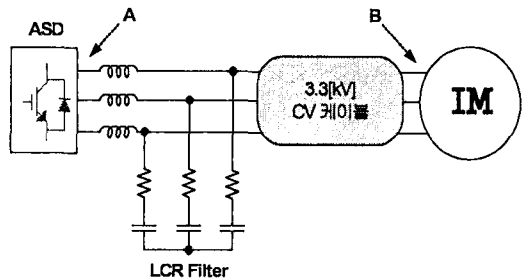


그림 18. LCR 필터를 적용한 시스템 구성도
Fig. 18. Configuration of system with LCR filter

표 6은 단심 케이블의 길이 변화에 따른 LCR 필터 파라미터들이다.

표 6. 단심 케이블 길이 변화에 따른 LCR필터 파라미터
Table 6. Parameter of LCR filter by length of single core cable

케이블 길이[m]	20	50	100	200	400
$R \mu\Omega$	20	20	20	20	20
$L \text{ [mH]}$	0.009	0.02	0.03	0.05	0.08
$C \mu F$	0.36	0.8	1.2	2.0	3.2

EMTP를 이용한 멀티레벨 인버터 구동 고압유도전동기에서 발생하는 과도과전압 저감필터의 효과분석

표 7은 3.3[kV] 단심 CV 케이블에 LCR필터 적용 시 인버터 출력전압에 대한 전동기 입력단자 전압의 크기로 A지점의 인버터 최대 출력전압 5,400[V]를 기준으로 B지점인 전동기 입력단자에서 나타나는 과도과전압을 비교하였다.

표 7. LCR필터 적용 후 단심 케이블 길이에 대한 전동기 단자 선간전압(B/A)

Table 7. Line to line voltage of induction motor terminal by length of single core cable with LCR filter(B/A)

LCR 필터종류	cable length	최대 전압비(B/A)				
		20 [m]	50 [m]	100 [m]	200 [m]	400 [m]
필터 설치 전		1.131	1.138	1.146	1.387	1.656
20[m]용 필터설치		1.032	1.125	1.130	1.153	1.280
50[m]용 필터설치		0.999	1.038	1.076	1.123	1.167
100[m]용 필터설치		0.997	0.993	1.037	1.098	1.102
200[m]용 필터설치		0.991	0.986	0.992	1.048	1.065
400[m]용 필터설치		0.983	0.978	0.969	0.992	1.025

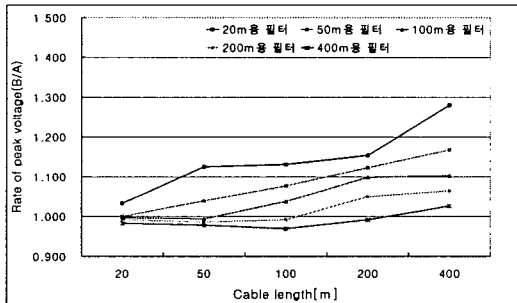


그림 19. LCR 필터 적용 후 단심 케이블 길이 변동에 따른 전동기단자 선간전압 변화

Fig. 19. Variation of line to line voltage of induction motor terminal as a function of length of single core cable with LCR filter

그림 19는 3.3[kV] 단심 CV 케이블에 LCR 필터 적용시 과도과전압 분포를 나타낸다. LCR 필터들은 저감하고자 하는 케이블 길이에 대해서 5[%]이내로 과도과전압을 저감하는 것을 볼 수 있다. 하지만 케이블이 길어지면 과도과전압을 원하는 크기로 저감

하지 못하거나, 짧아 질 경우 인버터 출력전압보다 전동기 단자 전압이 낮아지는 것을 볼 수 있다.

케이블을 단심에서 3심으로 변화하여 케이블 길이에 대한 LCR필터의 과도과전압 저감효과를 분석하였다. 표 8은 3심 케이블의 길이 변화에 따른 LCR 필터 파라미터이다.

표 8. 3심 케이블 길이 변화에 따른 LCR필터 파라미터

Table 8. Parameter of LCR filter by length of three core cable

케이블 길이[m]	20	50	100	200	400
$R \mu[\Omega]$	45	45	45	45	45
$L \mu[mH]$	0.013	0.03	0.045	0.075	0.10
$C \mu[\mu F]$	0.1	0.25	0.35	0.60	0.80

표 9는 3.3[kV] 3심 CV 케이블에 LCR 필터를 적용 시 인버터 출력전압에 대한 전동기 입력단자 전압의 크기로 A지점의 인버터 최대 출력전압 5,400[V]를 기준으로 B지점인 전동기 입력단자에서 나타나는 과도과전압을 비교하였다.

표 9. LCR필터 적용 후 3심 케이블 길이에 대한 전동기 단자 선간전압(B/A)

Table 9. Line to line voltage of induction motor terminal by length of three core cable with RC filter(B/A)

LCR 필터종류	cable length	최대 전압비(B/A)				
		20 [m]	50 [m]	100 [m]	200 [m]	400 [m]
필터 설치 전		1.113	1.145	1.151	1.144	1.273
20[m]용 필터설치		1.050	1.117	1.123	1.147	1.250
50[m]용 필터설치		1.006	1.047	1.074	1.116	1.147
100[m]용 필터설치		0.995	1.020	1.052	1.090	1.099
200[m]용 필터설치		0.986	0.991	1.013	1.048	1.072
400[m]용 필터설치		0.980	0.978	0.993	1.022	1.048

그림 20은 3.3[kV] 3심 CV 케이블에 LCR 필터 적용 시 과도과전압 분포를 나타낸다. 3심 CV 케이블에서도 LCR 필터들은 케이블이 길어지면 과도과전

압을 원하는 크기로 저감하지 못하거나, 짧아 질 경우 인버터 출력전압보다 전동기 단자 전압이 낮아지는 것을 볼 수 있다.

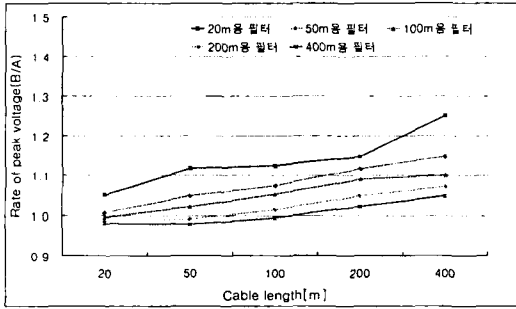


그림 20. LCR필터 적용후 3심 케이블 길이 변동에 따른 전동기단자 선간전압 변화
Fig. 20. Variation of line to line voltage of induction motor terminal as a function of three core cable with LCR filter

3.2.2 케이블 길이 변화에 대한 RC 필터 효과분석

그림 21은 3.3[kV] CV케이블에 RC필터를 적용한 구성도를 보여준다. 전압은 인버터 출력단자 지점인 A와 전동기 입력단자 지점인 B에서 측정하였다.

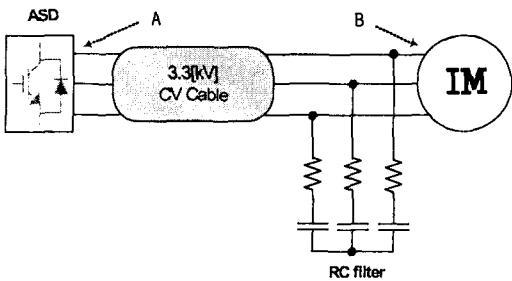


그림 21. RC 필터를 적용한 시스템 구성도
Fig. 21. Configuration of system with RC filter

표 10은 단심 케이블의 길이 변화에 따른 RC 필터 파라미터이다. 표 11은 3.3[kV] 단심 CV 케이블에 RC필터 적용시 인버터 출력전압에 대한 전동기 입력단자 전압의 크기로 A지점의 인버터 최대 출력전압 5,400[V]를 기준으로 B지점인 전동기 입력단자에서 나타나는 과도과전압을 비교하였다.

표 10. 단심 케이블 길이 변화에 따른 RC필터 파라미터

Table 10. Parameter of RC filter by length of single core cable

케이블 길이[m]	20	50	100	200	400
$R \text{ } \mu\Omega$	20	20	20	20	20
$C \text{ } \mu\text{F}$	0.05	0.10	0.14	0.18	0.20

표 11. RC필터 적용 후 단심 케이블 길이에 대한 전동기 단자 선간전압(B/A)

Table 11. Line to line voltage of induction motor terminal by length of single core cable with RC filter(B/A)

LCR 필터종류	cable length	최대 전압비 (B/A)				
		20 [m]	50 [m]	100 [m]	200 [m]	400 [m]
필터 설치 전		1.131	1.138	1.147	1.388	1.823
20[m]용 필터설치		1.043	1.066	1.080	1.112	1.107
50[m]용 필터설치		1.025	1.045	1.053	1.076	1.073
100[m]용 필터설치		1.019	1.034	1.039	1.057	1.063
200[m]용 필터설치		1.014	1.026	1.031	1.043	1.050
400[m]용 필터설치		1.013	1.023	1.029	1.036	1.042

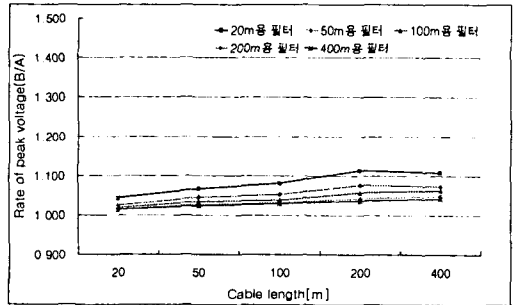


그림 22. RC 필터 적용후 단심 케이블 길이 변동에 따른 전동기단자 선간전압 변화

Fig. 22. variation of line to line voltage of induction motor terminal as a function of length of three core cable with RC filter

그림 22는 3.3[kV] 단심 CV케이블에 RC필터 적용시 과도과전압 분포를 나타낸다. RC 필터들은 저감하고자 하는 케이블 길이에 대해서 5%이내로 과도과전압을 저감하는 것을 볼 수 있다. 케이블이 길어

EMTP를 이용한 멀티레벨 인버터 구동 고압유도전동기에서 발생하는 과도과전압 저감필터의 효과분석

지면 과도과전압을 원하는 크기로 저감하지 못하는 것은 LCR 필터와 같은 현상을 보이지만 그 크기는 LCR 필터보다 작게 나타났다. 즉 RC 필터는 케이블 길이에 대한 과도과전압 저감효과 변동이 LCR 필터보다 적음을 볼 수 있다.

케이블을 단심에서 3심으로 변화하여 케이블 길이에 대한 RC필터의 과도과전압 저감효과를 분석하였다. 표 12는 3심 케이블의 길이 변화에 따른 RC 필터 파라미터이다.

표 12. 3심 케이블 길이 변화에 따른 RC필터 파라미터

Table 12. Parameter of RC filter by length of three core cable

케이블 길이[m]	20	50	100	200	400
$R [\Omega]$	45	45	45	45	45
$C [\mu F]$	0.025	0.05	0.06	0.09	0.12

표 13은 3.3[kV] CV 케이블에 RC필터를 적용시 인버터 출력전압에 대한 전동기 입력단자 전압의 크기로 A지점의 인버터 최대 출력전압 5,400[V]를 기준으로 B지점인 전동기 입력단자에서 나타나는 과도과전압을 비교하였다.

표 13. RC필터 적용 후 3심 케이블 길이에 대한 전동기 단자 선간전압(B/A)

Table 13. Line to line voltage of induction motor terminal by length of three core cable with RC filter(B/A)

LCR 필터종류	cable length	최대 전압비 (B/A)				
		20 [m]	50 [m]	100 [m]	200 [m]	400 [m]
필터 설치 전		1.113	1.145	1.151	1.144	1.273
20[m]용 필터설치		1.044	1.117	1.081	1.111	1.130
50[m]용 필터설치		1.033	1.047	1.053	1.078	1.086
100[m]용 필터설치		1.032	1.020	1.047	1.069	1.079
200[m]용 필터설치		1.029	0.991	1.037	1.051	1.060
400[m]용 필터설치		1.027	0.978	1.032	1.041	1.047

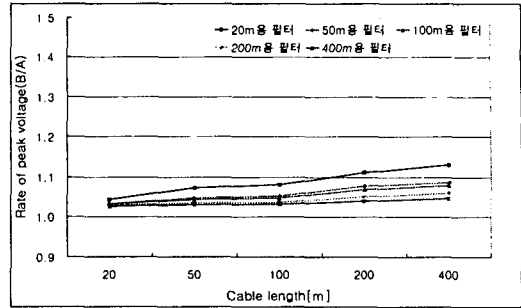


그림 23. RC필터 적용 후 3심 케이블 길이 변동에 따른 전동기 단자 선간전압 변화

Fig. 23. Variation of line to line voltage of induction motor terminal as a function of length of three core cable with RC filter

그림 23은 3.3[kV] 3심 CV케이블에 RC필터 적용시 과도과전압 분포를 나타낸다. RC필터들은 저감하고자 하는 3심 CV케이블 길이에 대해서 5[%] 이내로 과도과전압을 저감하는 것을 볼 수 있다. 케이블이 길어지면 과도과전압을 원하는 크기로 저감하지 못하는 것은 LCR 필터와 같은 현상을 보이지만 그 크기는 LCR 필터보다 작게 나타난다. 즉 RC 필터는 3심 CV케이블에서도 길이에 대한 과도과전압 저감효과 변동이 LCR 필터보다 적음을 볼 수 있다.

4. 결 론

산업의 발달로 유도전동기는 소용량에서 대용량을 용량이 증가하였으며 이와 함께 사용전압도 저압에서 고압으로 상승하였다. 유도 전동기는 제어의 용이함과 기계적으로 견고함으로 직류기에서 대체되고 있다. 하지만 유도 전동기를 제어하기 위한 가변속 구동장치에서 발생하는 스위칭 서지에 의한 과도과전압이 전동기 입력단자에 나타나는 문제가 발생되었다. 이 과도과전압으로 전동기 권선에 열화가 발생하여 고장의 원인이 되는 중요한 문제점을 가지게 되었다. 이는 고압 대형 유도전동기의 경우 더욱더 심각한 문제가 된다. 이를 해결하기위해서 다음과 같은 연구결과로 과도과전압 저감필터를 제안하였다.

고압 유도전동기 단자에서 발생하는 과도과전압

은 Multi-level 인버터를 사용하면 정격전압에 대한 상대적 크기는 낮아지나 고압의 높은 과도과전압이 전동기에 발생하는 것을 보였다. 이렇게 발생한 과도과전압을 저감시키기 위하여 과도과전압 저감필터로 LCR필터와 RC필터를 고압 대용량 유도전동기에 적합하도록 EMTP로 모델링 하였다. 필터의 특성을 분석하기 위하여 EMTP로 시뮬레이션하여 전압파형과 고조파 스펙트럼으로 비교분석결과 LCR과 RC 필터모두 고압 유도전동기에서 발생하는 과도과전압을 효과적으로 저감시키는 것을 보였다.

각각의 필터는 케이블 변수에 따라 필터파라미터가 변화되게 된다. 따라서 케이블 구조와 길이에 대한 영향평가를 각각 단심케이블과 3심 케이블의 구조변화와 케이블 길이를 변화시켜 과도과전압 저감에 대하여 LCR 필터와 RC필터를 비교분석하였다. LCR 필터는 케이블 길이가 길어지면 과도과전압을 효과적으로 저감하지 못하고 설계 값보다 짧아지면 전압이 인버터 출력전압보다 낮게 나타날 정도로 변동 폭이 크게 나타난다. 하지만 RC필터는 LCR 필터보다 그 변동이 적게 나타나는 특징을 보였다. 따라서 인버터로 구동되는 고압대용량 유도전동기에서는 RC필터를 사용하는 것이 과도과전압을 효과적으로 저감한다.

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

References

[1] Jong-Gyeum Kim, Jong-Ho Jeong, Eun-Woong Lee, "A Measurement of Switching Surge Voltage Using Inverter Devices", Transactions of KIEE P, Vol. 53P, No. 1. pp. 14-21. MAR. 2004.
 [2] Christopher J. Melhorn, Le Tang, "Transients effects of PWM Drives on induction motor", IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 4, pp.1065-1072, July/August 1997.

[3] Jong-Gyeum Kim "Analysis of Motor Winding Impact by Inverter Switching Voltage Waveforms", Journal of KIEE, Vol 13, No 1, pp. 94-101. February 1999.
 [4] Don-Ha Hwang, Ki-Chang Lee, Jeong-Woo Jeon, Yong-Joo Kim, In-Woo Lee, Dong-Hee kim, "Analysis of Voltage Stress in Stator Windings of IGBT PWM Inverters Fed Induction Motors Systems", KIEE International Transactions on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems, Vol. 5-B No. 1, pp43-49, 2005.
 [5] von Jouanne, A; Haoran Zhang; Wallace, A.K. "An evaluation of mitigation techniques for bearing currents, EM and overvoltages in ASD applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, Issue 5, pp. 1113 - 1122, Sept.-Oct 1998.
 [6] Walter Santiago "Inverter Output Filter Effect on PWM Motor Drives of a Flywheel Energy Storage System", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004-5628.
 [7] Jae-Chul Kim, Young-Mok Kwon "Analysis on the effect of LCR filter to mitigate transient overvoltage on the high voltage induction motor fed by Multi level inverter", Journal of KIEE, Vol 20, No 3, pp. 45-52. March 2006.

◆ 저자소개 ◆

권영목 (權寧睦)

1976년 10월 29일생. 2004년 숭실대학교 전기제어시스템공학부 졸업. 2006년 숭실대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 공항철도(주) 근무 중.
 [주 관심분야] 전력설비 진단, 스위칭 서지
 E-mail : mogiopa@ssu.ac.kr

김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기공학과 교수.
 [주 관심분야] 배전계통 신뢰도, 배전계획 및 운영, 전력설비 진단, 전기철도, 전력IT, 분산전원, 고효율기기등
 E-mail : jckim@ssu.ac.kr