

# 수동형 필터의 리액터 및 커패시터 특성 해석

(Characteristics Analysis of Reactor and Capacitor for Passive Filter)

김일중\* · 김종겸

(Il-Jung Kim · Jong-Gyeum Kim)

## 요 약

전력용 커패시터는 유도성 부하의 낮은 역률을 보상하기 위해 설치하는 경우가 많지만, 전력변환장치에서 발생하는 고조파를 줄이기 위해 수동형 필터로서 리액터와 함께 사용되는 경우도 있다.

수동형 필터는 커패시터와 리액터를 직렬로 연결하여 사용한다. 필터는 비선형 부하에서 발생하는 고조파를 흡수하는 역할을 하기 때문에 전압 및 전류 스트레스를 받아 소손 또는 열화되어 정상적인 수명을 보장받지 못하는 경우가 많다.

본 논문에서는 PWM 인버터의 전원측에 설치된 수동형 필터가 고조파를 저감할 때 받는 영향을 해석하였다.

## Abstract

Power capacitor is generally installed to compensate for the low power factor of inductive load. But it has been used as passive filter to reduce harmonics generated by the power conversion device.

Passive filter is composed by the series connection of reactor and capacitor. Because passive filter has play an important role on the absorber of harmonics, it takes voltage and current stress, follows partially burned on flamed and degradation, finally it has not guaranteed normal life.

In this paper, we analyzed the effect that passive filter installed at the source side of PWM inverter is received by harmonics absorption.

Key Words : Capacitor, Reactor, Passive filter, Harmonics

## 1. 서 론

전력용 커패시터는 무효전력의 제공, 전압 안정화, 역률 개선 그리고 시스템 전력 손실의 감소에 따른

시스템 용량을 증가하기 위해 사용하기도 하고, 비선형 부하에서 발생하는 고조파를 줄이기 위해 리액터와 함께 수동형 필터로서 사용되기도 한다[1-3].

전력용 커패시터는 주로 온도, 전류, 전압 등의 영향으로 정상적인 수명이 보장받지 못하고 절연파괴 등으로 소손되는 경우가 많다. 커패시터의 수명에 큰 영향을 주는 요소는 온도 상승 외에 과부하, 전압 변동, 고조파 등 전기품질에 관련된 영향을 받아 사

\* 주저자 : 호서대학교 벤처대학원 교수  
Tel : 041-540-9633, Fax : 041-540-9663  
E-mail : ilkim@hoseo.edu  
접수일자 : 2008년 10월 31일  
1차심사 : 2008년 11월 4일  
심사완료 : 2008년 12월 8일

고가 자주 발생하고 있다[1, 3-4].

커패시터는 주파수가 높아짐에 따라 임피던스가 낮아지므로 고조파에 의한 영향을 많이 받을 수 있으므로 비선형 부하에 전단에 설치할 때 리액터와 직렬로 연결하여 사용하고 있다. 리액터는 저감하기 위한 고조파 차수를 기준으로 커패시터에 대한 일정 비율에서 여유를 두고서 설계한다. 고조파에 의한 장애를 줄이고자 하여 설치하는 경우 리액터와 커패시터는 고조파 성분을 흡수하는 역할을 하기 때문에 고장의 발생 가능성이 높은 편이다.

본 연구에서는 PWM 장치의 컨버터에서 발생하는 고조파를 줄이기 위해 수동형 필터용에 사용되고 있는 커패시터 및 리액터의 전압 및 전류 특성을 분석하였다. 특히 리액터에서는 전압이 매우 찌그러져서 필터에서 커패시터 보다 리액터가 전기적인 스트레스를 더 받아 사고 비율이 높은 원인을 제공하고 있다는 것을 분석할 수 있었다.

## 2. 비선형 부하와 필터

### 2.1 비선형 부하

선형부하(linear load)란 본래 정상적인 동작 상태에서 인가전압의 주기 내 전력원에 일정한 부하 임피던스를 나타내는 전기적인 부하장치로서 백열등 또는 유도전동기와 같은 부하를 말하고, 비선형 부하(non-linear load)란 불연속적으로 전류를 끌어들이는 전기적인 부하 또는 부하의 임피던스가 정현적인 전압원의 주기 동안 내내 변화하는 것으로서 전력변환장치를 말한다. 비선형 부하는 전력변환과정에서 고조파(harmonics)를 발생하게 된다. 이 고조파는 손실 증가는 물론이고 연결된 시스템에 장애를 발생하기 때문에 필터 등을 이용하여 고조파 성분을 흡수해야 한다[5].

### 2.2 고조파에 의한 영향

전력변환과정에서 발생한 고조파는 손실의 증가는 물론이고 연결된 시스템에 영향을 주어 장애를 발생하고 있다. 표 1은 고조파로 인한 여러 가지 장

해 현상을 나타낸 것이다[3-4].

표 1. 고조파 발생 장애 현상

Table 1. Harmonic generation obstacle phenomena

장애 모드	장애발생 메커니즘
고조파에 의한 과전류	실효값 전류의 증가에 따른 저항 및 유전손실의 증대로 기기의 과열 과전류에 의해 철손 증대에 의해 기기의 가열 및 이상음, 진동의 발생
고조파에 의한 유전장애	전자유도에 의한 전자 노이즈 발생
고조파에 의한 전압 왜형	동기회로의 위상 불일치 전압 파고치 저하로 기기의 오동작, 부동작 발생

표 2는 고조파에 의해 장애를 받는 필터용 부속기기의 장애 형태를 나타낸 것으로서 과대한 전류가 흘러 과열, 소손되고, 그 중에서도 절연유가 기화 팽창해서 케이스가 파열하기도 하며, 단락에 의해 폭발하는 경우도 발생한다[3-4].

표 2. 고조파에 의한 필터설비의 장애

Table 2. Obstacles of filter devices by harmonics

장애기기	장애 형태
콘덴서	과대 전류에 의해 과열, 진동, 소음, 소손(전체 장애의 25[%])
리액터	과열 소손(전체 장애의 약 65[%])
퓨즈	과대 전류에 의해 소손

### 2.3 필터

비선형 부하에서 발생하는 고조파를 줄이기 위해 사용하는 필터로서는 능동형과 수동형이 있다. 능동형 필터는 모든 차수의 고조파를 줄일 수 있는 능력을 가지고 있지만, 가격이 높아 산업현장에는 커패시터와 리액터를 사용한 수동형 필터가 많이 적용되고 있다.

산업현장에서 적용하는 비선형 장치는 PWM 인버터를 이용한 가변속 드라이브 장치의 비중이 높아

### 수동형 필터의 리액터 및 커패시터 특성 해석

지고 있다. 이 비선형 장치는 컨버터부에 다이오드 정류기를 많이 이용하고 있어 에너지 변환과정에서 6개의 소자를 이용하기 때문에 5차 고조파가 가장 많이 발생하고 있다.

이 5차 고조파를 줄이기 위해 설치하는 필터의 경우 리액터는 커패시터 용량에 대해 다음과 같이 계산한다.

$$\omega L = 0.04 \frac{1}{\omega C} \quad (1)$$

그러나 실제로 4[%] 보다는 시스템의 안정성을 고려하여 6[%]를 많이 적용하고 있다.

필터용에서 커패시터의 전압( $V_c$ )은 직렬로 설치한 리액터( $L$ )에 의해 다음과 같이 전압이 상승한다 [2, 6].

$$V_c = \frac{V}{1 - \frac{L(\%)}{100}} [V] \quad (2)$$

6[%]의 리액터를 적용할 경우 220[V]의 상전압에서 커패시터의 전압은 234[V]로서 14[V] 정도의 전압이 상승하게 된다. 이때 당초 380[V]의 선간전압은 405[V]로 되기 때문에 전압상승분을 고려한 설계 및 적용이 필요하지만 국내에서는 저압에 대한 규정이 마련되어 있지 않다. 그러나 현장에서는 리액터의 추가로 커패시터에 전압이 상승할 경우 안전을 고려하여 한 단계 높은 정격의 커패시터를 적용하는 경우가 있다.

커패시터에 연결되는 리액터의 전압( $V_L$ )은 식 (2)의 커패시터 전압으로부터 식 (3)으로 나타낼 수 있다 [2, 6].

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{3}} \times V_c \times \%L [V] \quad (3)$$

380[V]의 전압에서 6[%]의 리액터를 사용할 경우 식 (3)으로 계산하면 리액터 전압은 14[V]이지만, 단순하게 6[%]만을 고려할 경우 13.2[V]가 된다.

### 3. 시뮬레이션 및 결과 분석

그림 1은 산업현장에서 널리 사용되고 있는 가변속 드라이브를 이용한 유도전동기 속도제어 시스템을

을 나타낸 것이다. 이 PWM 드라이브의 컨버터 부에 사용되고 있는 다이오드 정류기에서 고조파가 발생할 경우 전원측 및 연결된 시스템에 고조파 전류를 전달하여 시스템 장애를 초래할 수 있다. 이 고조파 성분을 줄이기 위해 리액터와 커패시터를 직렬로 연결한 수동형 필터를 사용할 경우 필터가 받는 전압 및 전류 성분을 분석하였다. 본 연구의 스트레스 분석에는 전자계과도해석 프로그램을 이용하였다[7].

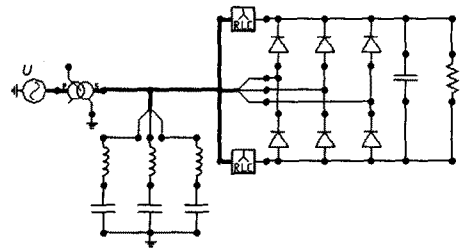


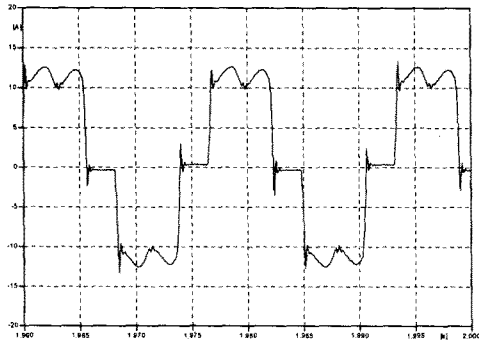
그림 1. 가변속 구동 드라이브  
Fig. 1. Adjustable Sped Drive

그림 2는 그림 1과 같은 비선형 부하의 운전시 필터 적용 전과 후의 전원측 전류파형을 나타낸 것으로서 5고조파를 줄이기 위해 4[%]와 6[%]의 리액터를 적용하여 계산하였다. 그림 2에서 x축은 시간이고 y축은 전류값이다.

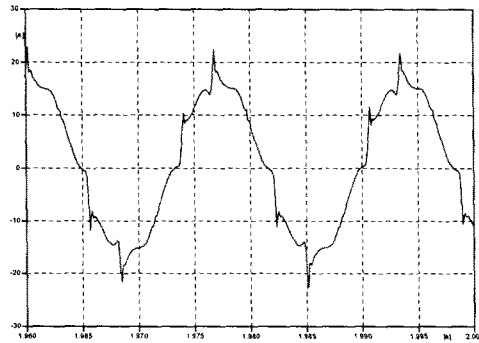
그림 2 (a)에서와 같이 필터 적용 전에는 상당히 왜형된 전류 파형이지만, 그림 2 (b) 또는 (c)와 같이 같은 커패시터 용량에 4[%] 또는 6[%]의 리액터를 적용한 5 고조파 저감 필터를 사용할 때는 고조파 성분이 상당히 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 그림 2와 같은 전류 파형에 대한 고조파 분석 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 3 (a)에서와 같이 기본파 성분 외 5, 7차 그리고 11, 13차 및 17, 19와 같이  $6n \pm 1$ 차에 해당되는 차수의 고조파가 모두 나타남을 확인할 수 있다. 기본파를 제외한 가장 높은 5고조파 성분을 줄이기 위해 커패시터에 6[%]의 리액터를 사용한 필터를 적용한 경우의 결과는 그림 3 (c)와 같다. 그림 3 (b)에서는 고조파 성분이 줄어들어 기본파 전류가 그림 3 (a)에 비해 높아짐을 확인할 수 있다. 그림 3 (b)는 5고조파를 줄이기 위해 커패시터에 이상적인 4[%] 리액터를 적용한 경우

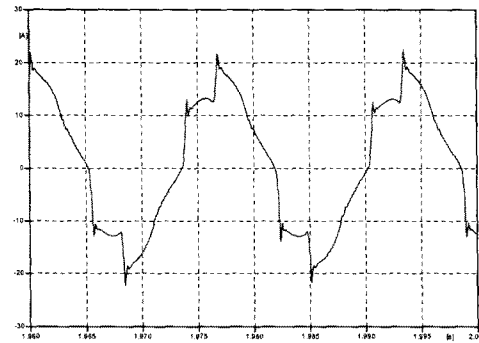
고조파 스펙트럼을 분석한 결과로서 그림 3 (c)에 비해 5차 고조파는 거의 제거되고 나머지 차수의 고조파도 상당히 줄어드는 것을 확인할 수 있다.



(a) 필터 설치 전

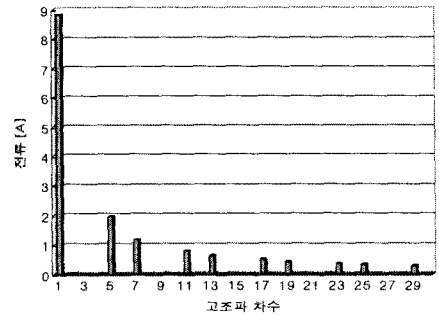


(b) 필터 설치 후(4%)

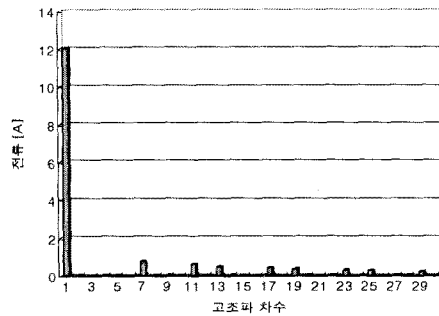


(c) 필터 설치 후(6%)

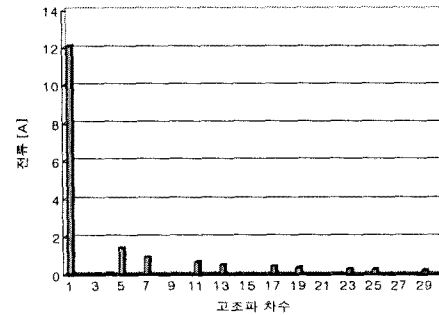
그림 2. 필터 적용시 전류 파형  
Fig. 2. Current waveform by application of filter



(a) 필터 설치 전



(b) 필터 설치 후(4%)



(c) 필터 설치 후(6%)

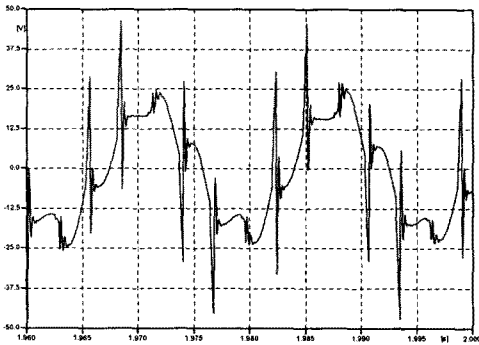
그림 3. 필터 적용 전류 고조파 스펙트럼  
Fig. 3. Current harmonic spectrum at filter application

필터를 사용할 경우 고조파 성분이 줄어들고 기본 파 전류 성분이 증가함에 따라 부하에 흐르는 전류가 증가하여 역률의 향상 및 시스템의 안정을 기대할 수 있다. 그러나 필터의 적용시 커패시터와 리액터는 전기적인 스트레스를 받아 소손 및 열화를 일

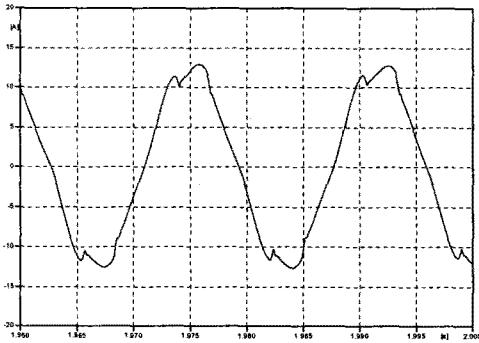
### 수동형 필터의 리액터 및 커패시터 특성 해석

오키는 경우가 있다. 따라서 필터의 적용시 받을 수 있는 특성변화를 해석하였다.

그림 4와 5는 그림 2와 같이 고조파 전류를 저감하기 위해 설치하는 수동형 필터의 리액터와 커패시터에 걸리는 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 리액터 용량은 커패시터 용량의 6%로 선정하였다.



(a) 전압



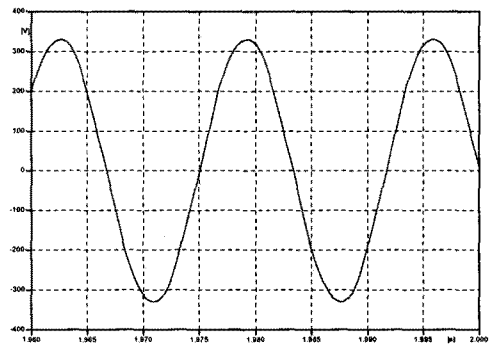
(b) 전류

그림 4. 리액터 전압 및 전류  
Fig. 4. Reactor voltage & current

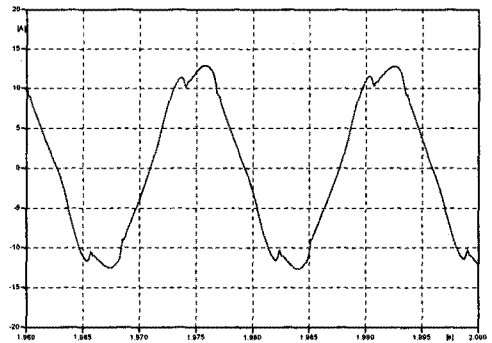
그림 4는 리액터에 걸리는 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 4 (a)는 리액터 전압으로서 상당히 왜형된 형태를 하고 있다. 이 파형에서 전압의 실효치는 상전압 219.6[V]에 대해 15.68[V]로서 식 (3)에 의해 계산한 13.176[V]보다 약간 높게 나타났다. 특히 반 주기 동안에 두 번의 전압 피크치 존재는 오랜 시간동안에 필터용 리액터의 권선에 전기적인 스트레스로 작용할 수 있어 수명에 큰 장애요인이 될 수 있다. 또한 반주기 동안에 일시적인 전압 강하가

존재함을 확인할 수 있다. 그림 4 (b)는 리액터를 흐르는 전류파형으로서 실효치는 8.87[A]가 되었다. 리액터에 걸리는 전압 및 흐르는 전류값이 증가함에 따라 리액터의 용량도 증가하여 당초에 설치하는 정격에 비해 높이 운전된다.

그림 5는 그림 4와 같이 수동형 필터용으로 리액터에 연결되어 운전하는 커패시터의 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 커패시터에 걸리는 전압은 그림 5 (a)와 같이 매우 정현적이지만, 리액터의 추가로 전압이 219.6[V]에서 235.05[V]로 약간 상승하였다. 실제 커패시터에 리액터를 추가할 경우 식 (2)에 의해 계산한 값 233.6[V]보다 약간 높게 나타났다. 커패시터에 흐르는 전류를 나타낸 그림 5 (b)는 리액터에 흐르는 전류와 같다.

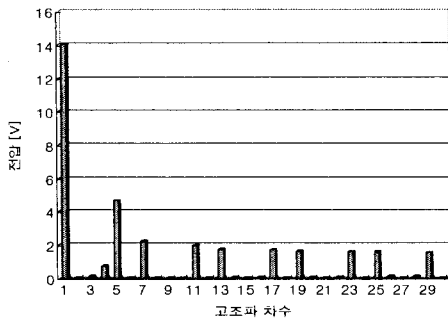


(a) 전압

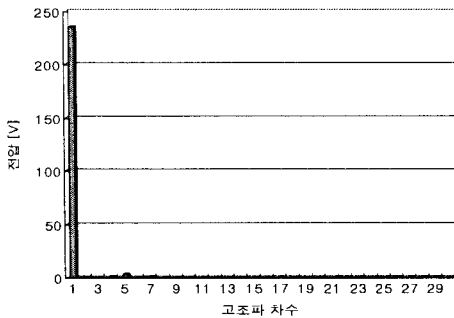


(b) 전류

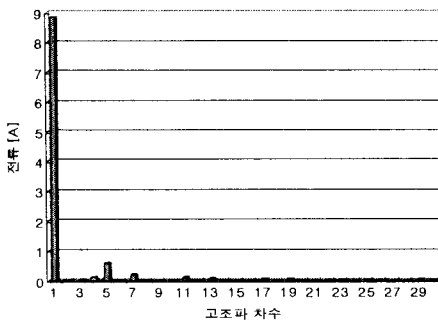
그림 5. 커패시터 전압 및 전류  
Fig. 5. Capacitor voltage & current



(a) 리액터 전압 고조파



(b) 커패시터 전압 고조파



(c) 리액터 및 커패시터 전류 고조파

그림 6. 고조파 스펙트럼  
Fig. 6. Harmonics spectrum

그림 6은 그림 4와 5의 수동형 필터의 리액터 및 커패시터에서의 전압 및 전류 고조파 성분을 분석한 결과이다. 그림 6 (a)는 그림 4 (a)의 리액터의 전압 고조파 성분을 분석한 것으로서 기본파 전압 외에도 고조파 성분이 많이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. 특히  $6n \pm 1$ 차에 해당되는 차수의 전압 고조파

성분이 모두 나타난 것은 비선형 부하에서 발생한 고조파 성분의 대부분을 리액터에서 흡수하기 때문이다. 그림 6 (b)는 그림 5 (a)의 커패시터에 대한 전압 고조파 성분을 나타낸 것으로서 기본파 이외에는 거의 고조파 성분이 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 필터에 존재하는 전압 고조파는 대부분 리액터에 그대로 반영됨을 확인할 수 있다. 그림 6 (c)는 그림 4 (b) 및 5 (b)와 같이 리액터 및 커패시터에 흐르는 전류 고조파 성분을 나타낸 것으로서 기본파 이외는 고조파 성분이 많이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

비선형 부하에서 발생하는 고조파를 줄이기 위해 PWM 인버터의 전원부에 수동형 필터를 설치할 경우 리액터와 커패시터가 받는 전압 및 전류 스트레스를 해석한 결과 전류보다는 전압 스트레스가 높게 분포함을 확인할 수 있다. 또한 리액터에서의 전압 파형은 전압 피크와 전압 강하가 반 주기 동안 발생하여 필터에서의 전압을 불안정하게 하고 있다.

#### 4. 결 론

전기 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 전력변환장치를 사용 비율이 점차 증가하고 있다. 전력변환장치의 에너지 변환과정에서 발생하는 고조파의 발생을 흡수하거나 줄이기 위해 설치한 필터가 고장이 많아 원인 분석이 필요하였다.

본 연구에서는 부하를 효율적으로 운전하기 위해 많이 사용하고 있는 PWM 인버터와 같은 전력변환장치에서 발생하는 고조파를 줄이기 위해 컨버터부의 앞단에 설치한 수동형 필터의 리액터와 커패시터의 전압, 전류 성분과 이들의 고조파 스펙트럼을 분석하였다.

해석결과 PWM 인버터와 같은 비선형 부하에서 사용되는 수동형 필터에서 리액터가 커패시터보다 전압 고조파 성분이 많이 포함되어 있으므로 전기적인 스트레스를 받아 열화 및 소손의 가장 큰 원인을 제공할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : 20080101).

References

- [1] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitor", Taylor & Francis, 2005.
- [2] KSC 4801, "저압 전상콘덴서", 2003.
- [3] Thomas M. Blooming, "Capacitor Application Issues", IEEE Trans on IAS, Jul-Aug, pp.1013-1026, 2008.
- [4] 일본전기학회 기술보고서, "부하공급계통 보호릴레이 시스템의 현상과 그 동향", No. 1006, 2005.3.
- [5] 김종겸, 이은웅, 이동주, "불평형 전압으로 운전하는 비선형 부하의 고조파 특성 분석" 대한전기학회 논문지 (B) 제 52권 10호, No. 10, pp.491-500, 2003. 10.
- [6] IIS C 4901, "저압 전상콘덴서", 2000.
- [7] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

◇ 저자소개 ◇

김일중 (金一中)

1958년 12월 10일생. 1980년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992~2005년 주성대학 전기과 교수. 2006년 (주)일신엔지니어링 기술연구소장. 2007년~현재 호서대학교 벤처전문대학원 교수.  
Tel : (041)540-9633  
E-mail : ilkim@hoseo.edu

김종겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1987~1988년 한국통신공사 근무. 1988~1996년 한국수자원공사 근무. 1996년~현재 국립 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수. 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환 시스템부문 총무이사.  
Tel : (033)760-8785  
E-mail : jgkim@kangnung.ac.kr