

# 전압제어형 능동전력필터를 이용한 비선형부하의 고조파저감 및 역률개선

金炳鎭, 文學龍, 宋良會, 林炳國, 田喜鍾

## Using Voltage Control Active Power Filter, Power Factor Improvement and Harmonics Reduction for Nonlinear Load

Beung-Jin Kim, Hark-Yong Moon, Yang-Hoi Song, Byung-Kuk Lim and Hee-Jong Jeon

### 요 약

본 논문에서는 비선형부하에서 발생하는 고조파 문제와 역률 저하 문제의 해결을 위한 능동필터를 제안하였다. 인버터와 수동필터로 구성된 능동전력필터는 비선형부하에 병렬로 위치하고 전압제어방식으로 동작된다. 제안된 전압제어방식은 기존의 전류제어형 방식에 비해 입력전압 변동에 강인한 특성을 갖는다. 능동전력필터의 작용으로 부하에 필요한 유효전력은 상용전원에서 공급되며 능동전력필터는 무효전력을 공급하여 입력 역률을 개선하였다. 또한 부하전압을 정현적으로 유지함에 따라서 부하전압, 입력전류 고조파 성분이 저감되었다. 본 논문에서 전압제어용 제어기의 구조를 단순화하여 전체 시스템의 안정성을 높였다. 다수의 시뮬레이션과 실제 실험을 통하여 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

### ABSTRACT

In this paper, voltage control APF(Active Power Filter) is introduced to improve power factor and reduce harmonics generated from nonlinear load. The voltage controlled APF which is consisted of inverter and passive filter operates with nonlinear load simultaneously. Real power supplies from main power to load and reactive power provides from APF to load. According to the results of experiment and simulation, it is proved that the proposed system has the performance of improving power factor and reducing harmonics.

Key Words : Voltage-Control Active Power Filter, Reactive Power

### 1. 서 론

최근 산업계에서 많이 사용되는 비선형 부하와 스위칭소자를 가진 부하에서 발생하는 고조파는 인근 계통의 부하에 악영향을 미친다. 특히 통신기기나 정밀계측장비의 오동작을 유발하기도 한다. 또한 역률 저하로 인한 전력공급의 효율 저하를 야기한다. 이러한 고조파 저감 및 역률 개선을 위한 대책으로 능동전력필터가 대두되고 있다.

능동전력필터는 상용전원에서 부하로 유입되는 전류

에 포함된 고조파를 상용전원 대신 부하에 공급하는 것이다. 즉, 입력전류는 전압과 동상이면서 부하전류의 기본파 성분만을 공급하고 능동전력필터는 부하전류의 고조파 성분만을 공급한다. 따라서 입력전압과 동상인 정현적인 모양의 전류만을 부하에 공급하므로 고조파 개선 및 역률 개선의 효과를 얻는다<sup>[1][2]</sup>.

본 논문에서는 단순한 구조의 유효전력제어기와 무효전력제어기를 제시하였다. 제안된 제어기는 기존의 소개된 전압제어형 능동전력필터 제어기<sup>[4]</sup>에 비해 구조가 단순하여 구현이 용이한 장점을 갖고 있다.

## 2. 전압제어형 능동전력필터의 원리와 구조

### 2.1 전압형 능동전력필터의 원리

일반적으로 능동전력필터에는 전류제어형이 널리 사용된다. 입력전류가 정현적인 형태를 가질 수 있도록 능동전력필터는 부하에 필요한 고조파성분을 주입한다. 그러나 이러한 방식은 이상적인 전압 조건에서 동작한다. 따라서 입력전압의 왜곡이나 서지 전압 등은 전류제어형 능동전력필터의 안정적인 동작을 방해한다.

전압제어형 능동전력필터는 그림 1과 같이 상용전원과 병렬로 부하에 연결된 또 다른 전압원으로 간주되어진다. 만약 입력전압과 능동전력필터의 전압이 정현적이면 두 전압원 사이의 전류 역시 정현적인 형태를 취한다. 즉 부하의 조건에 무관하게 두 전압원 사이에 흐르는 전류는 고조파가 없는 파형이 된다. 또한 능동전력필터의 출력전압을 입력전압보다 크게 유지하여 무효전력을 부하에 공급한다.

따라서 능동전력필터는 부하에 필요한 무효전력을 공급하며 상용전원 측에서는 부하에 필요한 유효전력을 공급하게 된다. 따라서 입력전류는 전압과 동상이며 고조파가 포함되지 않게 된다. 더해서 부하전압은 능동전력필터의 출력전압과 같으므로 입력전압의 변동에 무관하게 안정된 동작을 수행한다.

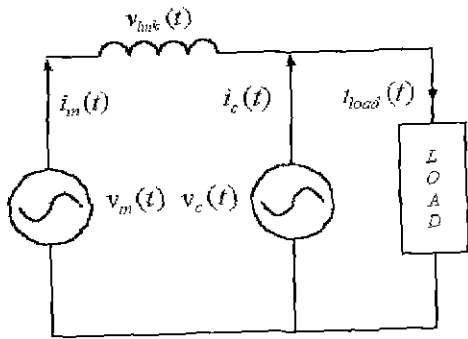


그림 1 전압제어형 능동전력필터의 등가회로  
Fig 1 Equivalent circuit of the voltage control APF

입력전압은

$$v_m(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

능동전력필터의 출력전압이 다음과 같다고 가정한다면

$$v_c(t) = V_c \sin(\omega t - \alpha) \quad (2)$$

$$i_m(t) = \frac{1}{\omega L_{link}} (V_m \sin(\omega t) - V_c \sin(\omega t - \alpha)) \quad (3)$$

$$= I_m \sin(\omega t + 90 - \delta)$$

여기서

$$I_m = \frac{1}{\omega L_{link}} \sqrt{V_c^2 \sin^2(\alpha) + (V_m - V_c \cos(\alpha))^2} \quad (4)$$

$$\delta = \sin^{-1} \frac{V_m - V_c \cos(\alpha)}{\sqrt{V_c^2 \sin^2(\alpha) + (V_m - V_c \cos(\alpha))^2}} \quad (5)$$

따라서 유효전력 및 무효전력은 다음과 같다.

$$P_m = \frac{V_m V_c}{2X_{link}} \sin(\alpha) \quad (6)$$

$$Q_m = \frac{V_m}{2X_{link}} (V_m - V_c \cos(\alpha)) \quad (7)$$

여기서  $X_{link}$ 는 링크 인덕터의 리액턴스이다.

단위 역률을 얻기 위해 식 (7)의 무효전력은 영값을 갖아야한다. 따라서 단위역률을 위한 조건식은 식 (8)과 같다. 즉 능동전력필터의 출력전압의 위상과 크기를 조절함으로써 유효, 무효전력을 제어할 수 있다.

$$V_m = V_c \cos(\alpha) \quad (8)$$

### 2.2 전압형 능동전력필터의 구조

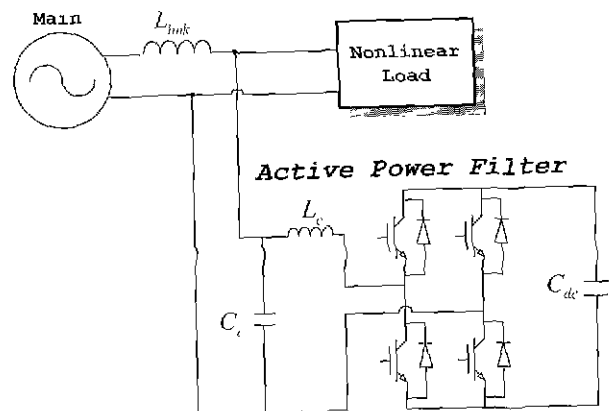


그림 2 전압제어형 능동전력필터의 구조  
Fig 2 Configuration of voltage control APF

제안된 능동전력필터는 그림 2와 같이 인버터, 전력 저장용 콘덴서 그리고 출력파형 개선용 수동필터로 구성되었다. 본 연구에서는 고조파를 유발시키는 원인으로 단상 다이오드 정류기를 비선형 부하로 사용하였다. 상용전원과 능동전력필터 사이에 링크 인덕터를 삽입하여 두 전원의 인터페이스로 사용하였다. 인버터는 역시 단상으로 구성하였고 환류 다이오드를 스위칭 소자와 병렬로 부착하였다. 이상적으로 능동전력필터의 전력손실은 없으나 스위칭 주파수가 높아짐에 따라 스위칭 손실로 기인한 전력손실이 발생된다. 이러한 손실은 전력저장용 콘덴서의 전압강하를 유발시킨다. 이러한 경우 식 (8)에서 정의된 위상각을 조절하여 콘덴서의 전압을 재충전할 수 있다. 즉 상용전원측으로 환류 다이오드를 통하여 전력저장용 콘덴서로 전력을 축전 할 수 있다. 따라서 제안된 인버터는 전력저장용 콘덴서의 충전기 역할도 한다.

능동전력필터의 출력단에 부가된 수동 필터는 능동 전력필터의 출력파형 개선을 위한 것이다. 능동전력필터의 출력에는 고주파의 PWM 스위칭 노이즈를 포함하므로 오히려 더 많은 고조파를 유발시킬 수 있다. 따라서 수동필터를 이용하여 스위칭 고조파를 저감시키고 능동전력필터의 출력 전압파형을 정현적으로 개선시켰다.

### 3. 전압제어형 능동전력필터 제어기 구성

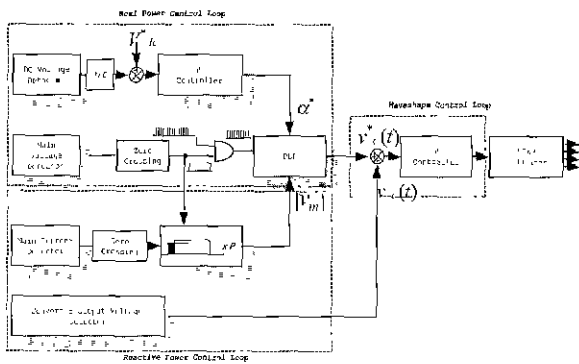


그림 3 제어부의 구성  
Fig. 3 Configuration of control part

그림 3에서는 제안된 능동전력필터 제어기 구성도를 나타낸다. 제어기는 유효전력 제어기, 무효전력 제어기 그리고 파형개선 제어기로 구성하였다. 유효전력 제어기의 위상지령( $\alpha^*$ )과 무효전력 제어기의 크지령

( $|v_m^*|$ )을 이용하여 PLL에서는 입력전압( $v_m(t)$ )와 동기된 능동전력필터 지령 전압( $v_c^*(t)$ )을 발생시킨다.

본 연구에서는 능동전력필터 출력 전압파형 왜곡을 막기 위하여 파형 개선기를 설계하였다. 즉 능동전력필터의 실제 출력전압( $v_c(t)$ )과 능동전력필터 출력전압 지령값( $v_c^*(t)$ )의 오차를 비례 제어기가 보상하는 형태의 제어를 이용하여 능동전력필터 출력 전압 파형 개선의 효과를 얻었다.

#### 3.1 유효전력제어기

공급될 유효전력의 크기는 능동전력필터의 전력저장용 콘덴서의 전압을 측정하여 간접적으로 알 수 있다. 즉 전원이 정상적으로 부하에 공급된다면 능동전력필터는 부하에 무효전력분만을 공급하기 때문에 전력저장용 콘덴서의 전압은 특정 값을 유지하고 있다. 그러나 부하변동에 따라서 부하에서 요구되는 유효전력이 변하는 경우 콘덴서의 전압이 변화한다. 유효전력제어기는 콘덴서의 변동을 측정하여 부하에 필요한 유효전력을 추정하여 유효전력을 보상하게 된다.

본 연구에서는 능동전력필터 출력전압의 위상제어를 통하여 상용전원으로부터 능동전력필터에 유효전력을 공급하게 해야한다. 예를 들어 부하가 증가하여 전원에 공급하는 유효전력보다 더 많은 유효전력의 공급이 필요하다면 콘덴서의 전압이 강하되고 이것을 감지한 제어기는 더욱 지상인 위상지령을 발생시켜 상용전원으로부터 더 많은 유효전력을 공급받게 한다.

#### 3.2 무효전력제어기

부하의 역률에 따라서 입력전압과 입력전류가 위상차를 발생하게 된다. 특히 다이오드 정류기와 같은 비선형 부하는 부하의 영향뿐만 아니라 평활용 콘덴서의 용량에 따라서 역률이 결정된다. 이러한 용량성 부하나 유도성 부하의 영향과 비선형 부하의 영향에 따라서 무효전력이 증가하게 된다.

무효전력제어기는 입력단 전압과 전류의 위상 차이를 검출하여 이 오차를 보상하기 위한 능동전력필터 지령전압의 크지령( $|v_m^*|$ )을 발생시킨다. 만약 위상오차가 많은 경우에는 능동전력필터 출력전압을 입력전압에 비해 크게 출력함으로써 부하가 필요로 한 무효분 전력을 능동전력필터에서 공급되게 한다. 따라서 상용전원에서는 유효전력만 부하에 공급하게 되므로 크기가 작고 전압에 동상인 전류를 부하에 공급하게 되므로 역률이 개선된다.

### 4. 시뮬레이션 및 고찰

제안된 능동전력필터의 동작과 성능을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 모형의 시정수는 표1과 같다.

그림 4는 전류제어형 능동전력필터의 파형이다. (a)와 같은 입력전압이 인가되면 (b)와 같은 입력전류가 도통된다. 능동전력필터의 직류링크 콘덴서의 충전을 위해 초기에 큰 전류가 먼저 도통된 후에 정상적인 전류가 도통된다. (c)는 부하전압으로 입력전류가 많이 개선된 것에 비해 전압의 고조파 저감효과는 얻지 못하고 있다. (d)의 입력전류 고조파 분석을 통해서 고조파 성분이 제거되어 능동전력필터가 입력전류의 고조파 성분을 제거함을 알 수 있다. 입력전류의 THD는 약 7.1%로 저하되었다. 그러나 (e)의 파형에서 나타나듯이 부하전압의 고조파는 저감되지 않았다. 그림 4(e)에서 5차 고조파 성분이 큰 값으로 존재한다. 이것은 전류제어형 능동전력필터가 전압에 포함된 고조파를 억제하지 못한다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 전압제어형 능동전력필터의 파형이다. 능동전력필터의 콘덴서에 충분한 전압이 충전되는 약 0.1[msec] 이후에 정상적인 출력을 나타낸다. (a)와 같은 입력전압이 인가되면 (b)와 같이 전류제어형 능동전력필터와 같이 전류가 정현적인 모양을 갖는다. 역시 능동전력필터의 직류링크 콘덴서의 충전을 위해 초기에 큰 전류가 먼저 도통된 후에 정상적인 전류가 도통된다. (c)는 부하 입력단 전압으로 전류제어형에 비해서 고조파가 현저하게 저하됨을 확인 할 수 있다. (d)에서 입력전류의 고조파분석과 그림 8(d)과 비교하면 전류제어형 이 전압제어형에 비해 전류고조파 억제 측면에서 다소 유리한 점이 있다. 그러나 (e)와 그림 4(e)를 비교한다면 부하전압의 고조파 저감에 대해서는 전압제어형이 현저하게 성능우위를 점하고 있음을 확인할 수 있다.

표 1 시뮬레이션 모형의 시정수  
Table 1 Parameters of simulation model

정 격 용 량	2[kVA]
링크 인덕터	5[mH]
입 력 전 압	100[V]
정 격 부 하	10[Ω]
스 위 칭 주 파 수	10[kHz]
주 파 수	60[Hz]

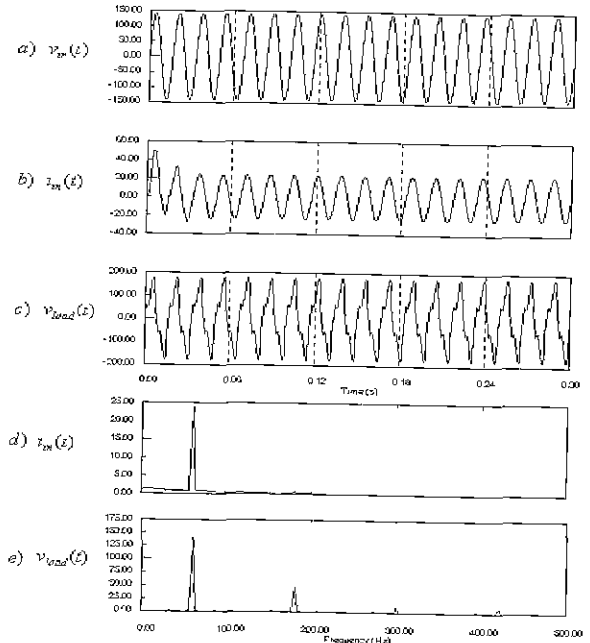


그림 4 전류제어형 능동전력필터의 파형 (a)입력전압 (b) 입력전류 (c)부하전압 (d)입력전류의 FFT (e)부하 전압의 FFT

Fig 4 Waveforms of current control APF

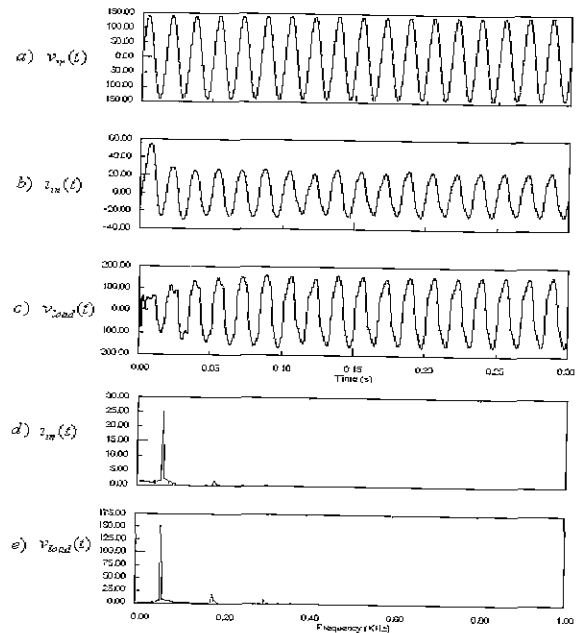


그림 5 전압제어형 능동전력필터의 파형 (a)입력전압 (b) 입력전류 (c)부하전압 (d)입력전류의 FFT (e)부하 전압의 FFT

Fig. 5 Waveforms of voltage control APF

### 5. 실험 및 고찰

전체 시스템은 그림 6과 같이 센서부, IPM (Intelligent Power Module) 모듈, 수동필터, 마이크로 컨트롤러로 구현된 제어기로 구성되어 실험을 하였다. 능동전력필터 출력전압 파형 개선을 위한 파형개선 제어기는 빠른 응답속도를 요구하므로 아날로그 소자를 이용하여 구현하였다. PWM 발생을 위하여 능동전력 필터 출력전압 지령치는 삼각파와 비교된다. 발생된 PWM은 IPM 드라이브를 통하여 각 스위치에 인가된다.

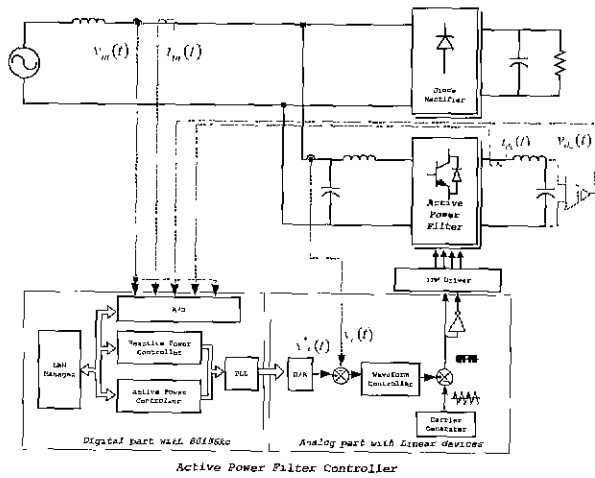


그림 6 전체 실험 시스템  
Fig 6 Overall experiment system

그림 7은 110[msec] 전에서 능동전력필터를 동작시 켜 부하전압 파형이 개선됨을 보여주고 있다.

그림 8은 능동전력필터로 개선된 입력전압과 입력전 류의 파형을 나타내고 있다. 부하에서 필요로 하는 무 효 전력분을 능동전력필터가 공급하므로 입력단 전류 는 유효성분만 부하에 공급하게 된다. 따라서 입력단 역률이 개선된 것을 알 수 있다.

그림 9은 능동전력필터로 개선된 입력전류와 전류에 대한 주파수 분석 결과를 나타낸다. 입력전류 파형은 거의 정현적이고 고조파가 저감됨을 확인할 수 있었 다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 전압제어형 능동전력필터를 다루었 다. 전력전자 소자의 사용이 급증함에 전력전자 소자 의 스위칭이나 강제 전류로 인한 고조파 발생과 역률

저하가 발생된다. 따라서 역률 보상과 고조파저감에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔고 그 중에 능동전력 필터가 가장 가능성 있는 대안으로 제시하고 있다.

본 논문에서 소개된 전압제어방식은 전류제어에 비 해 입력전압 변동에 강인한 장점을 갖는다. 또한 간단 한 위상제어 방식을 통하여 제어기 구성을 간략화 시킬 수 있다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 고조파 저감, 역률 개선 그리고 파형개선의 효과를 얻을 수 있었다. 제안된 기술은 무정전 전원장치나 배전계통의 역률 조 정기 등에도 적용되리라 사료된다.

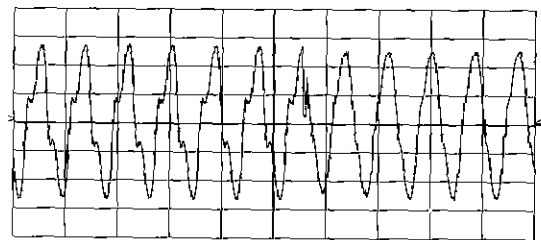


그림 7 부하전압의 개선(60v/div, 20m/div)  
Fig. 7 Improvement of load voltage

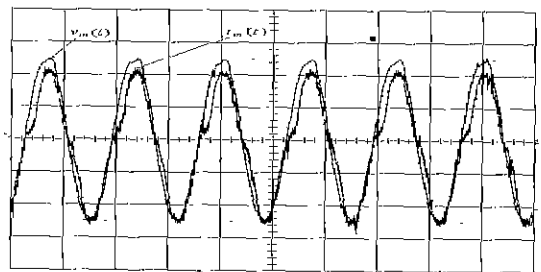


그림 8 개선된 입력 전류(2A/div)와 전압(60v/div, 10msec /div)  
Fig 8 Improved input current and voltage

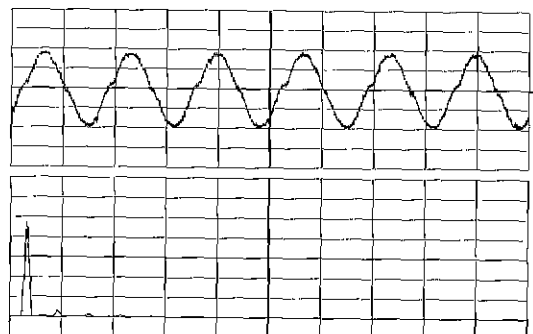


그림 9 개선된 입력 전류 파형(2A/div, 10msec/div) 과 FFT(0.7A/div, 0.2kHz/div)  
Fig. 9 Improved input current and FFT

참 고 문 헌

- [1] G.H Choe and M.H Park, "A new injection method for AC harmonic elimination by active power filter," *IEEE Trans. Ind. Electron*, Vol.35, No. 1, pp 141-147, Feb. 1988
- [2] S.Martinez, M.Castro, R.Antoranz and F.Aldana, "Off-line uninterruptible power supply with zero transfer time using integrated magnetics," *IEEE Trans. Ind. Electron*, Vol 36, No 3, pp. 441-445, Aug. 1989.
- [3] Jinn-Chang Wu and Hurng-Liahng Jou, "A new UPS scheme provides harmonic suppression and input power factor correction," *IEEE Trans. Ind. Electron*, Vol 42, No. 6, pp. 629-635, Dec. 1995
- [4] Hurng-Liahng Jon, Kuen DerWu and Jinn-Chang Wu, "A new parallel processing UPS with the performance of harmonic suppression and reactive power compensation," *IEEE Proceedings*, pp. 127-132. 1997.
- [5] W.Kelly and William F. Yadusky, " Rectifier Design for Minimum Line-Current Harmonics and Maximum Power Factor," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 332-341, April. 1992.

저 자 소 개



**김병진(金炳鎭)**  
 1970년 6월 26일생. 1994년 송실대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2000년 송실대학교 대학원 수료. 현재 현대중공업(주) 기전연구소 주임 연구원.



**문학룡(文學龍)**  
 1963년 11월 12일생. 1990년 송실대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1999년 송실대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료 현재 건설기술연구원 선임연구원.



**송양회(宋良會)**

1984년 송실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 송실대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료 1978~1995년 공업진흥청 국립공업기술원 공업연구소 1996~1998년 중소기업 국립기술 품질원 공업연구소. 1999년 ~ 현재 산업자원부 기술표준원 공업연구관



**임병국(林炳國)**

1951년 1월 17일생. 1978년 송실대학교 전기공학과 졸업 1980년 송실대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1999년 송실대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료 1987년 4월~현재 충주대학교 제어계측공학과.



**전희중(田喜鍾)**

1953년 1월 6일생. 1975년 송실대학교 전기공학과 졸업. 1977년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1977년~1981 8. 공군사관학교 전자공학과 교수부. 1987년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1995년 9월~1996년 4월 Univ of Victoria CA 객원교수. 1983년~현재 송실대학교 공과대학 전기공학과 교수.