

LMPC를 이용한 태양광발전소 인버터의 추종 제어

(Tracking Control of Solar Power Plant Inverter using Model Predictive Control of Laguerre Functions)

조옥래* · 차왕철 · 박정호 · 김재철**

(Uk-Rae Cho · Wang-Cheol Cha · Jung-Ho Park · Jae-Cheol Kim)

Abstract

Currently, the commonly used method for PWM(Pulse Width Modulation) Inverter of the Solar Power Plant. However, the limit of the developing performance to the non-linear and switch devices of the Inverter. Therefore, we propose a model predictive control techniques applied to Laguerre functions. LMPC(Laguerre functions model predictive control) reduces the number of computations made and so online implementation becomes possible where traditional MPC would have fail. In this paper, we comment on the appropriate scope and functions degree of the LMPC inverter control. The simulation results from MATLAB are also provided.

Key Words : LMPC, MPC, Inverter, Laguerre functions, PWM, MIMO, MATLAB

1. 서 론

태양광발전소 전력변환용 전압원 인버터(VSI) 제어는 PWM(Pulse Width Modulation) 방식이 주로 이용되고 있다. 인버터는 비선형성과 다중입·출력(MIMO)이 갖는 시스템적 특성을 가지고 있다. 또한

스위칭 소자(IGBT 등)의 역회복 지연과 잔류전류에 의한 스위칭 손실 등의 소자적 특성 한계로 인버터는 발전의 전환점에 직면하고 있다. 대안으로 모델예측 제어(MPC) 기법이 연구되고 있다. 하지만 MPC 기법은 모델 예측과 최적점 제어를 위해 많은 계산량이 요구되기 때문에 인버터와 같은 빠른 속도로 동작하는 비선형 시스템에 적용하는 것은 힘들었다[4-6].

본 연구에서는 이를 보완하기 위한 MPC의 다양한 방법중에서 Laguerre Functions를 이용한 인버터 제어 방법을 제시하고자 한다. LMPC는 함수 형태로 목적함수의 최적해의 계산이 간단하고, 처리 속도가 빠르다. LMPC 기법은 최근 비행기의 제트엔진 출력제어 등에 응용되고 있으며, 태양광발전소 인버터와 같은 시스템에도 운영이 가능할 것이다[4-6].

본 연구에서는 LMPC의 특징을 결정하는 제어범위

* 주저자 : 송실대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 송실대학교 전기공학과 교수
* Main author : Doctor course, Department of Electrical Engineering, Soongsil University
** Corresponding author : Professor, Department of Electrical Engineering, Soongsil University
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
접수일자 : 2014년 8월 25일
1차심사 : 2014년 8월 29일, 2차심사 : 2014년 9월 22일
심사완료 : 2014년 10월 4일

(N_c)와 *Laguerre Functions*의 차수(N) 간의 제어영향을 분석하였다. 향후 이를 활용하면 태양광발전소의 인버터 제어에 이용할 수 있음을 보여준다.

2. LMPC

2.1 LMPC 제어

LMPC는 모델예측제어 기법으로 미래의 시스템 출력을 예측하는데 *Laguerre Functions*를 사용하여 목적함수를 최적화한다. 최적화된 제어기 값은 유한구간 개루프 제어 입력을 폐루프 제어 형태로 구현된다. 모델예측제어를 시스템에 적용하기 위해 식 (1)과 (2)와 같은 이산 선형 시스템으로 나타낼 수 있다[4-6].

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

여기서 상태변수 $k=1, 2, 3, \dots$ 이며, 주어진 시간의 공정 상태 $x(k)$ 가 주어지면 이로부터 가상의 미래 제어 입력 $u(k+j|k)$ 를 계산하여 미래의 상태 $x(k+j|k)$ 를 예측할 수 있다. 유한한 미래 예측 구간을 설정하고, 그 구간 내에서 $u(k+j|k)$ 를 최적화하고, 이중 $u(k|k)$ 를 다음 시간의 제어 입력 $u(k)$ 로 사용한다 [4-6]. 모델예측제어 기법은 모델이 갖는 제약 조건을 예측을 통해 유한구간 최적문제를 해결할 수 있어, 시스템의 비선형성과 제약조건들을 고려하여 실시스템 적용에 적합한 제어기법이다. 태양광발전소 인버터와 같이 빠른 처리속도를 요구하는 시스템은 제어시스템의 간결성과 정확성이 필요하며 이산화된 수식화가 필요하다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해 종래의 모델예측제어 기법에 *Laguerre Functions*를 적용하여 계산량을 줄여 처리속도를 높이고, 목적함수 최적화를 통해 정확도를 높일 수 있다[4-6].

*Laguerre Functions*는 양자역학에서 고유값 계산을 위해 도입한 함수이며, 수소 원자의 양자역학 문제와 원자의 궤도 추적 등에 유용한 함수이다. 이를 활용하면 *Laguerre Functions*가 적용된 모델예측제어 기법

을 태양광발전소의 인버터에 사용할 수 있다[1-2].

2.2 LMPC Framework

LMPC는 *Laguerre Functions*를 사용한 모델예측 제어 기법으로 단일변수와 다변수의 시스템에 적용 가능한 제어 기법이다. 단일변수와 다변수의 시스템 접근 방법은 매우 유사하기 때문에 단일변수 기법으로부터 다변수로 확장하기 편리하다[7-8].

본 연구에서는 식의 복잡성을 줄이기 위해 단일변수 기법을 이용하여 LMPC를 유도 모델링하였다.

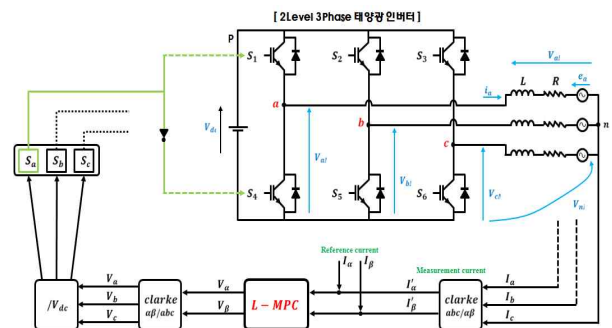


그림 1. LMPC를 이용한 태양광인버터 제어 블록도
Fig. 1. Control diagram of Solar Power Inverter using LMPC

그림 1은 LMPC를 이용한 태양광발전소의 3상 전압형 인버터 제어 블록도로 2Level 3Phase 형태로 전압과 전류를 clarke 변환에 의해 변환할 수 있다. 표준값에 의해 변환된 값과 기준신호와 측정된 신호를 *Laguerre Functions*를 이용한 예측제어모델로 비교 분석하여 적절한 제어신호 값으로 보정한 뒤 다시 clarke 변환을 이용하여 분리된 두 신호값을 한 개로 재결합한다. 인버터의 입력신호를 계속해서 보정하는 과정을 수행한다. 또한, 정확하고 빠른 처리를 위해 이산화와 목적함수의 최적화의 단계가 필수적으로 수행되어야 한다.

3. 이산화 (Discretization)

불연속적인 특성을 갖는 인버터를 공간 또는 시간적

인 형태의 데이터로 표현하기 위하여 이산화를 시행하며, 이렇게 이산화된 데이터는 계산으로 풀 수 있다. 이산화된 LMPC 기법을 적용한 인버터는 계산량을 줄일 수 있고, 정형화된 해를 가진 모델식으로 처리속도가 빨라 온라인 시스템 구현이 가능하다. 이를 활용하기 위하여 전방향 오일러(Forward Function)식을 이용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_\alpha(k+1) \\ I_\beta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - T_s \frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 1 - T_s \frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha(k) \\ I_\beta(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha(k) \\ V_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 상태변수 $k=1, 2, 3, \dots$ 이며, 이산화된 수식을 활용하면 선형모델의 경우 비선형모델에 비해 더 좋은 성능을 낼 수 있기 때문에 대부분의 디지털화된 기계장치의 구현에 선형 이산화 모델을 사용할 수 있다.

3.1 Laguerre Functions 이산시간

Laguerre Functions의 이산시간은 z -변환 형태의 식 (4)와 같이 표현된다[1-3].

$$\Gamma_1(z) = \frac{\sqrt{1-a^2}}{1-az^{-1}} \left(\frac{z^{-1}-a}{1-az^{-1}} \right)^{N-1} \quad (4)$$

식 (5)에서 극점(a)는 이산시간 Laguerre Functions의 제어범위와 차수에 따라 얻어지는 극점 값으로 안정범위는 $0 \leq a < 1$ 의 범위를 갖는다. z -변환식에서 Laguerre Functions의 차수(N)에 대한 관계식은 식 (5)와 같다[1-3].

$$\Gamma_k(z) = \Gamma_{k-1}(z) \left(\frac{z^{-1}-a}{1-az^{-1}} \right) \quad (5)$$

여기서, 상태변수 $k=1, 2, 3, \dots$ 이며, Laguerre Functions의 첫 번째 차수 $N=1$ 일 경우는 $\Gamma_1(z) = \frac{\sqrt{1-a^2}}{1-az^{-1}}$ 이며, 차수(N)가 올라 갈수록

$\left(\frac{z^{-1}-a}{1-az^{-1}} \right)$ 이 곱해짐을 알 수 있다[1-3].

$\Gamma_1(z)$ 의 역 z -변환은 $l_1(k)$ 이고, $\Gamma_2(z)$ 의 역 z -변환을 $l_2(k)$ 라 할 때, 즉 $\Gamma_N(z)$ 의 $l_1(k)$ 역 z -변환은 $l_N(k)$ 이며, 그룹화된 이산시간 Laguerre Functions의 벡터 형태로 나타낼 수 있다. 이산시간 Laguerre Functions를 미분방정식 형태로 나타내면 식 (6)과 같다[1-3].

$$L(k+1) = A_L L(k) \quad (6)$$

여기서 상태변수 $k=1, 2, 3, \dots$ 이며, 비선형적인 시스템을 선형적인 시스템으로 해석하기 위한 행렬식은 $N \times N$ 의 크기를 갖고, 극점(a)와 $\beta=1-a^2$ 에 의한 함수로 정의된다. 이산시간 Laguerre Functions의 미분 형태 초기치는 식 (7)과 같다.

$$L(0)^T = \sqrt{\beta} [1 - a \ a^2 \ \dots \ (-1)^{N-1} \ a^{N-1}] \quad (7)$$

$N=3$ 인 경우의 행렬식과 이산시간 Laguerre Functions의 미분형태 초기값 $L(0)$ 는 식 (8)과 같은 하삼각 행렬식으로 표현할 수 있다[1-3].

$$\begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ \beta & a & 0 \\ -a\beta & \beta & a \end{bmatrix}, \quad L(0) = \sqrt{\beta} \begin{bmatrix} 1 \\ -a \\ a^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2 시스템상에서 이산화 표현

안정한 시스템의 임펄스 응답을 $H(k)$ 라 할 때 이산 시간 임펄스 응답식은 식 (9)와 같다[1-3].

$$H(k) = c_1(k)l_1(k) + c_2(k)l_2(k) + \dots + c_N(k)l_N(k) \quad (9)$$

여기서 상태변수 $k=1, 2, 3, \dots$ 이며, c_1, c_2, \dots, c_N 는 시스템 특성을 결정하는 시스템 계수이다. 이산시간 Laguerre Functions는 직교 함수(Orthogonal Functions) 특성을 가지므로 $l_1(k)l_1(k) = 1$, $l_1(k)l_i(k) = 0 (i \neq 1)$ 이 된다. 따라서 시스템 계수 c_i 의 i 번째 값은 식 (7)의 양변에 l_i 를 곱함으로써 구할

수 있다. 일반화된 시스템 계수 c_i 의 값은 식 (10)과 같다. 여기서 $i=1,2,\dots,N$ 이며, 상태변수 $k=1, 2, 3, \dots$ 이다[1-3].

$$c_i = \sum_{k=0}^{\infty} H(k)l_i(k) \quad (10)$$

4. 시뮬레이션

시뮬레이션으로는 수치분석 및 시스템 모델링이 가능한 MATLAB 툴을 이용하여 LMPC의 제어설정 파라미터인 제어범위(N_c)와 *Laguerre Functions*의 차수(N)에 대한 영향을 분석하였다. 제어범위(N_c)와 차수(N) 사이의 관계식은 극점(a)을 이용하여 식 (11)과 같이 도출하여 시뮬레이션하였다.

$$a = e^{-\frac{N}{N_c}} \quad (11)$$

시뮬레이션에 적용된 모델은 최근 태양광발전소에 흔하게 적용되는 설비를 기준으로 인버터는 500kW급을 사용하였으며, 케이블은 F-CV 185mm²로 길이는 전압강하율 1% 미만을 고려하여 300m로 적용하였다. 세부적인 모델 파라미터는 표 (1)과 같이 정리하였다.

표 1. 모델 파라미터
Table 1. Model Parameter

Parameter	Value
Load resistance, R	0.06Ω
Load inductance, L	0.76mH
DC link voltage, V_{dc}	750V
Reference current	780A
Sampling time, T_s	5m.Sec

4.1 극점과 제어범위에 따른 LMPC 제어기 특성

극점(a)와 제어범위(N_c)의 변화에 따른 LMPC의 제어 특성을 분석하기 위해 *Laguerre Functions*를 5차

로 고정하고 표 (2)와 같이 극점(a)와 제어범위(N_c)를 조정하여 모델링하였다.

표 2. N=5로 고정한 파라미터
Table 2. Fixed N=5 Parameter

Fixed N	Chosen a	Resulting control horizon N_c
5	0.1	2
5	0.5	8

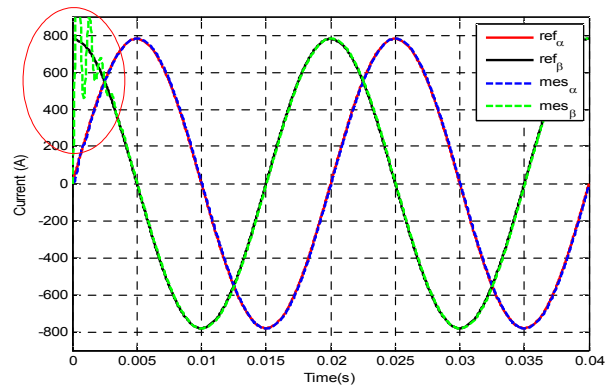


그림 2. 부하 전류 (N=5, a=0.1, Nc=2)
Fig. 2. Load current (N=5, a=0.1, Nc=2)

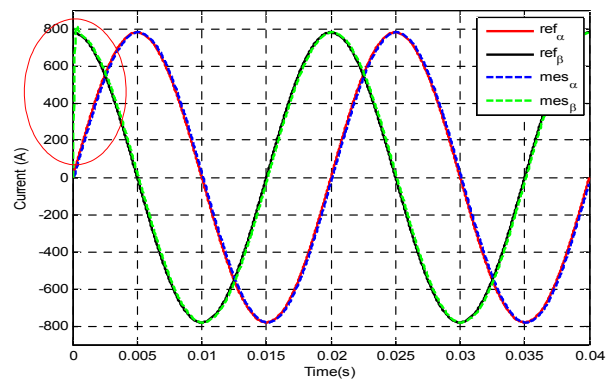


그림 3. 부하 전류 (N=5, a=0.5, Nc=8)
Fig. 3. Load current (N=5, a=0.5, Nc=8)

차수(N)가 5차일 때 극점(a)와 제어범위(N_c)에 따른 LMPC 제어 특성은 그림 2, 3과 같이 제어범위(N_c)가 증가할수록 최대 침두치 값을 감소시키고 빠르게 정상상태에 도달하였다. 제어범위(N_c)를 증가될 경우 계산량 대비 오차 정정이 적었으며, 위 조건에서는 제어범위(N_c)가 8일 때 가장 정확하게 추종하였다.

4.2 차수와 제어범위에 따른 LMPC 제어기 특성

표 3. a=0.8로 고정한 파라미터
Table 3. Fixed a=0.8 Parameter

Fixed a	Chosen N	Resulting control horizon Nc
0.8	1	5
0.8	5	23

Laguerre Functions의 차수(N)와 제어범위(Nc)의 변화에 따른 LMPC 제어 특성을 분석하기 위해 극점(a)을 0.8로 고정하고 표 (3)과 같이 차수(N)와 제어범위(Nc)를 조정하여 모델링하였다.

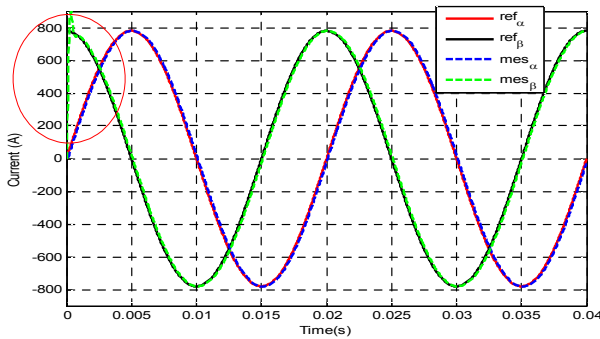


그림 4. 부하 전류 (a=0.8, N=1, Nc=5)
Fig. 4. Load current (a=0.8, N=1, Nc=5)

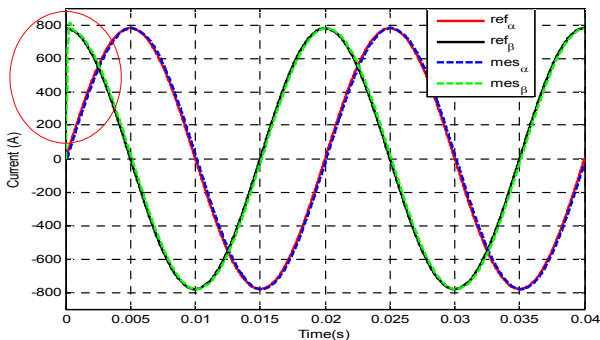


그림 5. 부하 전류 (a=0.8, N=5, Nc=23)
Fig. 5. Load current (a=0.8, N=5, Nc=23)

극점(a)이 0.8일 때 차수(N)와 제어범위(Nc)에 따른 LMPC 제어 특성은 그림4, 5와 같이 Laguerre Functions의 차수(N)와 제어범위(Nc)가 증가할수록

부하전류의 침투치가 줄었다. 그러나 스위칭 소자 (IGBT, MOSFET 등)로 제어되는 인버터에 LMPC 기법을 적용하는 것은 스위칭 시간에 맞는 On, Off 동작에 한정될 수 밖에 없으므로 모델예측제어의 제어범위(Nc)는 제한될 수 밖에 없다. 4.1 실험과 비교하였을 때, 극점(a)의 증가는 빠른 정상상태 응답을 보이지만, 그에 따른 더 큰 제어범위(Nc)가 요구되었다.

4.3 차수와 극점에 따른 LMPC 제어기 특성

표 4. Nc=50로 고정되었을 때 파라미터
Table 4. Fixed Nc=50 Parameter

Chosen N	Required a	Target Control Horizon Nc
4	0.9231	50
10	0.8187	50

Laguerre Functions의 차수(N)와 극점(a)의 변화에 따른 LMPC 제어 특성을 분석하기 위해 제어범위(Nc)를 50으로 고정하고 표 (4)와 같이 극점(a)과 차수(N)를 조정하여 모델링하였다.

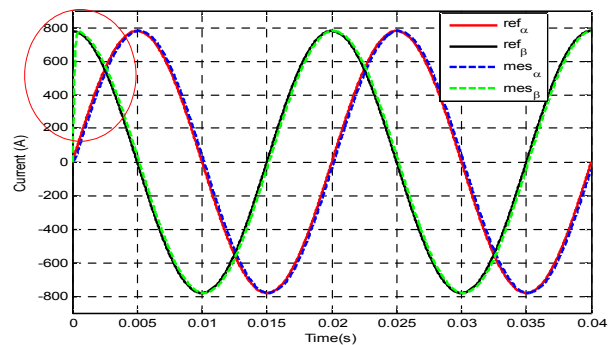


그림 6. 부하 전류 (Nc=50, N=4)
Fig. 6. Load current (Nc=50, N=4)

제어범위(Nc)가 50일 때 차수(N)과 극점(a)에 따른 LMPC 제어 특성은 그림 6, 7과 같이 제어기 제어범위(Nc)가 큰 경우 침투치의 정상상태 추종이 차수(N)와 극점(a)의 값에 미소하게 제어성능을 개선하였다. 제한된 제어범위(Nc) 내에서 차수(N)의 조정에 따른 영향은 일정 차수(N)까지는 추종성능이 개선되지만, 그 이상에서는 추종의 정확도는 크게 개선되지 않았다.

시뮬레이션 결과 4차에서 10차 내에서 가장 적절하게 기준신호를 추종하였다.

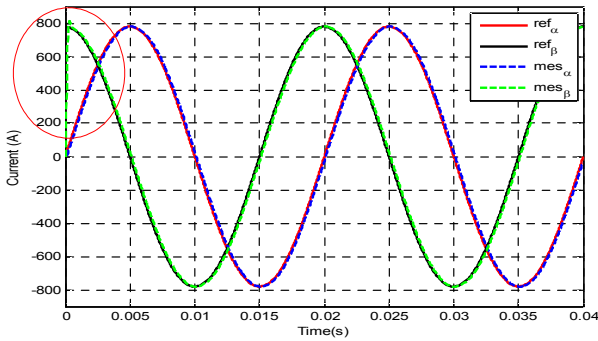


그림 7. 부하 전류 (Nc=50, N=10)
Fig. 7. Load current (Nc=50, N=10)

5. 결 론

본 연구에서는 태양광발전소의 전력변환용 인버터가 갖는 비선형성과 소자적 특성 한계를 극복하기 위한 대안으로 LMPC 제어 기법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과 LMPC는 기준신호를 *mSec* 단위에서도 정확하게 추종하였다. 이는 태양광발전소 인버터와 같이 빠른 처리속도가 요구되는 시스템에도 적용 가능함을 보여준다. LMPC 제어는 처리속도를 고려할 때 제어범위(N_c)가 충분하면 추종의 정확도가 증가하였다. *Laguerre Functions*의 차수(N)는 고차로 갈수록 정확도는 높았지만, 계산량 대비 오차 정정 효율이 작기 때문에 4차에서 10차 이내가 적절하였다. 결과에 기반하여 LMPC 제어 특성을 정확하게 고려하면, 기준신호를 정확하게 추종할 수 있는 시스템을 만들 수 있을 것이다. 이는 태양광발전소의 인버터 모델예측 제어 시스템에 유용하게 이용될 수 있다.

References

[1] J.A. Rossiter and Liuping Wang Exploiting Laguerre functions to improve the feasibility/performance compromise in MPC, Journal 47th IEEE Conference on Decision and Control Cancun, Mexico, Dec. 9-11, 2008.
[2] Liuping Wang, Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB, 2009.
[3] Tim Barry and Liuping Wang, A Model-free Predictive

Controller with Laguerre Polynomials, 2004 6th Asian Control Conference.
[4] William J. Palm III, System Dynamics, Second Edition, McGraw Hill, 2008.
[5] J.M. Maciejowski, Predictive Control with Constraints, First Edition, Prentice Hall, 2002.
[6] T. Kailath, Linear Systems, Prentice Hall, 1980.
[7] B.D.O Anderson, J.M Moore, Linear Optimal Control, Prentice Hall, 1971.
[8] Y. Gao, C.G.Lee and K.T. Chong Receding horizon tracking control for wheeled mobile robots with time-delay, Journal of Mechanical Science and Technology 22 (2008) 2403-2416.9.

◆ 저자소개 ◆



조옥래 (趙昱來)

1972년 6월 11일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 2000년~현재 한전KDN 근무.
Tel : (02)6262-6391
Fax : (02)6262-6399
E-mail : ukrae@kdn.com



차왕철 (車旺哲)

1969년 4월 29일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 1995년~현재 국방부 근무.
Tel : (02)3411-9177
E-mail : chalsking@hanmail.net



박정호 (朴廷浩)

1968년 3월 9일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 1992년~현재 한국전기안전공사 근무.
Tel : (02)710-8583
Fax : (02)817-0780
E-mail : pjh051i@kesco.or.kr



김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) 현재 숭실대학교 전기공학과 교수. 본 학회 회장.

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