

# $H_{\infty}$ 알고리즘을 이용한 Dynamic Voltage Restorer의 제어

論 文
50D-12-1

## Dynamic Voltage Restorer Control Using $H_{\infty}$ Algorithm

全 瑩 煥\* · 金 志 元\*\* · 全 鎮 洪\*\*\*  
(Yeong-Han Chun · Ji-Won Kim · Jin-Hong Jeon)

**Abstract** - Recent trend of increasing automated factories needs supply of high quality power from the utilities. Among the items of the power quality, voltage sag can be compensated by Dynamic Voltage Restorer(DVR). The key feature of the DVR is high response with less transient period to recover from the voltage sag due to the lightning or line-to-ground faults. In this paper we report that  $H_{\infty}$  controller is very promising for the practical application to the controller of DVR. Experimental results shown in this paper was obtained by applying the control algorithm to 20 kVA DVR system. The experimental set consists of IGBT-based three phase inverter and the TMS320C32-60 DSP used for main processor of the control board. To simulate the 50% voltage sag, the SCR-based experimental set was constructed.

**Key Words** : DVR, Voltage, Robust Control, Inverter

### 1. 서 론

최근 들어 컴퓨터를 기반으로 하는 자동화 시스템의 사용이 증가하고 있다. 그러나 산업현장에 사용되는 기기가 고도화되고 정밀한 동작을 수행하게 됨에 따라서 기기에 공급되는 전력의 품질이 매우 중요한 문제로 떠오르고 있다. 전력의 품질을 나타내는 항목에는 고조파, 정전 또는 surge등의 여러 항목이 있지만 이중에서도 근래에 가장 중요한 문제로 인식되는 것은 순간전압강하이다. 순간전압강하는 컴퓨터나 각종 공정 제어기 등의 오동작의 원인이 되어 막대한 경제적 손실을 유발하는 것으로 보고되고 있다[1,2]. 예로서 미국의 경우 전력 품질 문제에 의해 연간 약 \$200억 이상의 손실이 발생하는 것으로 보고되고 있으며 이중 80% 정도가 전압의 품질 문제에 기인한 것으로 보고되고 있다. 또한 국내에서도 반도체 공장 1개소에 대해서 순간전압강하에 의하여 연간 약 2,000억원 이상의 손실이 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이렇게 막대한 경제적 손실을 유발하는 순간전압강하를 보상하기 위한 기기 중 하나로는 Dynamic Voltage Restorer(DVR)이 있다 [3,4]. DVR은 반도체 스위칭 소자를 이용한 DC-AC 컨버터와 전력계통에 직렬로 연결되는 변압기를 통하여 전력계통에 AC 전압을 주입함으로써 순간전압강하를 보상하는 장치이

다. 그러나 DVR의 동작에서 문제점의 하나가 계통에 직렬로 연결되는 변압기의 동작이다. 변압기는 이상적으로 1차측 전압과 2차측 전압이 상수비로 나타나게 되지만, 누설 리액턴스와 저항에 의한 전압강하가 발생하게 된다. 이러한 전압강하의 발생은 변압기의 출력 전압 제어시 외란으로 작용하여 정확한 주입 전압의 출력을 방해하게 된다. 따라서 일반적으로 DVR에 사용되는 변압기는 누설 리액턴스와 저항을 현저하게 줄이기 위하여 특수하게 제작되어야 한다. 그러나 변압기를 특수 제작하는 것은 결과적으로 DVR의 가격상승을 유발하게 된다. 본 논문에서는 실험을 통하여  $H_{\infty}$  제어 알고리즘을 적용하여 DVR의 출력전압을 제어함으로써 별도의 특수 제작한 변압기를 사용하지 않더라도 DVR의 출력전압을 정확하게 제어할 수 있음을 증명하였다. 적용된  $H_{\infty}$  제어 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 PID 제어기와 비교한 결과를 나타내었다.

### 2. 본 론

#### 2.1. Dynamic Voltage Restorer 개요

DVR은 한 선로에서 지락 및 단락 사고 등이 발생할 때 동일 변압기에서 인출된 다른 선로에 연결된 부하에 순간 전압강하현상이 일어나는 것을 방지하기 위한 장치이다. 일반적으로 DVR은 3상 인버터로 구성되어 있으며, 직렬 삽입 변압기를 통하여 계통에 전압을 주입하도록 구성된다. 전체적인 구성도는 그림 1과 같다.

\* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 員 FACTS&PQ그룹장

\*\* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 員 先 任 研 究 員

\*\*\* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 員 研 究 員

接受日字 : 2001年 9月 19日

最終完了 : 2001年 11月 19日

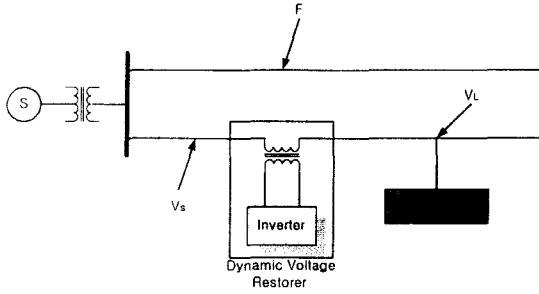


그림 1. DVR의 계통 연계 구성도  
Fig. 1. Interconnection diagram of DVR

그림 1에서 보듯이 DVR은 F 지점에 사고가 발생하여  $V_s$  지점에 전압 강하가 발생할 경우 계통에 직렬로 연결된 변압기를 통하여 전압을 주입함으로써  $V_L$ 에서는 순간 전압 강하를 경험하지 않도록 하는 장치이다. 즉, 전원전압을  $V_s$  라고 하고 부하전압 및 변압기의 2차측 전압인 DVR 출력 전압을 각각  $V_L, V_{DVR}$ 이라고 할 때, 식 (1)과 같이 키르히호프의 전압 법칙에 의하여 DVR 출력 전압을 조정함으로써 부하전압을 일정하게 유지할 수 있다.

$$V_L = V_s + V_{DVR} \quad (1)$$

여기서 이상적인 변압기의 경우  $V_{DVR}$ 은 변압기 1차측 입력전압과 turn 비(ratio)에 의하여 출력되어야 한다. 그러나 실제적인 변압기에서는 변압비를 1:1로 가정하고 변압기 1차측 입력전압을  $V_{DVR-IN}$ , 변압기 누설 임피던스를  $X$ 라고 하고 부하에 흐르는 전류를  $i_L$ 이라고 할 때, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V_{DVR} = V_{DVR-IN} - X \times i_L \quad (2)$$

식 (2)에서 보듯이 DVR의 출력 전압은 부하전류에 따라서 달라지게 되며, 이는 DVR의 출력전압 제어를 어렵게 하는 요인이 된다. 따라서 직렬로 연결되는 변압기는 특수 제작하여 가능한 2차측 단자간의 임피던스를 작게 설계하고 있다.

## 2.2 $H_\infty$ 제어기 설계

### 2.2.1 시스템 모델링

인버터의 출력이 저 대역 필터를 통해 주입 전압으로 나타나기 때문에 시스템의 전달함수는 식 (3)과 같이 저 대역 필터의 다이내믹스가 된다.

$$P(s) = \frac{1}{1+LCs^2} \quad (3)$$

여기서,  $L = 4 \text{ mH}$ ,  $C = 2.5 \text{ } \mu\text{F}$

### 2.2.2 $H_\infty$ 제어 알고리즘

참고문헌[10]에서 자세히 설명이 된 바와 같이 페루프 안정화 제어기는 전달함수의 행렬식에 대한 무한대 노름(norm)을 최소화하는 DGKF 알고리즘[10]에 의해 얻어진다. 이 행렬식은 그림 2의 확장 플랜트로부터 쉽게 얻을 수 있다.

$$\min_{K(s)} \begin{vmatrix} W_1(s)S(s) & W_3(s)T(s) \\ W_u(s)K(s)S(s)W_1(s) & W_u(s)K(s)S(s)W_3(s) \\ W_1(s)S(s) & W_3(s)S(s) \end{vmatrix}_\infty \quad (4)$$

여기서,  $T(s) = \frac{K(s)P(s)}{1 + K(s)P(s)}$ ,

$$S(s) = \frac{1}{1 + K(s)P(s)}$$

그림 2는  $H_\infty$  최적화를 위한 확장 플랜트를 나타내고 있으며, 이러한 확장 플랜트를 어떻게 구성하느냐에 따라 가중함수를 선택하는 방법이 결정되며, 확장 플랜트와 가중 함수에 의해 페루프 시스템의 강건성과 제어기의 성능이 결정되게 된다.  $H_\infty$  최적화 이론의 장점으로 제어기의 강건성을 제어기 설계시 곧 바로 고려하여 제어기를 디자인 할 수 있다는 것이지만, 실제로는 이와 같은 확장플랜트의 구성 방법과 가중 함수의 결정 방법이 제어기를 설계하는 엔지니어의 지식과 제어 시스템에 대한 노하우가 필요하다는 단점도 가지고 있다.

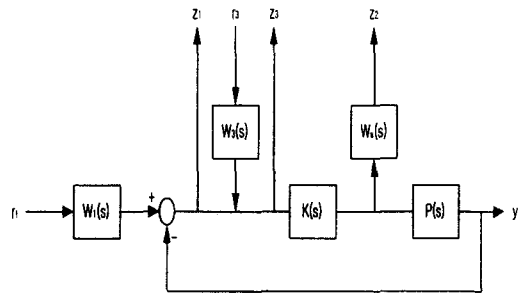


그림 2.  $H_\infty$  최적화를 위한 확장 플랜트

Fig. 2. Augmented plant for  $H_\infty$  optimization

가중 함수  $W_1(s), W_3(s), W_u(s)$ 는 주파수 도메인에서 시그널의 주파수에 대한 정보를 나타내며, 제어기의 특성을 좌우하게 된다. 가중함수  $W_1(s)$ 는 제어기의 성능을 결정하며, 가중함수  $W_3(s), W_u(s)$ 는 제어기의 강인성을 나타낸다. 일반적으로  $H_\infty$  제어기는 강인성을 보장한다고 알려져 있지만, 제어기의 설계는 성능과 강인성 사이의 trade-off를 결정하는 문제이므로 강인성을 결정하는 가중함수의 크기에 따라 강인성의 정도가 다르게 나타난다. 또한 제어기가 tracking 문제에서 성능을 발휘하기 위해서는 저주파수 영역에서 높은 이득을 가지도록 설계가 되어야 하며, 고주파 잡음이나 모델링 오차에 대해서 강인성을 가지기 위해서는 고 주파수

영역에서 낮은 이득을 가져야 한다. 이와 같은 제어기를 설계하기 위해서 가중함수  $W_1$ 은 단조감소함수, 그리고 가중함수  $W_3$ ,  $W_u$ 는 단조증가함수가 되도록 선정하였으며, 구체적인 수치는 몇 번의 시행 착오를 거쳐 결정하였다.

DVR의 설계에서 이용한 가중함수는 식 (5) - (7)과 같다.

$$W_1(s) = \frac{1}{0.01s + 1} \quad (5)$$

$$W_3(s) = \frac{0.1(s + 100)}{0.001s + 100000} \quad (6)$$

$$W_u(s) = \frac{100(s + 100)}{0.001s + 1000000} \quad (7)$$

그림 2의 확장플랜트 구조에서 위 식에서 주어진 가중함수에 의해 구해진 제어기의 형태는 식 (8)과 같다.

$$K(s) = \frac{3.656 \times 10^{-5} s^3 + 4.022 \times 10^4 s^2 + 3.657 \times 10^{12} s + 3.656 \times 10^{16}}{s^4 + 4.434 \times 10^4 s^3 + 8.293 \times 10^8 s^2 + 8.139 \times 10^{12} s + 8.056 \times 10^{14}} \quad (8)$$

### 2.3 Dynamic Voltage Restorer 실험장치

본 논문에서는 실험을 위하여 Dynamic Voltage Restorer prototype을 제작하였다. 본 논문에서 제작한 DVR의 prototype은 크게 3상 인버터와 DC-DC 컨버터 그리고 연계장치로 구성되어 있다. 3상 인버터는 각 상을 독립적으로 제어할 수 있도록 하기 위하여 "split-capacitor" 형태로 구성하였으며, DC-DC 컨버터는 인버터의 DC link 전압을 유지하기 위해 사용된다. 연계장치는 스위칭 노이즈를 없애기 위한 L-C 필터와 계통에 직렬로 연결되는 직렬변압기 및 bypass 스위치로 구성된다. 그림 3에 전체시스템의 구성도를 나타내었다.

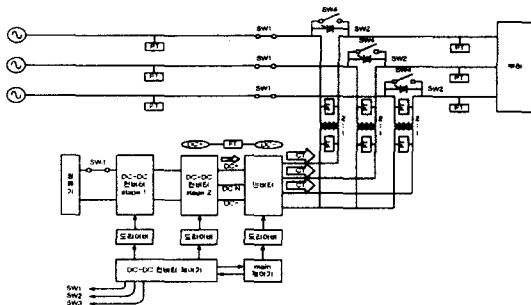


그림 3. 전체시스템 구성도  
Fig. 3. Overall system configuration

DC-DC 컨버터는 승압형 컨버터로 보통 입력전원의 2까지 승압하여 쓰는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 DC link 전압을 600[V]로 설정하였고, 입력 AC 전원의 50%까지 전압강하가 발생하는 것을 모의하였기 때문에 그림 3에서 보듯이 DC-DC 컨버터를 2 stage로 구성하여 최대 입력 DC 전압의 4배까지 승압하여 사용할 수 있도록 하였다. 그림 4에 본 논문에서 제작한 DVR prototype의 사진을 나타내었다.

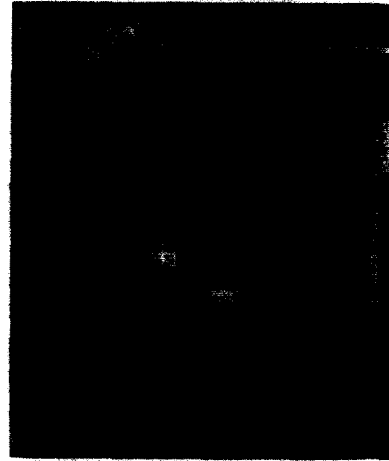


그림 4. 제작된 DVR  
Fig. 4. Photograph of DVR set

DVR prototype의 제어기로는 TI사의 TMS320C32-60 DSP를 이용하여 제어보드를 설계 및 제작하였다. 그림 5에 본 논문에서 제작한 제어기의 사진을 나타내었다.

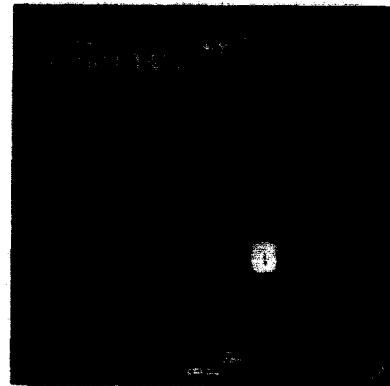


그림 5. 제작된 DSP 제어기  
Fig 5. Photograph of DSP controller

또한 계통고장으로 인한 순간전압 강하를 모의하기 위해 그림 6과 같이 SCR을 이용하여 모의 순간전압 강하장치를 구성하였다. 그림 6의 모의 순간전압 강하장치는 3상을 독립적으로 50%와 80%의 순간전압 현상을 모의 할 수 있는 장치로 변압기의 탭절환기(tab-change)를 이용하여 장치를 구성하였다.

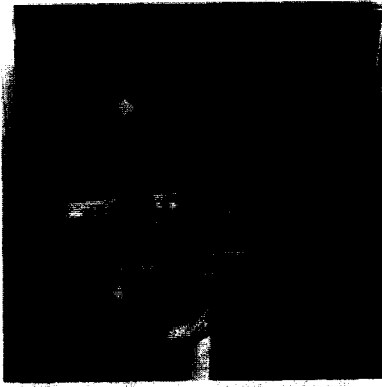


그림 6. 순간전압 강하 모의장치  
Fig. 6. Photograph of voltage drop generator

2.4 PID 제어기와 H<sub>∞</sub> 제어기의 실험결과 비교

본 논문에서는 약 0.7[sec] 정도의 시간동안 50%의 순간전압 강하를 모의하고 이때 DVR의 동작을 실험하였다. 여기서는 PID제어기를 적용한 결과와 H<sub>∞</sub> 제어기를 적용한 결과를 비교하였다. 먼저 그림 7에 순간전압 강하가 발생하는 전원측의 전압과 PID 제어기를 이용하여 보상하는 경우 부하전압 및 H<sub>∞</sub> 제어기를 이용하여 보상하는 경우 부하전압을 나타내었다. 그림 7에서 알 수 있듯이 PID 제어기를 사용하여 제어한 결과에서는 부하전압의 크기가 계통전압이 50%까지 강하된 경우에 부하전압은 약 80% ~ 90% 정도를 유지하고 있는 것을 알 수 있으며, DVR의 보상시작 순간에서의 과도상태를 제외하면, 대체적으로 파형은 양호한 것을 알 수 있다. 여기에서 PID제어기는 I 이득과 D 이득이 매우 작아서 P 제어기와 같은 성능을 보이고 있다. H<sub>∞</sub> 제어기를 적용한 결과 전원전압에서 50%의 순간전압강하가 발생한 경우 부하전압은 거의 100% 원래전압으로 복원되어 전원전압의 순간전압강하 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

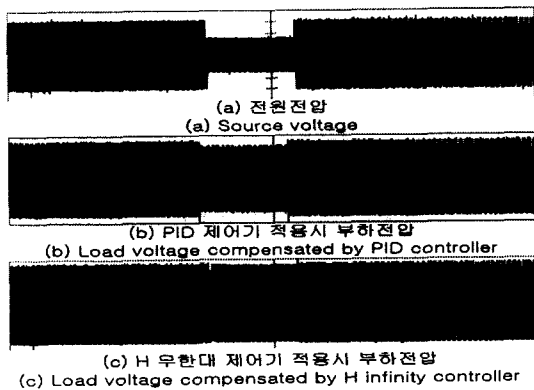


그림 7. DVR의 보상실험 결과  
Fig. 7. DVR compensation results

그림 8에는 PID 제어기를 적용한 경우와 H<sub>∞</sub> 제어기를 적용한 경우에 대한 정량적인 분석을 위하여 제어 결과를 확대하여 표시하였다.

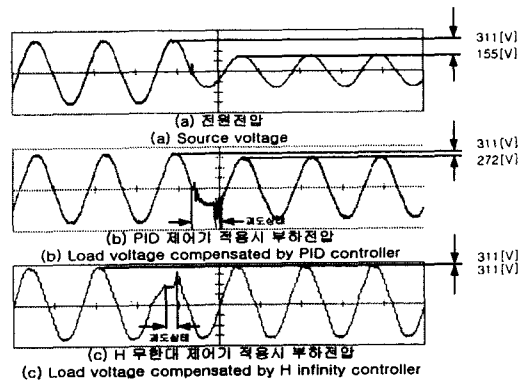


그림 8. 제어결과 분석  
Fig. 8. Analysis of control results

그림 8에서 보듯이 전원전압에서 전압의 최대치가 311 [V]에서 155 [V]로 강하하는 경우, PID 제어기를 적용하여 DVR을 제어하면 복원된 전압의 최대치는 사고전 전압의 최대치인 311 [V]보다 작은 272 [V]를 유지한다. 이것은 PID 제어기를 적용하는 경우 최대 87 [%] 정도까지만 전압을 복원 할 수 있음을 나타낸다. 한편 H<sub>∞</sub> 제어기를 적용한 경우는 사고전 전압과 거의 같은 크기의 전압으로 복원되는 것을 확인하였다. 또한 보상을 시작하는 과도상태에서도 PID 제어기를 적용한 경우에는 약간의 진동을 동반하여 0.5 싸이클 정도의 과도상태를 거친 후에 정상상태에 도달하지만 H<sub>∞</sub> 제어기를 적용한 경우에는 거의 과도상태 없이 정상상태에 도달하는 것을 확인하였다.

3. 결 론

일반적으로 DVR의 경우 제어의 성능은 직렬 변압기의 누설 임피던스에 의한 전압강하가 제어기에 외란으로 작용하여 성능을 악화시키는 역할을 하게 된다. 이러한 영향을 줄이는 방법이 변압기의 누설 임피던스를 작게 설계하는 방법과 제어기의 성능을 향상시키는 방법이 있다. 본 논문에서는 순간전압강하에 대한 보상 기기인 Dynamic Voltage Restorer의 출력전압 제어에 대하여 H<sub>∞</sub> 제어 알고리즘을 적용하여 직렬 주입 변압기를 낮은 누설 임피던스를 갖도록 특수하게 제작하지 않고 일반 변압기를 사용하더라도 정확하게 제어 할 수 있음을 보였다. DVR의 출력전압 제어에 H<sub>∞</sub> 제어 알고리즘을 적용한 결과 기존의 PID제어기에 비해 상당히 양호한 과도 응답과 정상상태응답을 얻을 수 있음을 확인하였다. 제어기를 설계하여 시뮬레이션으로 검증하는 절차는, 이론적으로 페루프 시스템의 고유치가 좌반평면에 존재하는 한 안정하며, 성능도 매우 우수한 것으로 나타난다. 그러나 본 연구에서 제어 대상으로 하는 DVR의 경우 필터의 다이내믹스가 제어 대상이 되며, 일반적으로 필터의 공진 주파수가 매우 높기 때문에 제어 대상 플랜트의 전달함수를 1로 보아도 무방하다. 이렇게 간단한 시스템에 대해서도 고전적인 PID 제어기에 비해서 H<sub>∞</sub> 제어기가 실험적으로 매우 유용한 것으로 나타났다. 추후의 과제로는 변

압기의 모델 identification을 통한 누설 임피던스의 추정을 통하여 adaptive robust control 알고리즘을 구현하고 이를 적용하여 부하의 변동에 관계없이 DVR의 출력전압을 정확하게 제어할 수 있는 방안을 연구하는 것이다.

참 고 문 헌

[1] N. H. Woodley, "Tomorrow's Custom Energy Center Using Emerging Power Electronics", <http://www.powerquality.com/art0038/art1.htm>

[2] N. H. Woodley, L. Morgan, A Sundaram, "Experience with an Inverter Based Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans. on PD, Vol.14, No.3, July 1999

[3] R. J. Nelson, N. H. Woodley, D. G. Ramey, E. M. Gulachenski, "Requirements for Dynamic Voltage Restoration to Relieve Distribution System Voltage Sags", American Power Conference, April, 1995

[4] K. Chan, A. Kara, "Voltage Sags Mitigation with an Integrated Gate Commutated Thyristor Based Dynamic Voltage Restorer", 8th Intern. Conf. on Harmonics and Quality of Power, October 14-16, 1998

[5] B. Shahian, M. Hassul, *Control System Design Using MATLAB*, Prentice Hall, pp.395-454, 1993

[6] J. C. Doyle, B. A. Francis, A. R. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan, 1992

[7] J. M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley, 1989

[8] K. Zhou, *Robust and Optimal Control*, Prentice Hall, 1996

[9] M. Green, D. J. N. Limebeer, *Linear Robust Control*, Prentice Hall, 1995

[10] Doyle, J. C. and K. Glover and P. Khargonekar and B. Francis, "State-space solution to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  problems", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 34, no. 8, pp. 831-847, 1989

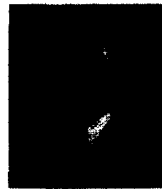
저 자 소 개



전 영 환 (全 瑩 煥)

1961년 2월 8일 생. 1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동경대 대학원 공학부 졸업(공학박사). 1986년~1996년 한국전기연구원 연구원. 1996년~1998년 동경대 공학부

조수. 1998년~현재 한국전기연구원 선임연구원, FACTS&PQ 그룹장



전 진 홍 (全 鎭 洪)

1972년 12월 16일 생. 1995년 성균관대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 한국전기연구원 연구원.

Tel : 055-280-1355, Fax : 055-280-1476  
E-mail : jhjeon@keri.re.kr



김 지 원 (金 志 元)

1971년 9월 20일 생. 1994년 서울시립대 제어계측공학과 졸업. 1999년 광운대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1996년~현재 한국전기연구원 선임연구원.

Tel : 055-280-1335, Fax : 055-280-1476  
E-mail : jwkim@keri.re.kr