

# HVDC 컨버터 시스템에서 라디오 장애에 대한 대책

## Reduction Method of Radio Interference in HVDC Converter System

김 찬 기<sup>†</sup> · 최 순 호<sup>\*</sup>  
 (Chan-Ki Kim · Soon-Ho Choi)

**Abstract** - In HVDC System, the rapid voltage breakdown between anodes and cathodes during valve firing causes radio interference in HVDC converter station. These voltage breakdown causes steep current pulse and inject current in system. As a result, harmonic frequencies are generated from valve, switchyard. In this paper, theoretical background of radio interference in HVDC converter is discussed and its reduction method for radio interference is proposed.

**Key Words** : Radio interference, HVDC system, Thyristor valve voltage drop

### 1. 서 론

HVDC 변환소에서는 두가지 형태의 라디오 장애가 발생하는데, 첫 번째는 AC시스템과 비슷하게 선로나 애자 그리고 피뢰기와 같은 기기에서 코로나 방전에 의한 라디오장애와 사이리스터 밸브가 점호동안에 애노드와 캐소드간 전압이 급격히 변화하기 때문에 이로 인한 컨버터 밸브의 라디오 장애가 발생한다. 즉, 컨버터 밸브 점호 동안 애노드와 캐소드 간 전압은 수 ms 이내에 영(零)에 가까워지고, 밸브 전압의 급속한 감소는 모선, 밸브 홀 및 스위치 야드에서 전자기파 방사 및 방사가 일어날 수 있는 충분히 높은 주파수를 갖는 과도 전류를 발생시킨다 [1]. 이러한 잡음전류는 송전선로나 스위치 야드에 도달하는 경우에 빠르게 감쇄되기 때문에 밸브 홀 내에서 발생하는 잡음만을 고려하면 된다. 또한, 코로나 방전은 적절한 전기적 설계에 의해서 기준치이하로 운전이 가능하고, 최악의 경우도 주로 기상조건에 의해서 결정되지만 [2], HVDC 설비는 대부분 육내에 설치되어 있기 때문에 HVDC 변환소에서 발생하는 라디오 장애는 사이리스터 밸브에 의한 라디오 장애가 대부분이다 [3].

따라서, 본 논문에서는 HVDC 변환소에서 사이리스터 밸브의 운전 조건에 따라 발생하는 라디오 장애를 해석하였다. 라디오 잡음을 차폐하기 위한 대책으로 금속 재질의 차폐판과 철망을 고려하였으며, 라디오 잡음을 기준치 이하로 제거하기 위한 대책을 제시하고자 한다.

라디오 장애는 임펄스 전류가 밸브에서 도체 그리고 스위칭 야드에 전달되면서 발생한다. 즉, 임펄스는 수 MHz에서 수 GHz의 고주파 성분에 의해서 합성된 파형으로, HVDC 시스템의 운전조건과 환경조건에 시스템 구성에 따라 달라진다.

<sup>†</sup> 교신저자, 정희원 : 한전전력연구원 책임연구원

E-mail : cckim@kepri.re.kr

<sup>\*</sup> 정희원 : 한전전력연구원 연구원

접수일자 : 2011년 7월 11일

최종완료 : 2012년 5월 25일

### 2. 컨버터 밸브의 라디오 잡음

#### 2.1 임펄스에 의한 라디오잡음

임펄스에 의해서 발생하는 라디오 잡음을 분석하기 위해서, 푸리에 적분을 도입하면, 임펄스의 주파수 스펙트럼  $V(\omega)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$V(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} V(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

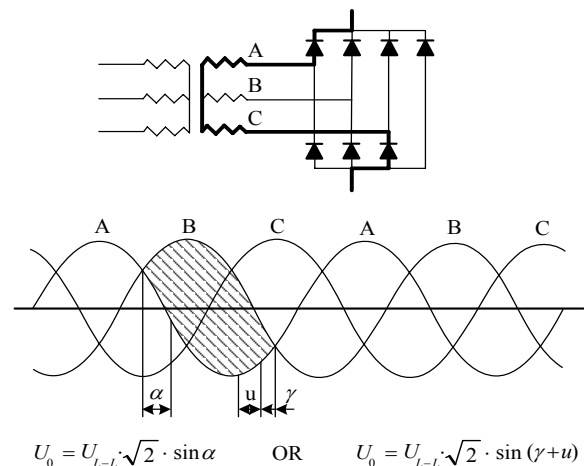


그림 1 6펄스 컨버터와 밸브 전압관계

Fig. 1 Six pulse converter and valve voltage

그리고, 식 (1)로부터 테브난 이론에 따라 밸브가 점호하는 동안 시스템에 중첩되어 나타나는 전류와 전압은 밸브 점호전압과 동일한  $V(t)$ 가 밸브의 애노드와 캐소드 간에 입력되고 다른 전원은 단락되어 있는 것과 같이 모델링될 수 있으며 밸브전압은 약간 상승한 후 영(零)이 되지만 다음과 같이 지수 함수적으로 감소하게 된다.

$$V(t) = -V_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (2)$$

식 (2)에서  $V_0$ 는 점호시점에 밸브사이의 전압이고,  $V_0$ 는 변압기 2차측 선간전압이므로 인버터인 경우에는 전압이 0-100%까지 변할 수 있다. 이는 정류기동작보다 인버터 동작일 경우에 밸브전압이 더 크다는 것을 의미하며,  $V_0$ 와 라디오 장해레벨은 점호각이  $90^\circ$  일 때 최대가 된다. 또한, HVDC 시스템에서 라디오장해를 유발하는 밸브동작은 두가지가 있는데 점호동작(Turn-On : 브레이크다운 전압과 같이 밸브 간 전압의 갑작스런 붕괴임)과 소호 동작(Turn-Off)이다. 이 중에서 소호 동작은 사이리스터 특성과 스너버 회로로 인하여 상대적으로 느리게 동작하기 때문에 라디오 잡음을 유발시키는 주파수 영역에 주로 관계하는 밸브동작은 점호동작이다. 점호동작에 의한 등가 노이즈 전압에 대한 관계식은 식 (2)와 같이 기하급수적으로 감소하는 전압으로 모델링 될 수 있다 [1].

식 (2)로부터 밸브 점호전압에 대한 주파수 스펙트럼은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$V(w) = \int_0^{+\infty} -V_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \cdot e^{-j\omega t} dt = \frac{-V_0}{j\omega(1 + j\omega T)} \quad (3)$$

$$V_{eq} \approx \frac{V_0 \cdot K_1}{\omega \cdot \sqrt{1 + (\omega \cdot T_0)^2}} \quad (4)$$

여기서,

$V_{eq}$  = 각주파수에서 등가 잡음원

$V_0$  = 붕괴 전압

$K_1 = 6320 \times A(n)$  for RF 준 침투 측정

$A(n)$  = 펄스 반복율 가중치 (ANSI C63.2 = 1.3)

$\omega$  = 각주파수

$T_0$  = 붕괴 시간

### 2.2 잡음원 계산을 위한 파라미터의 계산

최소 점호시간을 설정하는데 사용되는 밸브 전압 파형은 직렬 연결된 모든 밸브가 동시에 점호한다고 가정할 때이며, 이때 전압은 밸브간 가장 빠른 전압 감소를 발생시키고 등가 잡음전압을 최대로 발생시키게 된다. 실제 밸브는 여러개의 사이리스터가 직렬로 연결되어 있어 사이리스터간 오차로 인해 도통 순간에 약간의 차이가 발생하기 때문에 순간적으로 완벽한 동시 도통은 거의 발생하지 않는다. 이러한 도통 순간 불일치는 밸브 간 전압 붕괴를 느리게 해서, 밸브 턴-온 시간이 증가되고 등가 잡음 전압이 감소하기 때문에 잡음전압을 해석하는 경우에는 고려하지 않는다. 단지, 최대점호각과 최소점호각은 잡음전압에 영향을 주기 때문에 운전조건을 계산하여 구해야 한다. 그림 2는 사이리스터 밸브의 점호시의 밸브간의 전압파형을 보여주고 있으며, 그림 3에서는 밸브의 붕괴전압( $V_0$ ), 붕괴시간( $T_0$ ), 전압 변화율을 나타낸 상세한 점호과정을 보여주고 있다 [4].

파형 분석을 통해 식 (4)에서 등가 잡음전압이 최대가 되게 하는  $V_0$ 와  $T_0$ 를 알 수 있다. 위에서 간략히 설명한 잡음원 모델은 최악 조건을 기본으로 하지만 실제 시스템에서는 스위칭 전압이 낮고 턴-온 시간이 더 길어질 것이다. 하지만, 실제 시스템에서 위에 설명한 모델은 사이리스터 밸브의 기생커패시터(Stray Capacitance)와 고주파수 저항으로 인해

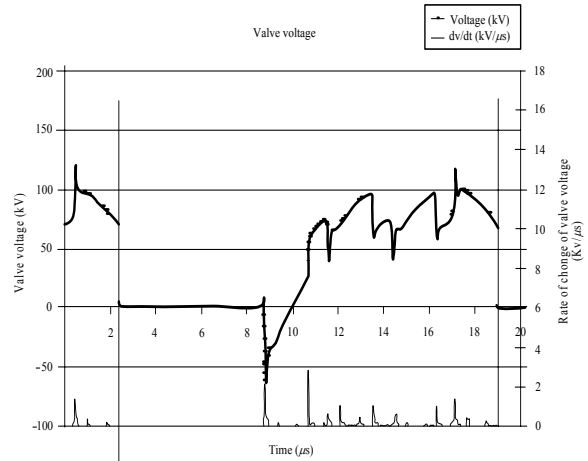


그림 2 스위칭시의 밸브전압

Fig. 2 Valve voltage during switching

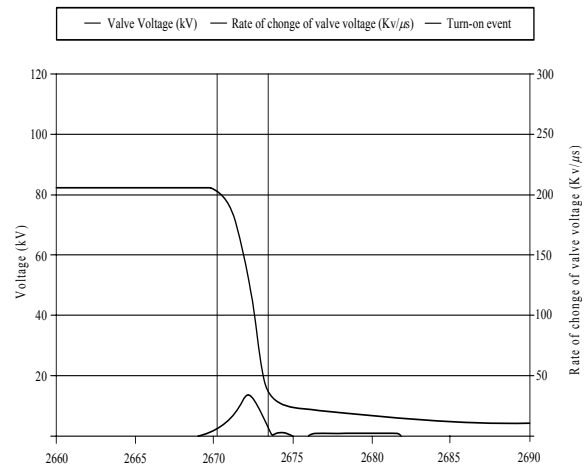


그림 3 스위칭시의 사이리스터의 점호특성

Fig. 3 On-characteristics of thyristor during switching

아주 높은 주파수에 대해서는 잡음이 상당히 큰 값이 될 것이다. 그리고 건물에서 그러한 고주파 잡음이 감쇄될 것이다.

### 2.3 HVDC 밸브 홀에서 라디오잡음의 방사

밸브 홀로부터의 발생하는 라디오장해의 주원인은 밸브의 점호로부터 발생하기 때문에 라디오 잡음이 발생하는 지점으로부터 밸브는 잡음의 파장에 비해 매우 작기 때문에 용량성 형태의 임피던스 (용량성 방사 임피던스 : Capacitive Radiation Impedance)를 갖는 수직 전기 쌍극자로 취급될 수 있다. 쌍극자 모멘트 P는 밸브 높이(H), 커패시턴스(C) 그리고 등가 잡음 전압( $V_{eq}$ )에 의해 결정된다.

$$P = V_{eq} \cdot H \cdot C \quad (5)$$

수직 전기 쌍극자로부터 발생하는 전계와 자계는 수평면에 대하여 대칭이고 자계강도 B는 고주파 영역에서 자계강도에 빛의 속도를 곱한 값으로 등가 전계강도( $E_B : \mu V/m$ )로 바꿀 수 있기 때문에 이상적인 접지 평면을 가정하면 전

자계는 다음 수식으로 주어진다.

$$E_E = V_{eq} \cdot \frac{\mu_0 \cdot H \cdot C \cdot w^2}{2 \cdot \pi \cdot r} \sqrt{1 - \left(\frac{c}{wr}\right)^2 + \left(\frac{c}{wr}\right)^4} \quad (6)$$

$$E_B = V_{eq} \cdot \frac{\mu_0 \cdot H \cdot C \cdot w^2}{2 \cdot \pi \cdot r} \sqrt{1 + \left(\frac{c}{wr}\right)^2} \quad (7)$$

여기서,  $\mu_0$ 는 공기의 투자율, r은 쌍극자로부터의 거리 그리고 c는 빛의 속도이다.

### 3. HVDC 시스템의 라디오 장애 대책

#### 3.1 라디오장애에 대한 대책

라디오 잡음을 차폐하지 않는다면 컨버터 밸브로부터의 라디오잡음은 AC기기가 존재하는 스위치 야드에서의 잡음보다 훨씬 크다. 따라서 밸브 설계 변경 없이 밸브로부터 방출되는 라디오 잡음을 줄이기 위한 유일한 방법은 밸브 홀 전체에 대해 전자기적 차폐를 하는 방법뿐이다. 좋은 차폐 판을 만들기 위해서 높은 도전율, 투자율 또는 높은 도전율과 투자율 특성을 모두 가진 차폐 판을 만드는 것은 금속 판으로 차폐 판을 만드는 방법과 철망을 이용해 구성하는 것이다. 또한, 차폐 효과는 차폐 판에 사용되는 금속의 표피 두께에 관계되며, 그림 4는 각종 금속에 대해 주파수에 따른 표피 두께를 보여주고 있으며, 표피두께( $\sigma$ )에 관한 수식은 다음과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \times \mu_0 \times \mu \times f}} \quad (8)$$

여기서,  $\rho$ 는 도체의 저항,  $\mu$ 는 상대 투자율,  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$  그리고 f는 주파수이다.

일반적으로 경제성 때문에 보통 전자차폐를 위해서는 철망이 많이 사용되고 있으며, 주파수가 높은 경우, 즉, 표피두

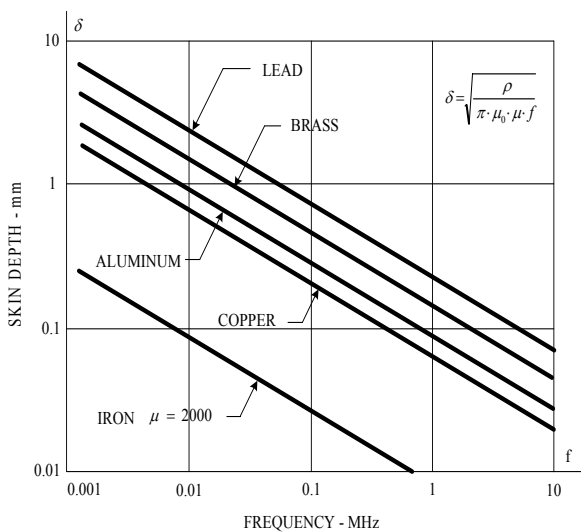


그림 4 차폐 재료에 대한 주파수변동에 따른 표피 두께  
Fig. 4 Skin depth-frequency variation according to shield material

께가 작은 경우에 전자계 감쇄율은 식 (9)와 같이 계산될 수 있다.

$$F = \frac{\frac{\pi \cdot a}{b} - \ln 2 \cdot \sinh \frac{\pi d}{2b} - \left(\frac{\pi d}{2b}\right)^2}{\left(\frac{\pi d}{2b}\right)^2 - \ln 2 \cdot \sinh \frac{\pi d}{2b}} \quad (9)$$

여기서, 차폐된 공간의 사이즈는 a, 철망의 폭은 b 그리고 철사의 직경은 d이다.

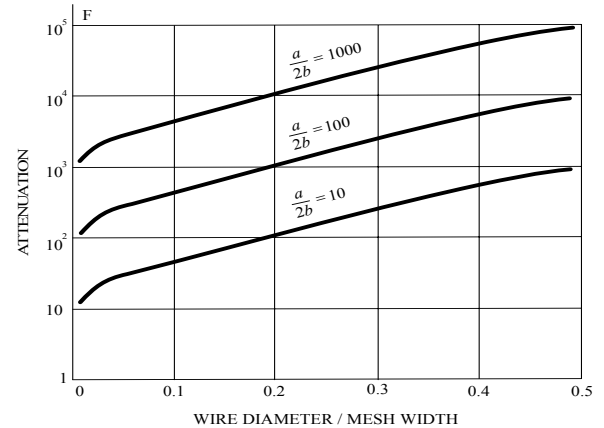


그림 5 철망을 사용하는 경우에 주파수에 따른 차폐율  
Fig. 5 Attenuation factor to frequency using iron mesh

식 (9)를 이용해 철망에 대한 감쇄율을 계산할 수 있으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

#### 3.2 진도-제주 HVDC #2의 라디오장애 대책

밸브로부터의 잡음은 주로 높이와 개별 밸브의 대지간 커패시턴스에 영향을 받는다. 밸브경격의 증가는 밸브 사이즈의 증가를 의미하기 때문에 밸브들의 전압 전류정격이 증가함에 따라 라디오 장애가 커지는 경향이 있다. 한편 잡음은 변환소 내 운전 중인 밸브의 개수에는 거의 영향이 없다. 사이리스터 밸브는 점호시 전기적 스트레스를 줄이기 위해 RC 댐핑회로를 구비하고 있다. 이러한 회로는 밸브 점호전압의 변화율을 상당히 감소시킨다. 수는 밸브의 경우 점호 시간( $T_0$ )는 1[ $\mu$ s]인 반면 사이리스터 밸브의 경우는 스너버저항과 밸브의 직렬연결 개수에 따라 다르나 일반적으로 5[ $\mu$ s]이다.

제주 HVDC #2 시스템의 밸브 홀에서 발생하는 라디오 잡음을 계산하기 위한 파라미터는 다음과 같다.

- \* 점호각( $\alpha$ ) : 18 [°]
- \*  $A(n) = 0.9$  for  $n = 60$  [p/s]
- \* 밸브전압 =  $\sqrt{2} \times 111 \times 10^3 \times \sin(16^\circ) = 43.27$  [kV]

1MHz에서 밸브에서 발생하는 라디오 잡음은 대략 1[V] 정도이며, 주파수에 따른 라디오 잡음은 그림 6과 같다.

철망을 선택하는 기준은 그림 8에서 보는 것처럼 차폐된 밸브 홀 건물 바깥에서 밸브로부터 직접 방사로 인한 라디

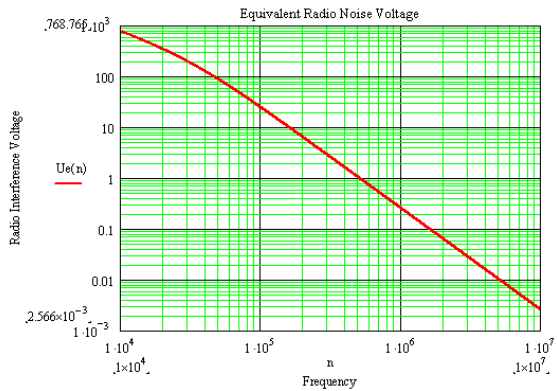


그림 6 인버터 동작시 밸브 양단의 등가 잡음 전압,  $n = 60$  p/s,  $V = 114$  kV,  $T = 1$ .

Fig. 6 Equivalent noise voltage when inverter operating,  $n = 60$  p/s,  $V = 114$  kV,  $T = 1$ .

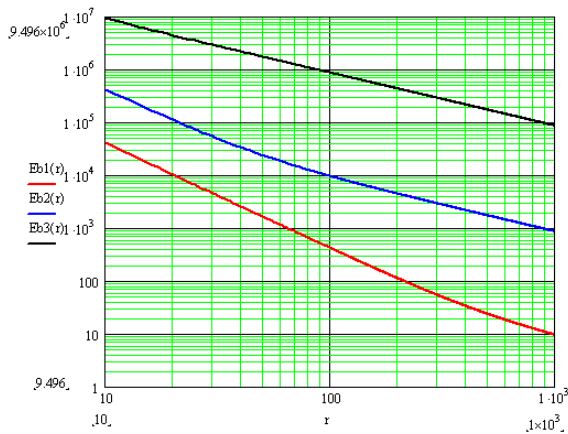


그림 7 컨버터 밸브의 방사로 인한 평면의 전계강도 = 75 kV,  $T=1$ ,  $H \cdot C=2 \cdot 10^{-9}$  Ams/V,  $n=60$  p/s

Fig. 7 Electric strength of plane by radiation in converter valve = 75 kV,  $T=1$ ,  $H \cdot C=2 \cdot 10^{-9}$  Ams/V,  $n=60$  p/s

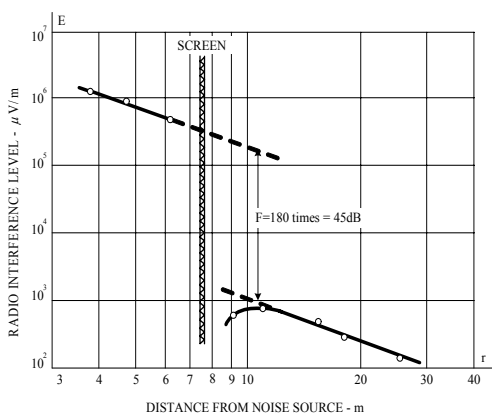


그림 8 밸브 홀 차폐를 통한 직접 방사로 인한 라디오 잡음 저감

Fig. 8 Radio noise attenuation of direct radiation by shielding valve hall

오 장해는 차폐 내에서 측정된 감쇄에 의해 건물 밖의 라디오 잡음이 기준이하가 되게 하는 것이다.

라디오 잡음에 대한 기준은 회사나 국가에 따라 다르나 국내의 경우는 청명시 L50 [%], 주파수 0.5[MHz] ±0.1 [MHz], SNR 24 [dB] 이상의 조건에서 47 [dBμV/m] 이하이어야 한다 [6]. 철사 직경 6mm 그리고 철망 폭 100mm인 철망을 이용하는 경우에는 식 (9)를 통해 라디오 잡음의 감쇄율이 100배의 감쇄효과를 나타내며, 철사 직경이 1mm이고 도체의 간격이 40mm인 경우에는 감쇄율이 1000정도로 계산된다.

#### 4. 결 론

HVDC 변환소에서 생성되는 라디오 장해는 밸브 점호 시에 발생하는 임펄스전류에 의한 것이다. 컨버터 밸브에 의해 발생하는 라디오 장해는 날씨에는 무관하지만 밸브 점호 각에 많은 영향을 받는데, 점호각이 90° 일 때 최대치가 된다. 이러한 밸브 잡음은 밸브 홀을 적절하게 전자기적으로 차폐함으로써 저감시킬 수 있다. 밸브 홀 건물의 기존 차폐 방법을 적용하면 변환소의 대부분의 라디오 잡음은 스위치 야드에서 발생하는 것이다. 본 논문에서는 HVDC 컨버터 스테이션에서 발생하는 라디오 잡음에 대해 살펴보았으며, 대부분의 잡음원은 밸브홀에서 사이리스터 턴온시 발생하는 것으로 확인하였다. 밸브에서 발생하는 라디오 잡음의 크기를 계산하였으며, 이를 차폐하기 위한 대책으로 금속으로 이루어진 차폐판과 철망 등을 고려하였다. 진도-제주간 HVDC#2 변환소에서 발생하는 라디오 잡음의 크기를 계산하였고, 철망을 적용한 후 잡음 감쇄율을 구하였고, 외부로 방사하는 라디오 잡음이 기준치 이하가 되는 것을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] E.W.Kimbark, "Direct Current Transmission", Vol. 1, John Wiley & Sons, 1971
- [2] "Radio interference from HVDC converter stations," EPRI Report EL-3712.
- [3] "Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems", IEC 61000-3-6.
- [4] "Harmonics, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network", CIGRE Working Group 36.05, Electra, No. 77, July 1981, p.35-54
- [5] "Guide for Assessing the Network Harmonics Impedance", CIGRE Working Group 36.05/CIREN 2, Electra, No. 167, August 1996.
- [6] KS C CISPR, 18-1, 2, 3, Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment.
- [7] Jindo-Jeju HVDC #2 design report.

---

저 자 소 개



**김 찬 기 (金 燦 起)**

1991년 서울산업대 전기공학과 졸업.  
1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업  
(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸  
업 (공학). 1996년~현재 한전 전력연구  
원 책임연구원.



**최 순 호 (崔 淳 浩)**

2007년 충남대 전기공학과 졸업. 2009년  
동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010  
년~현재 한전 전력연구원 일반연구원.