

# 반도체 소자를 이용한 테슬라 코일의 설계 및 제작

## A Study on Design and Implementation of the Tesla Coil using Semiconductor Device

김 영 선\* · 김 동 진\*\* · 이 기 식\*  
(Young-Sun Kim · Dong-Jin Kim · Ki-Sik Lee)

**Abstract** - A Tesla coil is an electrical resonant transformer circuit invented by Nikola Tesla in 1891. It is used to produce high-voltage, low-current, high frequency alternating-current electricity. Tesla coil can generate a long streamer with several million volts of electricity as a high voltage device. It is basically consists of a voltage transformer, high voltage capacitor, spark gap, primary coil, secondary coil and toroid. It is difficult to appear in the output size of the streamer is controlled by the spark gap. The general decision method of the length of streamer is to display the electric output in accordance with the design specifications in initial development plan. Design specifications and the electric output is determined by the application of facilities. In this paper the spark gap is replaced with periodic switching semiconductor device to control output voltage easily in order to apply overvoltage protective circuit due to a secondary coil and a performance test. In these days, their main use is for entertainment and educational displays of the museum, although small coils are still used as leak detectors for high vacuum systems.

**Key Words** : Arc, Tesla coil, Discharge, Lightning, Resonance

### 1. 서 론

테슬라 코일은 니콜라 테슬라가 고안한 유명한 발명품 중 하나로, 권수비가 극히 높은 1차 코일과 2차 코일로 구성되고 공진의 원리로 수십에서 수백만 볼트의 고전압을 발생시킬 수 있는 공심 변압기이다. 아직 테슬라 코일을 직접 활용하여 상용화된 예는 없지만, 그 이론과 원리를 바탕으로 많은 연구가 진행되고 있다 [1]-[4]. 테슬라 코일은 회로의 구성 및 사용되는 소자 등에 따라 스파크 갭 테슬라 코일(SGTC, Spark Gap Tesla Coil), 반도체 테슬라 코일(SSTC, Solid State Tesla Coil), 진공관 테슬라 코일(VTTC, Vacuum Tube Tesla Coil) 등으로 구분된다. 스파크갭 방식은 2차 회로에 유도되는 전력의 크기를 제어하기 어렵다. 불확실한 출력을 필요한 형태로 조절하기 위해서는 제작이 완료된 테슬라 코일의 디버깅 과정이 필요하며, 비교적 많은 시간이 소요된다[5]-[7].

본 논문은 테슬라 코일의 2차 회로에서 발생하는 임펄스 고전압을 통해 과전압 보호회로의 성능 시험으로 활용하기 위한 목적

으로 출력 전압을 용이하게 조절할 수 있는 테슬라 코일을 설계 및 제작에 관한 것으로서, 반도체 소자인 IGBT를 적용하여 주기적인 스위칭이 가능하도록 하였고, 별도의 컨트롤러를 통해 게이트 신호가 인가되는 시간을 제어하여 출력을 제어할 수 있도록 설계하였다.

### 2. 테슬라 코일

#### 2.1 기본구성

테슬라 코일은 기본적으로 LC 공진에 의해 동작하는데, 작동 유무를 결정짓는 가장 중요한 요소는 1차 공진회로의 주파수와 테슬라 코일에 의한 2차 공진회로의 주파수를 일치 시키는 것이다. 그림 1과 같이 발전회로의 콘덴서와 1차측 코일에 의해 1차 공진 회로가 구성되고, 2차측 코일과 그 상부에 있는 탐로드에 의해 2차 공진 회로가 구성된다. 1차 공진 회로와 2차 공진 회로의 주파수가 같을 때 최대 전력이 전달되며, 만약 공진 주파수가 일치하지 않으면 아크가 발생하지 않거나, 매우 약하게 발생하게 된다. 또한 1차측 코일의 임피던스가 급격히 낮아져 스위칭 소자가 파손될 위험이 있다 [8]. 이러한 문제를 방지하기 위해 공진 주파수를 계산하여 콘덴서와 코일을 설계해야 한다.

$$F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} [Hz] \quad (1)$$

† Corresponding Author : School of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University, Korea.

E-mail: kisiklee@dankook.ac.kr

\* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Joongbu University, Korea.

\*\* School of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University, Korea.

Received : July 28, 2016; Accepted : August 12, 2016

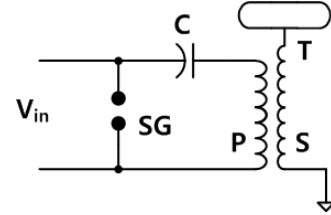
**표 1** 테슬라 코일의 구성품  
**Table 1** Parts of a tesla coil

구성품	내용
1차 코일 (Primary Coil)	1차 코일은 1차 회로의 유도성 파트로써, 1차 커패시터와 함께 공진 회로를 형성한다. 1차 커패시터에 저장된 모든 전력을 소비하고, 대전류 펄스를 견딜 수 있어야 하기 때문에 보통 동관이나 굵은 전선이 사용된다. 공진 주파수에 따라 인덕턴스를 조정할 수 있는 구조로 설계한다.
1차 커패시터 (Primary Capacitor)	스파크갭에서 스파크가 발생할 수 있도록 전원으로부터 에너지를 저장한다. 대체로 1~22kV의 범위로 형성되는 1차 회로의 전압을 견딜 수 있는 절연체가 필요하다.
스파크갭 (Spark Gap)	공급 전원의 낮은 주파수를 높은 주파수로 스위칭하기 위해 사용된다. 스위치의 속도를 제어할 수 있는 로터리 방식도 사용된다.
2차 코일 (Secondary Coil)	전압의 승압을 위해 사용된다. 보통 500~2500회 감긴 와이어로 구성된 공심코어형 인덕터이며, 와이어의 크기 및 권선은 필요한 테슬라 코일의 구조에 따라 결정된다. 일반적으로 PVC관이 사용되고, 두꺼운 종이나 유리, 폴리프로필렌 등이 사용된다. 절연과 코로나 방전을 막기 위해 바니쉬(varnish)로 여러겹 코팅한다.
탑로드 (Toploads)	2차 회로의 커패시터로써, 2차 코일과 함께 1차 회로와 동일한 주파수로 공진회로를 형성한다. 1차 회로의 인덕터에 비해 2차 회로의 인덕터가 매우 크기 때문에 2차 커패시터는 작아진다. 형상은 관형, 구형, 토로이드 등과 같이 에너지가 저장될 수 있도록 매끄러운 형태가 되어야 하고, 방전 짐을 통해 금속체에 저장된 높은 에너지를 대기중으로 방전한다.

**2.2 기본회로**

전압( $V_{in}$ )을 인가하면, 1차측 커패시터( $C$ )에 전하가 충전되고, 1차측 커패시터 양단의 전압이 증가한다. 커패시터 양단의 전압이 스파크갭( $SG$ )의 절연 파괴 전압에 달하면 스파크갭이 발화하고, 커패시터의 전압은 스파크갭과 1차 코일( $P$ )에 의해 방전된다. 커패시터 양단의 전압이 0이 되면, 1차 코일의 자기장이 감소하기 시작하고, 커패시터가 전압을 재충전하면서 1차 코일에 교류 전류를 생성한다. 변압기의 동작에 의해 1차 코일에 생성된 교류 전류는 공심 코어로 결합된 2차 코일( $S$ )로 전달된다. 위의 사이클이 몇 번 소요되면서 2차 코일로 모든 전력이 전달된다. 탑로드와 2차 코일은 1차측 커패시터와 1차 코일과 같이 동일한 방법과 동일한 속도로 서로간에 전력을 교환할 수 있도록 공진으로 설계되어 2차 코일에서 유도된 전압을 증가시킨다. 탑로드( $T$ )가

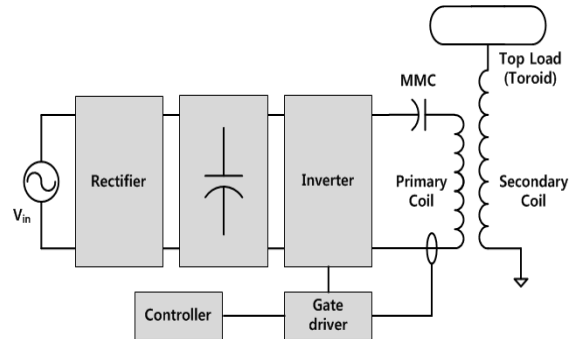
저장할 수 있는 것보다 전압이 증가하면 아크가 발생한다. 이 과정은 1차측 커패시터와 1차 코일에 더 이상의 전력이 생성되지 않을 때까지 지속되고, 스파크갭 양단에 아크를 유지할 수 있는 전압이 충분하지 않으면, 아크는 소멸한다.



**그림 1** 테슬라 코일의 기본 회로  
**Fig. 1** The classical tesla coil

**3. 반도체 소자 적용 하드웨어 설계**

테슬라 코일의 크기는 일반적으로 탑로드와 2차 코일의 크기에 영향을 받고,, 그에 따라 2차 회로의 커패시턴스와 인덕턴스가 결정되며, 설계 과정에서 우선적으로 고려되는 요소이다.



**그림 2** 반도체 소자 적용 테슬라 코일 구성  
**Fig. 2** SSTC Schematic

테슬라 코일은 다음의 절차에 따라 설계되었다.

- ① 2차 회로 방전 전압
- ② 탑로드의 사이즈 결정 및 커패시턴스
- ③ 2차 코일의 높이와 직경
- ④ 2차 코일의 와이어 게이지 및 인덕턴스
- ⑤ 2차 공진 주파수
- ⑥ 1차 코일의 물리적 크기
- ⑦ 1차 코일의 인덕턴스 계산 및 2차 회로와 동일한 공진 주파수를 이루기 위한 1차 커패시터

**3.1 전력변환 회로**

상용 전원인 220[V]의 입력 전원으로부터 1차 회로에 필요한

전력을 전달해 주기 위한 전력변환회로는 교류 전원을 직류로 정류하기 위한 정류부, 스파크갭을 대체하는 반도체 소자가 적용된 인버터, 게이트 신호를 제어할 수 있는 컨트롤러 및 드라이버 회로로 구성된다. 60[Hz]의 전원 주파수를 높은 주파수로 스위칭하기 위해 반도체 소자인 IGBT를 사용하였다.

### 3.2 2차 회로

테슬라 코일의 방전 전압은 2차 회로의 탑로드의 사이즈에 비례하며, 일반적으로 식 (2)에 의해 결정되고, 본 논문에서는 350 [kV] 이상의 방전 전압을 위해 직경 250[mm]의 탑로드를 적용하였다.

$$V_{dmax} = 1.5 [kV] \times D_{\top load} \quad (2)$$

여기서,  $V_{dmax}$  : 최대방전 전압[kV]  
 $D_{\top load}$  : 탑로드 직경[mm]

2차 회로의 커패시터가 되는 탑로드는 토로이드 타입으로 금속관을 이용하여 그림 3과 같이 제작되었다.

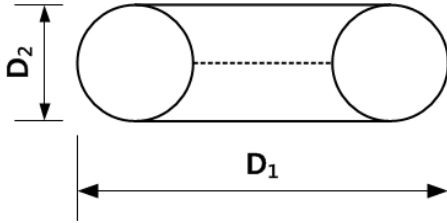


그림 3 탑로드 단면도  
 Fig. 3 Sectional view of topload

제작된 탑로드의 커패시턴스는 식 (3)에 의해 결정된다.

$$C_s = 1.4(1.2781 - \frac{D_2}{D_1}) \sqrt{\pi D_2(D_1 - D_2)} [pF] \quad (3)$$

탑로드와 결합되어 공진회로를 이루는 인덕터는 원통형의 PVC관 표면에 와이어를 감아 제작되었고, 식 (2)에 의해 인덕턴스가 결정된다 [1].

$$L_s = \frac{R_s^2 N_s^2}{2540 \times (9R_s + 10H)} [mH] \quad (4)$$

여기서,  $R_s$  : 2차 코일 반지름[cm]  
 $H$  : 2차 코일 높이[cm]  
 $N_s$  : 2차 코일 턴수

표 2 2차 회로 파라미터

Table 2 Secondary circuit parameter

인덕터	2차 코일 반지름 ( $R_s$ )	108.5[mm]
	2차 코일 높이 ( $H$ )	790[mm]
	2차 코일 턴수 ( $N_s$ )	1760[turn]
	2차 인덕턴스 ( $L_s$ )	161.74[mH]
커패시터	탑로드 지름 ( $D_1$ )	900[mm]
	탑로드 높이 ( $D_2$ )	250[mm]
	2차 커패시턴스 ( $C_s$ )	39.39[pF]

2차 회로의 인덕턴스와 커패시턴스에 의해 식 (5)와 같이 공진 주파수가 결정된다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_s}} [Hz] \quad (5)$$

### 3.3 1차 회로

1차 회로의 인덕터가 되는 코일은 동관을 이용하여 그림 4와 같이 나선형으로 제작되었다 [1].

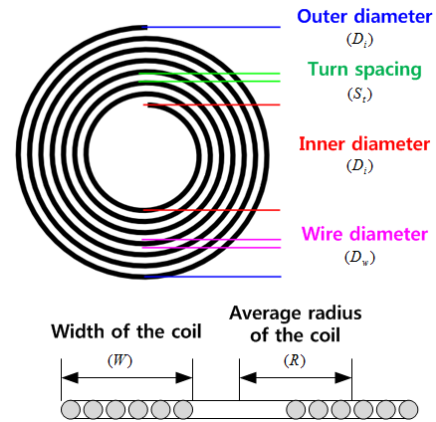


그림 4 1차 코일의 구성

Fig. 4 Composition of primary coil

$$L_p = \frac{(R_p N_p)^2}{8R_p + 11W} [\mu H] \quad (6)$$

여기서,  $W = (\frac{D_w}{25.4} + \frac{S_t}{25.4}) \times N_p [mm]$

$$R_p = \frac{(\frac{D_i}{25.4}) + W}{2} [mm]$$

2차 회로에서 결정된 공진주파수에 의해 1차 코일의 인덕턴스

에 따른 1차 커패시터의 값이 결정된다.

$$C_p = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 L_p} [\mu F] \quad (7)$$

표 3 1차 회로 파라미터

Table 3 Primary circuit parameter

인덕터	Wire diameter ( $D_w$ )	12[mm]
	Turn spacing ( $S_t$ )	10[mm]
	Inner diameter ( $D_i$ )	225[mm]
	1차 코일 턴수 ( $N_p$ )	6.25 [turn]
	1차 인덕턴스 ( $L_p$ )	17.05[uH]
커패시터	1차 커패시턴스 ( $C_p$ )	0.33[uF]

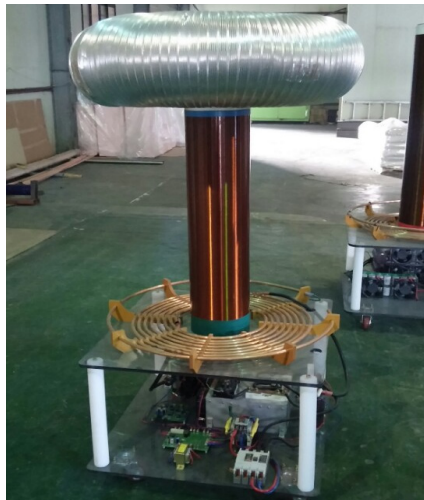


그림 5 테슬라 코일 구조물

Fig. 5 Hardware of tesla coil

표 4 전기적 사양

Table 4 Secondary circuit parameter

구분		사양
입력단		단상 전파정류 하프-브리지
		220[V] / 60[Hz]
정류단		420[V]
1차 회로	커패시턴스	0.33[uF]
	인덕턴스	17.05[uH]
	공진주파수	66[kHz]
2차 회로	커패시턴스	39.39[pF]
	인덕턴스	161.74[mH]
	공진주파수	63[kHz]

1차 코일의 물리적 크기에 의해 식 (7)에 의해 1차 회로의 인덕턴스가 계산되고, 2차 회로와 동일한 공진주파수가 될 수 있도록 커패시터를 선정하였다. 표 4는 반도체 소자를 적용한 테슬라 코일의 전기적 사양을 나타낸 것이다.

#### 4. 시뮬레이션

제작된 테슬라 코일을 그림 6과 같이 PSpice를 이용하여 시뮬레이션하였다. 정류부는 전파 배전압 정류회로, 테슬라 코일은 선형 변압기 소자(결합계수  $k=0.1$ )를 사용하였으며, 1차 회로, 2차 회로의 전압을 각각 확인하였다.

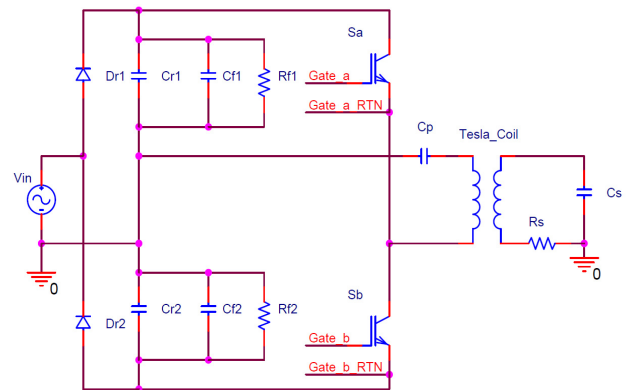


그림 6 시뮬레이션 회로도

Fig. 6 Simulation schematic

입력측에 연결된 다이오드와 커패시터에 의해 220[V]의 입력 전압은 배전압 회로를 통해 420[V] 직류 전압으로 정류되었고, 그림 7에 정류된 전압의 파형을 나타내었다.

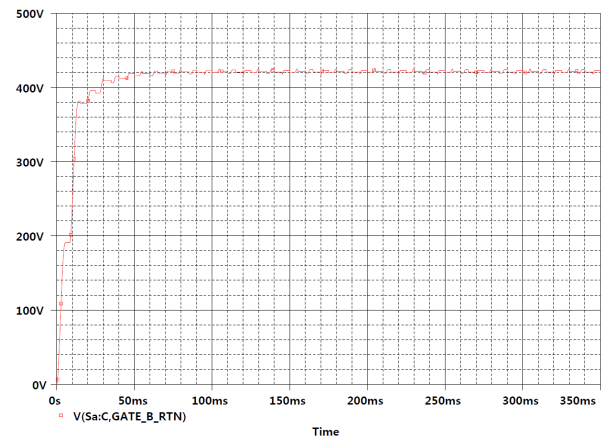


그림 7 정류부 파형

Fig. 7 Rectifier waveform

정류 회로를 통해 얻어진 직류 전압을 IGBT(Sa, Sb)가 1차, 2차 회로의 공진주파수인 50[kHz]로 스위칭하면서 1차 회로에 교류 전력을 생성한다.

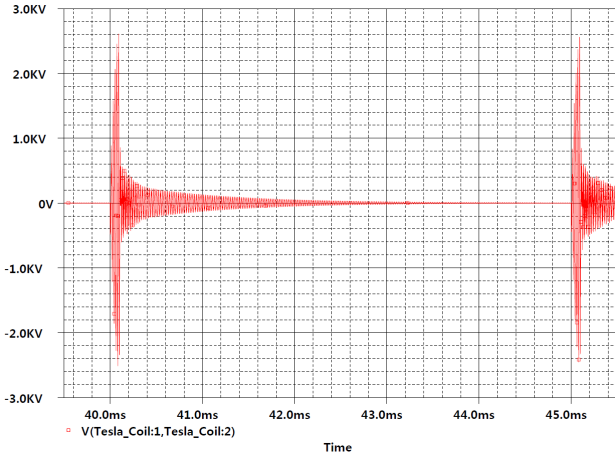


그림 8 1차 회로 전압 파형  
Fig. 8 Primary circuit voltage waveform

1차 회로에서 생성된 교류 전력은 1차 코일과 수직 방향으로 위치한 2차 회로로 유도되고, 유도된 전력은 2차 코일에 의해 증가된다.

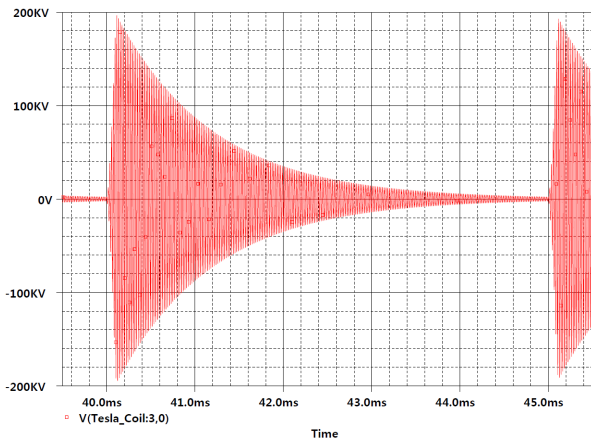


그림 9 2차 회로 전압 파형  
Fig. 9 Secondary circuit voltage waveform

본 논문에서는 테슬라 코일의 IGBT의 게이트 신호를 조절할 수 있도록 별도의 컨트롤러를 적용하였고, 게이트 신호가 인가되는 시간에 따라 2차 회로에서 나타나는 전압을 확인하였다. 게이트 신호의 인가시간이 증가함에 따라 1차, 2차 회로의 전압은 비례하여 상승하지만, 인가시간이 1[ms] 이상으로 증가할 경우 전압은 감소하는 것으로 확인되었다.

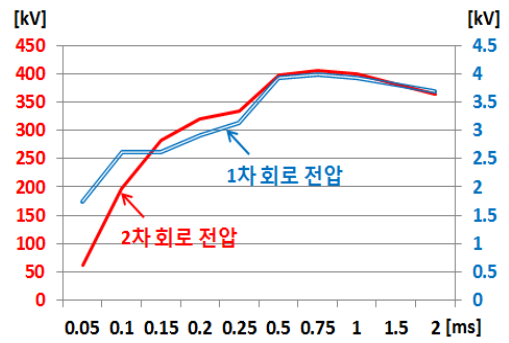


그림 10 게이트 신호에 의한 1차, 2차 회로 전압  
Fig. 10 Primary & secondary circuit voltage due to gate signal

### 3. 결 론

본 논문에서는 테슬라 코일의 출력을 제어하기 위해 스파크갯을 주기적인 스위칭이 가능한 반도체 소자로 대체하여 제작하였고, 그 결과를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 220[V], 60[Hz]의 상용전원을 입력으로 하여, 420[V] 직류 전압을 얻기 위해 배전압 정류 회로를 사용하였다. 정류된 직류 전압은 2개의 IGBT를 통해 1차 회로에 교류 전력을 생성하게 되고, 2차 회로에 증가된 전력이 유도되었으며 최대 400[kV]의 전압이 나타났다. 게이트 신호가 인가되는 시간이 증가하면 2차 회로에 나타나는 전압도 비례하여 상승하였고, 일정 시간 이상이 되면 전압은 감소하는 특성을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 과정에서 테슬라 코일의 결합 계수를 0.1로 하였으나, 설계 방법에 따라 결합 계수는 개선될 수 있으며, 2차 전압은 그에 비례하여 증가될 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통산자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20151220200010)

### References

- [1] Denicolai, Marco. Tesla transformer for experimentation and research. Helsinki University of Technology, 2001.
- [2] Mitch Tilbury, "The ultimate Tesla Coil Design and construction guide", McGraw-Hill, 2008.
- [3] Johnson, "Gary L. Solid State Tesla Coil" GL Johnson, 2001.
- [4] Richard Miles Craven, "A study of secondary winding designs for the two-coil Tesla Transformer", Loughborough

University Institutional Repository, 2014.

- [5] Fritz, T., "Modeled and Actual Voltage and Current Waveforms within a Tesla Coil", <http://www.capturedlightning.org/hot-streamer/TeslaCoils/MyPapers/modact/modact.html>
- [6] M. B. Farriz, A. Din, A. A. Rahman, M. S. Yahaya, J. M. Herman, "A Simple Design of a Mini Tesla Coil With DC Voltage Input", 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010.
- [7] Johnson, Gary L. "Building the world's largest Tesla coil-history and theory." Power Symposium 1990, Proceedings of the Twenty-Second Annual North American. IEEE, 1990.
- [8] Kolchanova, V. A. "Computational modeling of the Tesla coil parameters." Modern Technique and Technologies, 2002. MTT 2002. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists. IEEE, 2002.
- [9] Richard M. Craven, Ivor R. Smith, and Bucur M. Novac, "Optimizing the Secondary Coil of a Tesla Transformer to Improve Spectral Purity, IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 42, No. 1, pp. 143-48, 2014.



### 이 기 식 (Ki Sik Lee)

1973년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1978년-현재 단국대학교 전자전기공학부 교수  
E-mail : kisiklee@dankook.ac.kr

## 저 자 소 개



### 김 영 선 (Young Sun Kim)

1997년 단국대학교 전기공학과 석사. 2006년 동 대학원 전기공학과 박사. 2010년-2011년 MIT Post Doctoral Fellow. 2012-현재 중부대학교 전기전자공학과 교수. 관심분야 : 에너지변환공학, 전기기기, 전기설비의 서지보호.  
E-mail : yskim@joongbu.ac.kr



### 김 동 진 (Dong Jin Kim)

1966년생. 2007년 단국대학교 전기공학과 석사. 2010년 단국대학교 전기공학과 박사수료. 2003년-현재 선광 LTI(주) 대표이사, 건축전기설비기술사. 관심분야: 건축물의 뇌서지 보호, 전력계통의 서지보호 및 주파수 관리.  
E-mail : isk0910@daum.net