S-파라메타를 이용한 절연 변압기의 고주파 파라메타 추출

High-Frequency Parameter Extraction of Insulating Transformer Using S-Parameter Measurement

김성준 · 류수정 · 김태호 · 김종현 · 나완수

Sung-Jun Kim · Soo-Jung Ryu · Tae-Ho Kim · Jong-Hyeon Kim · Wan-Soo Nah

요 약

본 논문에서는 S-파라메타를 이용한 절연 변압기의 고주파 파라메타 추출 방법을 제안한다. 정상상태에서 회로상수 추출은 고전적 방법인 무 부하, 단락 회로 시험을 통해 나온 측정값을 계산하여 추출하는 방법이 있으며, 본 논문에서는 VNA(Vector Network Analyzer)로 측정한 S-파라메타를 이용하여 추출하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 상용주파수인 60 Hz를 포함한 고주파 대역에서의 변압기 회로상수는 측정한 S-파라메타에 데이터 피팅(최적화) 방식을 이용하여 추출하였다. 기본적으로 절연변압기에서의 고주파 파라메타 추출은 기존에 제시하는 변압기 등가 회로에 표유정전용량(Stray capacitance)을 추가한 등가회로 형태로 제시된다. 이렇게 추출한 회로상수의 S-파라메타와 실제 측정한 S-파라메타 결과를 비교하여 유사함을 확인하였고, 변압기의 1차 측에 신호발생기를 입력한 후, 출력되는 2차 측의 전압과 고주파 등가회로를 이용하여 추출한 2차 측 전압을 비교하여 두 값이 일치하는 것을 확인하였다. 이 결과를 통해 S-파라메타를 이용한 절연 변압기의 고주파 파라메타 추출 방법의 타당성을 입증하였다.

Abstract

In this paper, we suggest a method of extracting circuit parameters of the insulating transformer using S-parameter measurement, especially in high frequency range. At 60 Hz, conventionally, no load test and short circuit test are used to extract the circuit parameters. In this paper S-parameters measured from VNA(Vector Network Analyzer) were used to extract the transformer parameters using data fitting method (optimization). The S-parameters from the equivalent circuit using the extracted parameters showed good agreement with those from measurement. Furthermore, the transformer secondary voltages from the equivalent circuit model also coincide quite exactly to the measured secondary voltages in sinusoidal forms. Finally we assert that the proposed method to extract the parameters for the insulating transformer using S-parameter is valid especially in high frequency.

Key words: Stray Capacitance, S-parameter, Optimization, High-Frequency

I. 서 론

일반적으로 철도 시스템에서는^[9] 수많은 신호를 제어,

통제해야 하며, 이를 위해서 외부로부터 역시 수많은 데이터/신호를 센서로 부터 수신해야 한다. 이 때 데이터를 수신하는 외부 회로에서부터 서지(전압, 전류, 전력의 과

「본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (No. 20124010203300)와 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2013009489).」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부(Department of Electronical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

· Manuscript received December 6, 2013 ; Revised February 18, 2014 ; Accepted February 25, 2014. (ID No. 20131206-13S)

· Corresponding Author: Wan-Soo Nah (e-mail: wsnah@skku.edu)

도 파형)가 전선 또는 전기회로를 통해 철도 주요 신호, 제어 시스템으로 인가되는 것을 효과적으로 막아주는 기능이 반드시 필요하다. 만약 외부로부터의 서지가 신호, 제어 시스템에 바로 인가된다면 그로 인한 고장이나 오작동 등의 위험이 발생한다. 그렇기 때문에 주요 시설 장비 등에는 서지에 대한 보호시스템을 구축해야 한다^[1]. 만약 서지로 인한 시스템, 제어에서의 이상 동작이나 고장이 발생한다면 신호 제어 시스템의 오동작으로 수많은 인명, 재산 피해를 초래할 것으로 예상된다. 현재 철도 산업에서는 서지 방지를 위해서 저압용 피뢰기 설치, 이상 전압 차단을 위한 보안기, 등전위 접지, 서지 흡수기인 업서버(absorber), 절연 변압기 등 용도에 따라 다양하게 사용되고 있는데, 이들 중 철도 산업에서의 신호, 제어 시스템을 보호하는 방법으로 1:1 절연 변압기가 사용되고 있으며, 이는 외부로부터 서지가 인가되었을 때 1차 측과 2차 측 사이에 전기적 단절을 통하여 변압기가 서지 보호기 또는 LPF(Low Pass Filter) 역할을 함으로써 1차 측에서 2차 측으로 서지가 전달되지 않게 막아주는 역할을 한다. 정상상태에서의 절연 변압기는 올바른 동작을 하지만, 서지(과도상태)가 발생하면 1차 측의 에너지가 2차 측으로 전달되는 현상이 발생하며, 일반적으로 이 신호는 높은 에너지를 포함하고 있다. 이러한 서지가 유입될 때 회로의 응답 특성을 예측하기 위해서는 효과적인 절연 변압기의 고주파에서 모델 개발이 필수적이다.

일반적으로 절연변압기의 고주파 모델에서는 1차 측과 2차 측 도체 사이의 coupling의 의한 기생 커패시턴스 C (Stray Capacitance)에 의해 전달된다고 알려져 있다. 저주파수 영역에서는 주파수와 C값 둘 다 모두 작고, 임피던스는 매우 높아 1차 측에서 2차 측으로 에너지 전달이 일어나지 않지만, 주파수가 올라갈수록 $\frac{1}{j\omega C}$ 에 의해 전체 임피던스가 낮아지게 되고, 저주파에선 모두 차단시켰던 서지를 모두 필터링하지 못하고, 1차 측과 2차 측 사이의 C를 통해서 전달되는 현상이 발생한다. 따라서 주파수가 증가함에 따라 발생하는 전자기적 간섭(Electromagnetic interference)을 고려한 절연 변압기를 설계가 요구된다.

한편, IEC 규정에 의하면, 변압기의 고주파 특성 측정 범위는 과도상태 현상에 대한 KS C IEC 61000-4-5의 서

(a) 정면도
(a) Front view

(b) 평면도
(b) Top view

그림 1. 1:1 절연 변압기

Fig. 1. 1:1 insulating transformer.

지 내성 시험에서 임펄스가 피크 값의 30 %에서 90 %까지의 시간의 1.67배를 한 값을 요구하고 있다. 이 규정에 의하여 $1.2/50 \mu s \pm 30 \%$ 를 계산하면 ~ 1 MHz로 계산되기 때문에, 본 논문에서는 절연변압기의 고주파 주파수 범위를 5 Hz~1 MHz로 한정하여 진행하도록 한다^[10].

그동안 고주파 특성을 고려한 변압기에 대한 연구는 임피던스 추출기를 이용하여 한 주파수에서 1차 측과 2차 측을 단락 또는 개방 상태를 만들어 각각의 임피던스를 측정하여 각각의 파라메타를 추출하는 방법^{[4],[6]}과 S-파라메타를 이용하여 변압기 각각의 파라메타를 상수 추출하는 피팅 방법이 있다^{[5],[7]}. 본 논문에서는 주파수에 의존하는 파라메타를 효과적으로 추출하기 위해 피팅(최적화) 방법을 이용하여 각각의 주파수에서 파라메타를 추

출하였고, 더 나아가 추출한 파라메타가 얼마나 정확한지에 실제 실험과 비교하여 검증에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 이는 제시한 등가회로가 1 MHz까지 주파수 범위에서 고주파 응답 특성을 효과적으로 예측할 수 있음을 보이고자 한다.

II. 절연 변압기의 저주파 파라메타 추출

2.1 고전적 방법에 의한 파라메타 추출

변압기의 파라메타 추출 방법은 여러 가지가 있으나, 과거 정상상태 220 V 60 Hz에서의 변압기의 파라메타 추출은 무 부하 시험(open-circuit test)과 단락시험(short-circuit test)을 이용하여 회로상수를 추출하였고, 정상상태의 변압기 등가 모델은 그림 2이고, 각각의 상수들은 R_{w1} , L_{l1} , R_{w2} , L_{l2} , R_c , L_m 로 나타낼 수 있고, 여기에서

그림 2. 저주파 변압기 등가 회로

Fig. 2. Equivalent circuit of low-frequency transformer.

그림 3. 변압기의 2차 측을 개방한 (a) 접속도 및 (b) 등가회로도

Fig. 3. (a) Test circuit diagram and (b) equivalent circuit for transformer with load in open state.

R_{w1} , R_{w2} 은 권선 저항을 의미하며, L_{l1} , L_{l2} 누설 인덕턴스를 의미하고 R_c , L_m 는 철손 저항과 자화 인덕턴스를 의미한다^[2].

1:1 절연 변압기는 1차 측과 2차 측의 턴 수비가 동일하기 때문에, 둘 중 한 쪽 방향을 기준으로 측정을 해야 한다.

무 부하 시험은 그림 3의 왼쪽 그림 방법으로 1차 측에 전압을 인가하고, 1차 측의 전류계와 전압계 전력계를 설치하여 전압 전류 전력을 측정하였다.

그림 3의 오른쪽과 같이 무 부하 등가 회로가 직렬성분의 임피던스를 제외한 병렬 성분의 임피던스로만 표현되는 이유는 직렬 임피던스가 병렬 임피던스에 비해 매우 작은 값을 갖고 출력된 전압 전류 전력 값에 영향을 미치지 않기 때문이다.

단락 시험은 그림 4의 왼쪽 그림 방법으로 1차 측에 전

그림 4. 변압기의 2차 측을 단락한 (a) 접속도 및 (b) 등가회로도

Fig. 4. (a) Test circuit diagram and (b) equivalent circuit for transformer in short state.

표 1. 무 부하 회로와 단락 회로의 측정 값

Table 1. Comparison of nonloaded circuit and short circuit.

	Open	Short
V	220 V	8 V
I	1.2 A	6 A
P	30 W	40 W

표 2. 변압기 등가 회로의 회로 상수

Table 2. Circuit constant of equivalent circuit.

R_{eq}	L_{eq}	R_c	L_m
1.1 Ω	1.94 mH	1,613 Ω	489 mH

압을 인가하고, 2차 측에 단자를 도선으로 연결하여 전압, 전류, 전력을 측정하였다.

그림 4의 오른쪽과 같이 개방 회로의 병렬 성분을 제외한 직렬 임피던스로만 표현하는 이유는 2차 측을 선으로 단락시켜 임피던스가 매우 낮아져, 대부분의 전류가 2차 측으로 흐르고, 병렬 임피던스는 매우 높은 임피던스이기 때문에 전류도 흐르지 않고, 전압, 전류, 전력 측정값에 영향을 미치지 않기 때문에 직렬 임피던스로만 등가회로를 표현할 수 있다.

표 1은 무 부하 시험과 단락 시험의 측정 결과이고, 이 값들을 이용하여 저주파 변압기의 등가회로의 회로 상수 표 2를 구할 수 있다.

2.2 측정된 S-파라메타를 이용한 추출

고전적 방법의 회로상수 추출은 일반적으로 전력회로의 60 Hz에서 수행이 되며, 따라서 60 Hz에서의 회로상수 추출만이 가능하지만, S-파라메타를 이용한 회로 상수 추출은 다양한 주파수에서 가능하다. S-파라메타에 대한 자세한 설명은 다음 장에 기술하였다. 측정된 S-파라메타를 그림 2 등가회로에 적용시켜 Agilent사의 ADS(Advanced Design System)의 최적화 기능을 이용하여 60 Hz에서 회로 상수를 추출하였다.

고전적인 방법으로 추출한 회로 상수 값과 측정된 S-파라메타를 optimization으로 추출한 회로 상수 R_{eq} , L_{eq} , R_c , L_m 를 표 3에 비교하였는데, 각각의 상수 값이 매우 유사함을 확인할 수 있다.

표 3. 고전적인 방법으로 추출한 회로 상수와 측정된 변압기의 S-파라메타를 이용한 저주파 등가 회로에서 추출한 회로 상수 비교

Table 3. Circuit constant extracted from classical method and circuit constant extracted from equivalent circuit at low-frequency.

	R_{eq}	L_{eq}	R_c	L_m
Classical method	1.1 Ω	1.94 mH	1,613 Ω	489 mH
S-parameter	1.08 Ω	2.84 mH	1,582 Ω	594 mH

III. 절연 변압기의 고주파 파라메타 추출 및 측정 방법

3-1 S-파라메타 측정

S-파라메타(Scattering-파라메타)는 RF에서 널리 사용되는 회로의 결과 값으로써 고주파에서의 전압과 전류 측정의 어려운 단점을 극복하고, 고주파수까지 특성을 알 수 있는 방법으로 입사 전압과 반사 전압의 비를 활용한 측정 방법이다^{[3][4]}. 측정은 Agilent사의 E5061B VNA (Vector Network analyzer) 장비를 이용하여 SOLT(Shot-open-load-thru) 방법으로 캘리브레이션 하였고, 5 Hz~1 MHz까지 변압기의 S-파라메타를 측정하였다.

$$S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+}, V_k^+ = 0, k \neq j \quad (1)$$

변압기의 측정 범위는 과도상태 현상에 대한 KS C IEC 61000-4-5의 서지 내성 시험에서 임펄스가 피크 값의 30 %에서 90 %까지의 시간의 1.67배를 한 값, 1.2/50 $\mu s \pm 30\%$ 를 계산하면 1 MHz이기 때문에 5 Hz~1 MHz까지 S-파라메타를 측정 분석하였다.

측정 시 주의사항으로 측정 주파수 영역에 따라 캘리브레이션을 할 때 중간주파수 간격(IF Band Width)을 고려해야 한다. 변압기의 측정은 저주파수인 5 Hz부터 고주파수의 1 MHz 대역을 모두를 측정하기 때문에 중간 주파수를 고려하지 않고, 캘리브레이션을 하게 되면 저주파수 영역에 노이즈가 관찰되니 꼭 유의해야 한다.

변압기의 S-파라메타 측정방법은 그림 5의 왼쪽과 같이 2개의 동그라미로 표현한 SMA connector의 signal 선과 220 V(+) 단자를 도선으로 연결하고, 2개의 삼각형으로 표현한 SMA의 ground와 0 V(-) 단자도 도선으로 연결하여 1개의 포트를 만들었고, 2차 측도 동일한 방법으로 1개의 포트를 구성하였다.

이렇게 구성한 2포트로 S-파라메타 측정하였고, 그림 7이 결과 파형이다. 보통 2포트 S-파라메타를 측정하면 S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} 이렇게 4개의 파형이 그래프에 나타나야 하는데, 저주파에서 S_{11} 는 S_{22} 와 S_{12} 는 S_{21} 와 같기 때문에 2개의 파형으로 보이고, 고주파수로 올라가면 반사 특성인 S_{11}

그림 5. S-parameter 측정 방법
Fig. 5. Measurement method of S-parameter.

그림 6. 고주파수 변압기 등가 회로
Fig. 6. Equivalent circuit of high-frequency transformer.

과 S_{22} 가 조금씩 차이 나는 것을 볼 수 있다.

기본적으로 주파수가 올라갈수록 변압기 회로에서 기생 성분들이 많이 나타나고, 임피던스에 영향을 미친다. 변압기도 동일하게 저주파에서 나타나지 않던 기생 성분들이 고주파수로 올라갈수록 나타난다. 그 중에 가장 고려해야 할 성분으로는 1차 측과 2차 측 사이의 C_{ps} 와 양측 C_p, C_s 를 고려해야 한다. 이는 권선의 코일에서 도체와 도체 사이의 coupling에 의해 생성되는 회로 상수로서, 전기적 절연 상태인 변압기에서 고주파수 서지가 인가되었을 때 1차 측에서 2차 측으로 에너지가 전달되는 현상으로 알 수 있고, 그림 6은 이를 반영한 고주파 변압기 등가회로이다.

측정한 S-파라메타를 그림 6의 등가회로에 적용하여

그림 7. 2-포트 S-파라메타 측정 결과
Fig. 7. Measurement result of 2-port S-parameter.

표 4. 측정한 변압기의 S-파라메타를 이용한 고주파 등가 회로에서 추출한 회로 상수

Table 4. Circuit constant extracted from equivalent circuit at high-frequency.

	R_{eq}	L_{eq}	R_c	L_m	C_{ps}	C_{eq}
	Ω	mH	Ω	mH	pF	pF
100 Hz	1.14	2	1,569	278	962	837
215 Hz	1.3	1.16	5,777	272	3,135	791
464 Hz	1.3	1.52	4,486	398	4,741	595
1 kHz	1.56	1.52	3,149	274	323	545
2.15 kHz	3.48	1.48	5,304	635	5,615	892
4.64 kHz	7.78	1.36	7,629	757	2,392	727
10 kHz	20.6	1.2	2,809	689	373	689
21.5 kHz	33.8	0.98	2,509	589	840	870
46.4 kHz	50.6	0.84	4,178	777	533	940
100 kHz	51.4	0.72	7,324	703	841	549
160 kHz	70	0.58	6,174	700	896	452
220 kHz	29.6	0.7	4,680	865	695	155
300 kHz	83	0.54	5,666	716	1,025	254
450 kHz	134.8	0.64	7,000	627	1,066	120
640 kHz	126.2	0.24	7,357	519	1,031	230

optimization으로 회로 상수를 추출하였고, 각각의 주파수에서 추출한 값들을 표 4에 나타내었다. 주파수가 올라갈수록 R_{eq} , R_c , L_m 가 증가하고, L_{eq} 가 작아지는 것을 확

그림 8. 측정된 변압기의 S-파라메타와 등가회로 모델에서 얻어진 S-파라메타의 크기 비교
Fig. 8. Comparison of S-parameters: S-parameters from measurement and from equivalent circuit.

그림 9. 측정된 변압기의 S-파라메타와 등가회로 모델에서 얻어진 S-파라메타의 위상 비교
Fig. 9. Comparison of measured phase and calculated phase.

인할 수 있다. 추출한 회로 상수의 타당성을 검증하기 위해 측정된 S-파라메타와 각각의 주파수에서 추출한 회로 상수의 S-파라메타 결과를 그림 8과 그림 9처럼 절대 값과 위상으로 비교하였다. 파형 위에 그려진 동그라미는 회로상수의 S-파라메타 값으로써 그래프 결과를 분석해 볼 때, optimization을 통해 추출한 회로 상수가 VNA로 측정된 S-파라메타의 각각의 주파수와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

측정된 S-파라메타의 각각의 주파수와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

IV. 절연 변압기의 고주파 전달 특성

3-1 ABCD-파라메타의 고주파 전달 특성

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A = \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$$

$$B = Z_0 \frac{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$$

$$C = \frac{1}{Z_0} \frac{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$$

$$D = \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (3)$$

많은 마이크로파 회로망은 두 개 혹은 그 이상의 포트를 갖는 회로망의 직렬연결로 구성되어 있고, 이와 같은 경우에 각각의 2-포트 회로망에 대하여 2×2 전송 매트릭스 즉 ABCD 매트릭스를 정의된 것으로 2-포트 회로망의 ABCD 매트릭스는 전체 전압과 전류들의 항에 의해 식 (2)와 같이 정의된다^[3].

측정된 S-파라메타를 식 (3)을 이용하여 변환할 수 있고, 변환한 값은 그림 10과 그림 11에 크기와 위상으로 나

그림 10. 측정된 변압기의 S-파라메타를 변환한 ABCD-파라메타의 크기
Fig. 10. Measured S-parameter of a transformer to convert magnitude of ABCD-parameter.

그림 11. 측정된 변압기의 S-파라메타를 변환한 ABCD-파라메타의 위상

Fig. 11. Measured S-parameter of the transformer converts the phase of ABCD-parameter.

그림 12. 2-포트 ABCD-파라메타 회로망

Fig. 12. ABCD-parameter of 2-port.

타내었다.

그림 10에서 크기를 관찰해 보면 ~ 100 kHz까지의 A와 D가 1에 C가 0의 값을 가지고 있음을 볼 수 있고, 따라서 절연변압기는 ~ 100 kHz까지는 그림 12의 회로와 같이 동작함을 알 수 있다. 그러나 주파수가 올라갈수록 A, C, D가 각각 1과 0에서부터 변하는 것을 볼 수 있고, 그 이후 주파수 대역에서는 그림 12의 등가회로 모델이 적용되지 않고 100 kHz 이후의 출력 파형 또한 달라지는 것을 확인할 수 있다.

한편, 식 (2)에 명시한 ABCD-파라메타 정의에 따라 A는 I_2 가 0일 때 $\frac{V_1}{V_2}$ 로 나타나므로, 이것을 이용하여 회로의 이득을 표현할 수 있다. 그림 13에 회로의 이득(Gain: $\frac{1}{A}$)을 빨간색 파형으로 나타내었고, 신호 발생기에서 인가하는 입력 전압과 2차 측에서 나오는 출력 전압 비인 이득을 각각의 주파수에 파란 점으로 나타냈다. 그림에서

그림 13. 측정된 S-파라메타를 변환한 이득($1/A$) 파라메타와 각각의 주파수에서 실험을 통해 얻은 실제 이득의 크기

Fig. 13. Parameter of gain($1/A$).

볼 수 있는 바와 같이 추출한 회로 상수와 실험을 통해 구한 이득이 일치함을 확인할 수 있다. 그리고 시간에 따른 전압 입출력 파형과 추출한 회로 상수의 출력 파형을 60 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 220 kHz, 640 kHz에서 그림 14에 비교하였다.

그림에서 녹색은 실험에서의 입력 파형을 나타내고, 파랑색 파형은 측정에서의 출력 파형이며, 빨간색 파형은 simulation의 입력 전압과 출력 전압을 나타낸 것이다. 파형을 비교하여 보았을 때 출력 전압과 위상까지 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해서 S-파라메타를 이용한 고주파 파라메타 추출이 타당함을 증명하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 S-파라메타를 이용하여 절연변압기의 고주파 회로 상수를 효과적으로 추출하였다. S-파라메타는 VNA 장비를 이용하여 변압기의 1차 측과 2차 측을 두 개의 포트로 이용하여 측정하였고, 측정된 S-파라메타 값을 이용하여 ADS(advanced design system)의 데이터 피팅(최적화: optimization)을 통해 회로상수를 추출할 수 있었다. 고주파수의 서지에 대한 변압기의 특성을 관찰하기 위해 주파수가 증가함에 따라 코일 부분에 생성되는 C값을 고려한 등가 회로를 구성하고, optimization을 통해 회로 상수를 추출하였다.

그림 14. 측정된 변압기의 S -파라메타의 등가회로 모델을 이용한 시간 축과 실제 입력과 출력 측정값 결과 비교
Fig. 14. Comparison of simulation and measurement result on the time domain.

이렇게 추출한 회로상수를 S -파라메타의 크기와 위상으로 각각 비교했을 때 값이 일치하는 것을 확인하였고, S -파라메타를 ABCD-파라메타로 변환하여 이득 값을 실제 변압기의 신호 발생기와 오실로스코프를 이용하여 측정된 입력 대비 출력 데이터와 비교하였을 때도 값이 일치하는 것을 확인하였다. 마지막으로 측정에서의 출력 값과 추출한 고주파 파라메타의 시뮬레이션 출력 값이 일

치하는 것을 확인하였으며, 이를 통해서 S -파라메타를 이용한 고주파 파라메타 추출 방법이 타당하다는 것을 알 수 있다. 더 나아가 변압기만의 특성이 아닌 다른 장비들이 연결된 다이내믹 상태의 등가모델에 대한 연구가 진행되어야 한다고 사료된다.

References

- [1] 육종관, 나완수, "PCB 및 IC 회로에서의 EMC 기술 연구 동향", 한국전자파학회논문지, 23(4), pp. 32-42, 2012년 7월.
- [2] Paresh C. Sen, *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, Wiley, 1996.
- [3] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Wiley.com, 2009.
- [4] Biernacki Janusz, Dariusz Czarkowski, "High frequency transformer modeling", *Circuits and Systems, ISCAS 2001. The 2001 IEEE International Symposium on*, vol. 3, IEEE, 2001.
- [5] Ray Ridley, "High frequency power transformer measurement and modeling", *Power* 14, 2007.
- [6] H. Y. Lu et al., "Measurement and modeling of stray capacitances in high frequency transformers", *Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th*

- Annual IEEE*, vol. 2, IEEE, 1999.
- [7] Hai Yan Lu, Jian Guo Zhu, and SY Ron Hui, "Experimental determination of stray capacitances in high frequency transformers", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 18.5: pp. 1105-1112, 2003.
- [8] Mao Xinkui, Chen Wei, "More precise model for parasitic capacitances in high-frequency transformer", *Power Electronics Specialists Conference, 2002. PESC 02. 2002 IEEE 33rd Annual*, vol. 2, IEEE, 2002.
- [9] 윤여근 et al., "철도용 절연 변압기의 고주파 전달특성에 관한 연구", 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp. 934-939, 2012.
- [10] KS C IEC 61000-4-5, "2008 전기자기적합성(EMC) - 제4-5부", 산업통상자원부 기술표준원, 대한민국, 2008년.

김 성 준

2012년 2월: 한국교통대학교 전기공학과 (공학사)
 2012년 8월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
 [주 관심분야] SI/PI Analysis in System

김 태 호

2011년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학사)
 2012년 8월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
 [주 관심분야] SI/PI Analysis in System, EMC analysis in Hybrid Vehicle

류 수 정

2013년 2월: 서경대학교 전자공학과 (공학사)
 2013년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC

김 중 현

2013년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학사)
 2013년 2월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
 [주 관심분야] SI/PI, Data Extraction from noise

나 완 수

1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학
사)

1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학
석사)

1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학
박사)

1991년~1993년: SSCL Guest Collaborator

1993년~1995년: 한국전기연구원 선임연구원

1995년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수

[주 관심분야] SI, PI, EMI/EMC