

SMPS용 고주파 트랜스의 고장의 분석 및 재현시험법에 관한 연구

논 문
60-4-13

A Study on the Failure Analysis and Representation Test Method of High Frequency Transformer for SMPS

임 홍 우[†] · 이 영 주^{*} · 한 지 훈^{*}
(Hong-Woo Lim · Young-Joo Lee · Ji-hun Han)

Abstract - In this paper, we describe the failure analysis and representation test method that applied high frequency transformer for SMPS through analysing insulation resistance, frequency characteristic, CT analysis, Q-factor etc. And we study the judgement method that a high frequency transformer affects to other beside parts in different condition or environment. According to this method, we devise a plan for the field failure prevent and propose the securing product reliability of high frequency transformer.

Key Words : Failure analysis, Representation test, High frequency transformer, SMPS, Reliability test

1. 서 론

고주파 트랜스는 정지형 컨버터, 인버터, 정류기 등 전력 분야의 에너지 변환에 주로 사용되는 부품이다. 이러한 용도에 대한 장치의 신뢰성, 효율성, 경량성의 설계에 있어 기술적, 경험적인 데이터의 부족으로 크게 어려움을 겪고 있는 실정으로 고장분석에 대한 데이터의 확보가 트랜스포머 설계에 있어 중요한 부분을 차지하고 있다.

전력변환에 있어서 평형구동이 확보되지 않을 경우 순수 DC 전류가 1차측에 흐르게 되어 교번 반사이클 동안에 코어가 쉽게 포화되고, 포화된 코어는 공급할 전압을 유지할 수 없게 된다. 또 트랜스포머의 임피던스가 낮아지기 때문에 많은 전류가 흐르게 되고 트랜스포머의 누설 인덕턴스에 의해 스위칭 동안에 고전압의 좁은 펄스(spike)가 발생되어 스위칭소자(MOSFET)를 파괴시키게 된다. 따라서 평형 구동을 위해 스위칭소자 등의 인접 소자들을 확실하게 정합시킬 필요가 있으며 이러한 전원회로에서 스위칭회로는 트랜스를 포함한 인접소자의 R, L, C의 특성에 따라 공진주파수를 설정하고 스위칭주파수가 특정범위에서 작동하도록 설계되어야 한다. 그러나 설계공진이 파괴되면 전압이상, 전류이상, 과열 등의 스트레스를 가중시키게 되고 그로인해 커패시터, 스위칭 소자 등 인접소자의 열화가 촉진되고 고장이 발생하게 된다. 이러한 과정에서 고주파 트랜스는 코일, 코어, 보빈 등으로 구성된 단순한 구조를 가지고 있고 상대적으로 내성이 매우 강하여 인접소자가 먼저 고장이 발생하게 되므로 고장을 분석하는데 그 고려 대상에서 제외되는 경우가 많으며 인접소자가 먼저 고장이 발생하는 문제로 인해 고주

파 트랜스가 전원회로 열화에 미치는 영향을 분석하는 것은 많은 어려움이 있다. 따라서 전원회로 설계자들은 고주파 트랜스의 열화가 전원회로에 미치는 영향을 분석하고 고주파 트랜스에 대한 개선이 이루어진다면 전원회로의 신뢰성을 크게 높일 수 있다는 의견도 많다.[1]~[5]

본 논문에서는 고주파 트랜스가 적용되는 전원회로의 회로를 검토하여 적용 컨버터, 스위칭 주파수, 전압, 전류 등의 고장분석을 통해 적용회로와 유사한 조건의 스위칭 동작 평가지표를 개발하여 환경조건 외의 스위칭 동작조건을 추가하여 스위칭 동작에 의한 내부적인 스트레스를 가중시킬 수 있는 시험을 실시하였고, 비동작조건인 환경스트레스 시험과 상대적으로 비교하며 평가지표에서의 인접소자를 분석하여 트랜스포머가 인접소자에 미치는 영향을 부가적으로 판단할 수 있는 방법을 통해 전력변환에 사용되는 고주파 트랜스의 고장분석 및 그 고장을 재현하는 시험평가방법에 대하여 제안하였다. 이를 통해 필드에서의 고장유발을 방지하는 평가법을 통해 고주파 트랜스가 적용되는 제품의 신뢰성을 확보하는 방안에 대하여 제안하였다.

2. 본 론

2.1 고주파 트랜스의 고장

2.1.1 필드현황 및 문제점

필드에서 조사되는 SMPS용 고주파 트랜스의 고장유형은 파손, 납내열 불량, 깨짐, Short 등 단순한 외관 위주의 고장으로 분석되는 사례가 빈번하다. SMPS에서 스위칭회로는 고주파 트랜스 내의 코일저항 R, 코일의 인덕턴스 L, 기생하거나 공진을 위해 부가되는 C의 특성에 따라 공진주파수가 결정되고 스위칭주파수가 특정범위에서 작동하도록 설계된다. 열화 등의 요소에 의해 설계 시 공진값이 변화하게 되면 전압이상, 전류이상, 과열 등의 스트레스를 가중시키게

[†] 교신저자, 정회원 : 한국기계전기전자시험연구원 책임연구원
E-mail : dyamond@keeti.re.kr

^{*} 비 회원 : 한국기계전기전자시험연구원 선임연구원
접수일자 : 2010년 10월 7일
최종완료 : 2011년 1월 11일

되고 그로인해 커패시터, 스위칭소자(주로 MOSFET) 등 인접소자의 열화가 촉진되어 과고장의 형태로 나타나게 된다. 이러한 과정에서 고주파 트랜스는 코일, 코어, 보빈 등으로 구성된 단순한 구조를 가지고 있고 상대적으로 내성이 매우 강하여 인접소자가 먼저 고장이 발생하게 되고 고장을 분석하는데 그 고려 대상에서 고주파 트랜스가 제외되는 경우가 많다.

필드에서 인접 부품이 먼저 고장이 발생하는 문제로 인해 고주파 트랜스가 SMPS 열화에 미치는 영향을 분석하는 것은 많은 어려움이 있다. 하지만 전원회로 설계자들은 고주파 트랜스의 열화가 전원회로에 미치는 영향을 분석하고 이에 대한 개선이 이루어진다면 전원회로의 신뢰성을 크게 높일 수 있다는 결과로 귀추된다.

2.1.2 Failure Modes Due to Radial Forces

고주파 트랜스는 보빈에 절연된 도체 코일을 감는 구조(Winding)를 가지고 있기 때문에 코일은 바깥방향과 안쪽방향으로 방사상의 힘(Radial Forces)을 받게 되어 코일은 바깥 방향으로는 장력(Tensile), 안쪽 방향으로는 압축(Compressive) 스트레스를 받게 된다. 이러한 구조는 초기에 부적절한 장력으로 권선하거나 코일 간, 코일을 지지하는 보빈, Bending Tape의 팽창계수의 차이가 발생할 경우 코일의 국부적 팽창과 같은 휨 현상이 발생하여 특성변화 및 절연과피 등을 유발한다. 따라서 열적 Stress 인자에 의한 고장메커니즘 및 고장모드에 대한 검증은 필요로 한다.

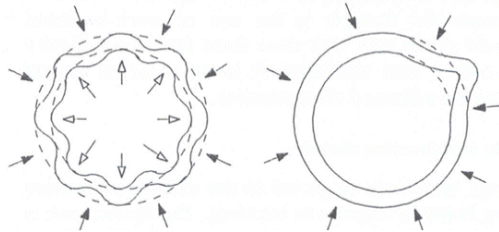


그림 1 Radial Forces에 의한 휨 현상
Fig. 1 Distortion by Radial Forces

2.1.2 Failure Modes Due to Axial Forces

축방향으로 가해지는 압축력 또한 다양한 고장을 유발할 수 있다. 만약 코일을 단단하게 감지 않았을 경우, 코일은 인근의 코일을 축방향에 대해서 가로지르게 되고 이는 절연과피를 유발할 수 있다. 또한 축방향으로 진동에 노출될 경우, 코일 간의 상대적 움직임에 의해 절연과피를 유발할 수 있다. 그림 2는 지지대(Radial Spacer) 사이의 코일이 축방향으로 힘 또는 스트레스를 받아 구부러지고 이로 인해 절연이 파괴될 수 있는 현상을 나타낸 것이다. 그림 3은 축방향 압축력에 의해 코일의 배열이 지그재그로 틀어지고 Bending의 변형 및 코일간 간섭에 의한 절연과피 및 특성변화를 유발하는 현상을 나타낸 것이다. 이러한 요소들에 의해 진동 및 고온 환경에 의한 기계적 Stress인자에 의한 고장메커니즘 및 고장모드에 대한 영향성을 정의할 수 있다.

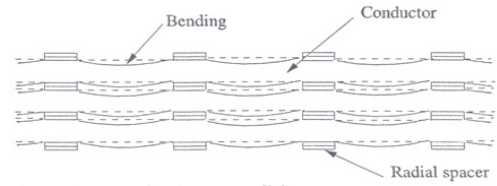


그림 2 Bending between Radial Spacer
Fig. 2 Bending between Radial Spacer

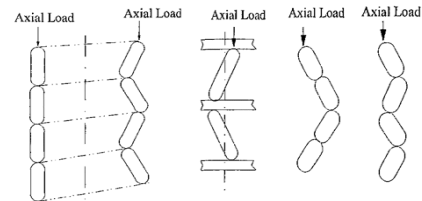


그림 3 Tilting under an Axial Load
Fig. 3 Tilting under an Axial Load

2.2 재현시험 항목 및 시험설계

2.2.1 고장모드 및 고장메커니즘

표 1은 필드에서 발생할 수 있는 고주파 트랜스의 고장 모드 및 고장메커니즘에 따른 영향을 나타낸 것이다. 일반적으로 필드 고장유형을 근거로 고장메커니즘을 분류하였고 필드에서 발생할 수 있는 스트레스에 따른 영향을 근거로 분류한 것이다. 분류된 주요한 고장모드, 고장메커니즘, 유효한 스트레스 인자들에 따른 고장재현을 위한 시험항목 및 시험방법을 설정하게 된다. 고주파 트랜스는 인접소자와 비교했을 때 상대적으로 내성이 강해 필드고장품의 수집하고 고장분석을 통한 데이터를 수집하는데 어려움이 따른다. 그러므로 시험항목 및 시험방법에 따른 고장재현시험을 통해 고장에 대한 맵핑(Mapping)화 작업을 하도록 하였다.

표 1 고주파 트랜스의 고장모드 및 고장메커니즘

Table 1 Failure mode and mechanism of high frequency trans.

고장원인(Stresses and Performance)	고장기구(Failure Mode/Mechanisms)		자화 특성 변화	강도 저하	주파수 특성 변화	캐핑	절연 저항 감소	코일 경화 (파라미터 변화)	기계적 크랙
	페라이트	코일/절연테이프							
온도	○	○	◎		◎	◎			
온습도	◎	◎	◎		◎	◎			○
온도변화	○	◎	○		○	○			◎
진동		○			◎				○
충격		○			◎				○
전압						◎	◎		

* 고장모드에 관련된 중요도에 따라 표시 : ◎가장 중요 ○중요 ◇보통
* 고장기구(Failure Mode/Mechanism)는 해당 부품·소재에서 발생할 수 있는 모든 고장형태를 나타냄

2.2.2 재현시험의 설계

필드 환경 조건에 따른 페라이트의 기계적 강도(Strength) 평가를 위해 40W 급 SMPS에 사용되는 고주파 트랜스에 대해 시간에 따른 강도 평가를 시행하고 열충격, 고온고습, 고온 조건에서의 기계적 열화 시험을 계획하였고 환경조건에 따른 페라이트의 전기적 열화 평가를 위해 Ring형의 인덕턴스, 투자율 등 전기적 특성 측정 및 열충격, 고온고습, 고온, 저온 조건에서의 열화 시험을 실시하였다.

표 2 시험항목 및 시험방법

Table 2 Test items and methods

구분	Stress	Failure Mode/ Mechanisms	시험방법	비고
비동작 시험	온습도	Open, 절연파괴, 특성변화	85℃, 85 %R.H., 매100시간 측정	
	고온	Open, 절연파괴, 특성변화	130℃(B종 절연), 매100시간 측정	B종 절연
	열충격	크랙, 파손, 절연파괴, 특성변화	-40℃, 1시간, 130℃ 1시간, 100cycle 측정	
	진동	코일변형, 절연파괴, 특성변화 확인	랜덤진동, 매 100시간 측정	
동작 시험	온습도	Open, 절연파괴, 특성파라미터 변화	10kHz ~ 100kMz sweep, 85℃, 85 %R.H., 매100시간 측정	

2.3 시험결과 및 분석

2.3.1 절연저항 특성분석

2,000 시간 고온시험결과 코일을 감싸고 있는 절연물의 경화에 따른 코일 간 공간거리 증가로 추정되는 절연저항 증가가 나타났으며, 이는 지속적인 고온스트레스 증가로 인해 절연물이 파괴되어 절연이 파괴되는 것으로 판단된다.

열충격시험 결과 절연저항의 변화가 상대적으로 적었으나 200 사이클 후 보빈의 깨짐 현상이 발생하였고 이는 열충격 스트레스는 각 구성품의 열팽창 계수 차이로 인해 가해지는 물리적 스트레스가 크랙이나 깨짐을 유발할 수 있으며 코어의 강도에 영향을 미칠 것으로 분석된다.

2,000 시간 고온고습시험결과 절연저항이 크게 감소하였다. 이는 높은 주파수와 전압에서 동작하는 트랜스포머의 내부 코일에서 눈으로 보이지 않는 Short나 Bunt 현상을 유발할 것으로 판단되며 지금까지 가장 유효한 스트레스 인자가 온/습도에 의한 것으로 추정된다. 특성변화추이를 살펴보면 인덕턴스와 임피던스는 점차 증가하고 있으며, 첨예도를 나타내는 Q-Factor는 점차 감소하고 있다.

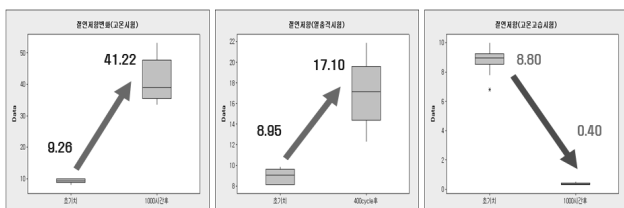


그림 4 시험항목(열화인자) 별 절연저항 변화(10⁵ MΩ)

Fig. 4 Insulation resistance according to test item

2.3.2 페라이트 자성특성 변화분석

고주파 트랜스를 구성하고 있는 페라이트는 고온고습에 의한 페라이트 결정구조 변화에 따라 자화특성이 변화하게 되며 그 결과 주파수 특성이 변하게 된다. 이것은 수분침투에 의해 페라이트 결정구조가 틀어져 특성이 변화하게 된다. 그림 4는 위상차에 의한 입출력 주파수특성을 나타낸 것으로 그림 5의 고온고습시험 전 후의 결정구조 및 입출력 주파수 실측을 나타낸 것이다. 동 위상으로 시험 했을 경우 입출력 주파수 특성이 시험 후 히스테리시스 편차가 크게 발생함을 확인할 수 있다.

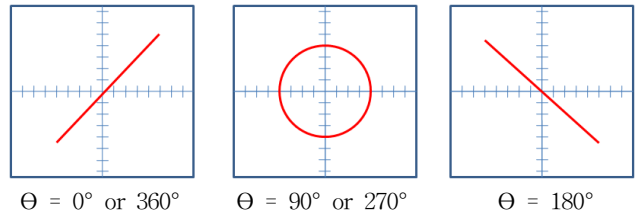
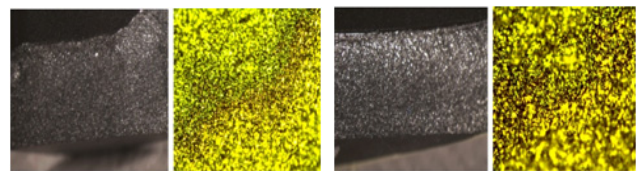


그림 5 입출력 위상차에 의한 주파수 특성

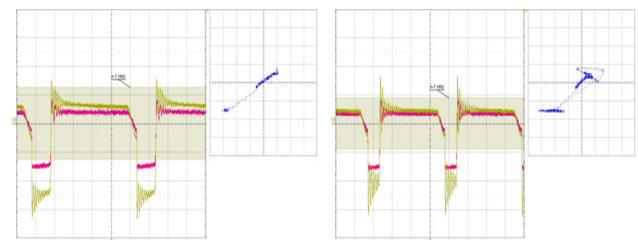
Fig. 5 Frequency characteristics by phase difference



(a) 고온고습영향 전 (b) 고온고습 영향 후

그림 6 고온고습 영향 시험 전 후 결정구조 비교

Fig. 6 Core crystal structure by high temperature and humidity test



(a) 고온고습영향 전 (b) 고온고습 영향 후

그림 7 고온고습 영향 시험 전 후 주파수 특성 비교

Fig. 7 Frequency characteristics by high temperature and humidity test

2.3.3 코일 절연저항 감소

코일의 축방향으로 가해지는 압축력에 의해 다양한 고장을 유발할 수 있다. 만약 코일을 단단하게 감지 않았을 경우, 코일은 인근의 코일을 축방향에 대해서 가로지르게 되고 이는 절연파괴를 유발할 수 있다. 또한 축방향으로 진동에 노출될 경우, 코일 간의 상대적 움직임에 의해 절연파괴를 유발할 수 있다. 이것은 고온고습 및 고온에서 코일간 절연저항이 감소하게 되며 코일의 경화에 기인하며 인덕턴스 L,

Q-factor, 기생 캐패시터 등의 파라미터가 변하게 된다. 그림 7은 고온동작시험(130℃)에서 시험 전 후 CT 사진을 나타낸 것으로 시험 후 고주파 트랜스의 코일의 형상 변화가 크게 발생함을 확인 할 수 있다.

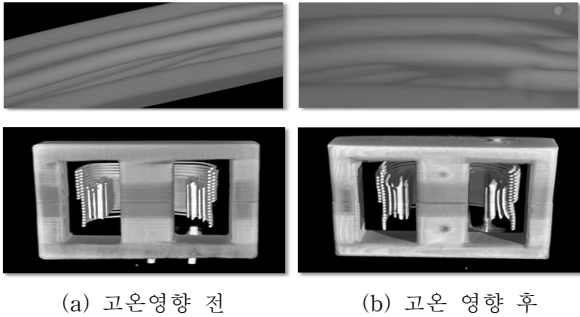


그림 8 온도(고온) 영향 시험 전 후 트랜스 구조변화
Fig. 8 CT analysis by high temperature test

2.3.4 페라이트 및 보빈 크랙

진동시험은 우선적으로 축방향 힘(Axial Force)이 지속적으로 가해졌을 때, 코일 및 코일배열의 변형으로 인한 특성 변화와 절연파괴라는 고장메커니즘을 검증하기 위한 시험이다. 진동시험을 실시하시에 앞서 적정한 진동주파수를 설정하기 위해 공진주파수를 검출하고 검출된 공진주파수를 기준으로 지속적으로 진동에 의한 축방향 힘(Axial Force)의 스트레스를 가하여 고장재현시험을 하도록 하였다. 공진주파수 검출을 위해 각 축방향(x/y/z)으로 가속도 1 g, 주파수 범위 10 ~ 150 Hz 및 스위핑 속도 1옥타브/분으로 1시간동안 시험을 실시하였으며 그림 9와 같이 공진주파수는 15 Hz와 50 ~ 55 Hz에서 검출되었다. 하지만 y축 방향에서 3개의 시료에서 코어가 깨지는 현상이 발생하였으며, 이는 지속적인 진동을 통해 코일의 변형을 유발시키기 위한 시험계획과 달리 진동이 코어의 깨짐을 먼저 유발할 수 있다는 것으로 판단된다.

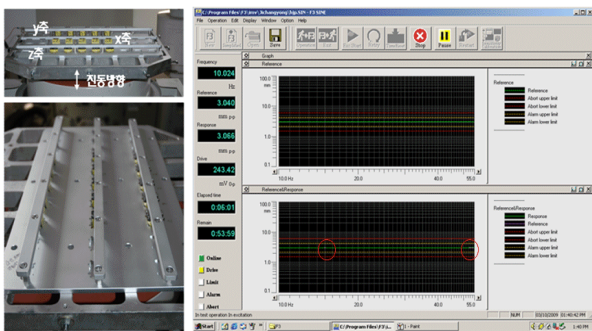


그림 9 진동시험용 지그 및 공진주파수 검출
Fig. 9 Jig & Fixture for vibration test and resonance frequency

한편, 초기 잠재고장 스크리닝은 보빈의 강도 변화 개선을 검증하기 위해 온도급변(-40℃ ~ 80℃, 유지시간 30분) 조건에서 1,000 사이클 동안 시험을 수행한 결과 보빈 깨짐 현상이 발생하였다. 이는 보빈의 기계적 크랙이 발생할 공

정상의 잠재적 문제를 내재하고 있는 것을 의미하며 제조공정 시 와이어(코일)의 말단 처리 시 장력이 팁의 말단 부분에 집중하여 작용하게 되며 이때 잠재적 고장을 갖는 메커니즘으로 확인할 수 있다.

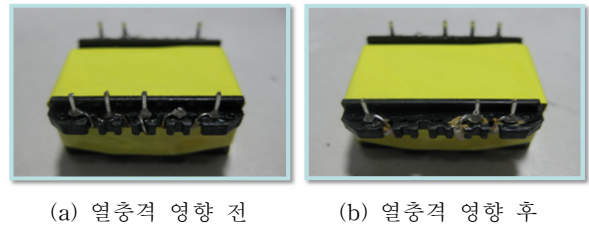


그림 10 열충격 영향 시험 전 후 트랜스 구조변화
Fig. 10 Trans.(bobbin) crack by thermal shock test

3. 결 론

재현시험을 토대로 하여 SMPS용 고주파 트랜스의 주요한 고장모드, 고장메커니즘, 유효한 스트레스 인자들을 도출하였고 그에 따른 영향성을 분석하기 위한 시험법 설정하였으며 이에 대한 각 구성요소 부품인 페라이트, 코일, P.E. 테이프, 보빈 등의 소재 및 재료의 고장분석을 통한 분석방법을 제안하였다.

고주파 트랜스는 인접소자와 비교했을 때 상대적으로 내성이 강해 필드고장품의 수집하고 고장분석을 통한 데이터를 수집하는 것이 어려워 설정된 시험항목 및 시험방법에 따른 고장재현시험을 통해 고장에 대한 맵핑(Mapping)화 작업을 통해 재현 검증시험을 진행하였다.

결과를 정리하면 유효한 스트레스 인자와 고장재현을 위한 비동작시험 중 고온고습/고온/열충격시험에 대한 시험결과로 페라이트 자성특성변화에 따른 주파수특성변화, 절연저항 감소, Q-factor 등을 통해 고장분석을 수행하였다. 시험시간에 따른 변화가 큰 절연저항의 경우, 고온시험과 열충격 시험에서 초기에 코일을 감싸고 있는 절연물(합성수지)이 경화로 인한 증가 후 점차 감소하였고, 고온고습시험에서 초기에 급격히 감소한 후 서서히 지속적으로 감소하였다. 또한 잠재고장 재현을 위해 축방향 힘(Axial Force)이 지속적으로 가해졌을 때, 코일 및 코일배열의 변형으로 인한 특성 변화와 절연파괴라는 고장메커니즘을 검증하였고 진동시험에서는 공진주파수가 15 Hz와 (50 ~ 55) Hz에서 검출되었고 코어(페라이트)의 깨짐 현상으로 유도하였다.

대상제품이 적용되는 전원회로의 회로도를 검토하여 적용 컨버터, 스위칭 주파수, 전압, 전류 등을 분석하여 대상 트랜스포머의 사용조건에 가까운 동작조건을 형성할 수 있는 스위칭 동작 평가지그를 통해 스위칭 동작에 의한 내부적인 스트레스를 가중시켜 트랜스포머의 열화를 촉진하고, 비동작 시험에 의한 열화시료와 상대비교를 통해 스위칭 동작에 의한 영향성을 분석하고 부가적으로 트랜스포머가 인접소자에 미치는 영향을 분석하기 위한 스위칭 동작평가 시험(고온고습/고온)을 실시하여 재현시험 효과를 검증하였다. 향후 이러한 분석을 바탕으로 고장재현방지를 위한 설계시 반영이 이루어져야할 기준설정에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Transformer Engineering Design and Practice, S.V, Kulkarni, S.A. Khaparde, 2004
- [2] Rational fault analysis, edited by Richard Seaks and S. R. Liberty
- [3] Transformer and Inductor Design handbook, Colonel Wm. T. McLyman
- [4] B. Lu, W. Liu, Y. Liang, F. C. Lee, J. D. Van Wyk, "Optimal design methodology for LLC resonant converter", IEEE, pp. 533-538, 2006
- [5] Sang-Gab park, Sang-Kyu han, Chung-Wook Roh, Sung-Soo Hong, " A High Efficiency Multi Output PDP Power System with Single Transformer Structure", 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 280-282, 2007

저 자 소 개



임 홍 우 (林 洪 雨)

1972년 11월 12일생, 1998년 2월 조선대학교 전기공학과 졸업, 2000년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2004년 8월 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2004년 1월 ~ 현재 한국기계전기전자시험연구원 책임연구원



한 지 훈 (韓 知 勳)

1980년 1월 17일생, 2004년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업, 2006년 2월 동대학원 전자공학과 졸업(석사), 2008년 2월 동대학원 전자공학과 박사수료, 2008년 3월 ~ 현재 한국기계전기전자시험연구원 선임연구원



이 영 주 (李 永 周)

1977년 2월 28일생, 2003년 2월 인하대학교 전자공학과 졸업, 2005년 2월 동대학원 전자공학과 졸업(석사), 2005년 3월 ~ 현재 한국기계전기전자시험연구원 선임연구원