https://doi.org/10.6113/TKPE.2018.23.2.101

주택용 단상 ESS-PCS의 LC 필터위치에 따른 상용변압기의 특성

김용중[1], 김효성†

Characteristics of Utility Transformer on Household Single-Phase ESS-PCS According to LC Filter Location

Yong-Jung Kim[1] and Hyosung Kim†

Abstract

Shortage of electric power occurs frequently along with increased electric power demand. ESS is a precaution to solve this issue. Household ESS has a capacity of approximately 3 kW/7 kWh. Household ESS batteries are typically designed with nominal voltages between 40 and 50 V. To connect household ESS with a 220 V AC system, low battery voltages in power conditioning system (PCS) should be boosted. To boost low battery voltage and match it with AC grid voltage, the use of a transformer for a commercial frequency can be considered. To attenuate switching harmonics of the household single-phase ESS-PCS, LC filter can be installed in two positions: on the primary side or on the secondary side of a transformer. A method has been used generally in single-phase inverters for the ESS-PCS. In another method, however, the output efficiency of the ESS-PCS may be decreased. Parasitic components of the transformer can affect voltage losses, when the square wave with the switching frequency in the ESS-PCS is passed through the transformer windings. In this work, the characteristics of the transformer according to the position of an LC filter are investigated for household single-phase ESS-PCS.

Key words: ESS(Energey Storage System), PCS(Single-phase Power Conditioning System), Transformer, LC filter, Voltage transfer ratio

1. 서 론

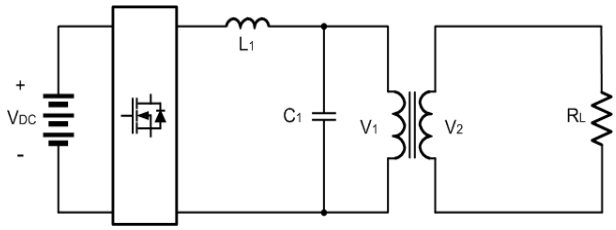
최근 전력수요의 급격한 증가로 인해 전력설비의 공급능력을 초과하면서 대규모 정전 사태가 발생하는 일이 빈발함에 따라, 전력망에서 수요와 공급의 완충역할을 하는 Energy Storage System(ESS)에 대한 관심이 높아지고 있다.

ESS는 교류 계통이 안정된 경우 배터리를 충전시켜서 에너지를 저장하며, 교류 계통이 불안정 하거나 전력공급이 못 미치는 경우 인버터를 통해 배터리에 저장된 에너지를 사용한다. 3~7kWh 급 주택용 ESS의 배터리 전압은 통상적으로 40~50V로 설계되며 계통 전압보다 매우 낮기 때문에 계통전압에 맞추어 승압을 해주어야 한다.

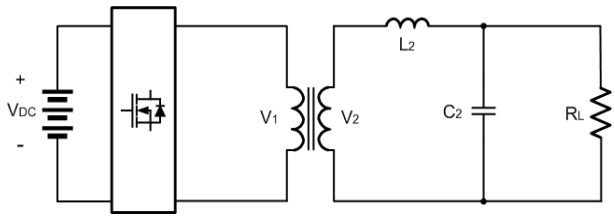
승압의 방법으로 DC/DC 컨버터를 사용하면 PCS의 부피와 중량을 감소시킬 수 있다. 그러나 PCS의 직렬요소인 DC/DC 컨버터는 전력회로 및 제어기가 갖는 고장율로 인하여 전체 시스템의 고장율을 증가시키는 요인이 된다. 따라서, 중단 없는 전력 공급을 수행해야 하는 ESS의 신뢰성을 높이는 측면에서는 상대적으로 고장율이 낮은 수동부품인 상용 변압기를 사용하는 것이 바람직하다.

상용변압기를 사용할 경우 PCS의 교류측 전압 및 전류 파형을 정현적으로 만들어주기 위한 LC 필터는 일반적으로 상용 변압기의 1차측에 설치하였으나, 가정용 ESS와 같이 PCS의 직류링크측 전압이 낮은 경우는 저

Paper number: TKPE-2018-23-2-4
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689
[1] Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University
Manuscript received Jan. 4, 2018; revised Jan. 22, 2018; accepted Feb. 5, 2018



(a) LC filter on a primary side of transformer



(b) LC filter on a secondary side of transformer

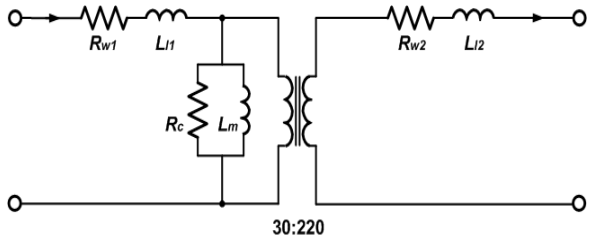
Fig. 1. Circuit topology for ESS-PCS.

TABLE I
SPECIFICATION FOR RESIDENTIAL ESS

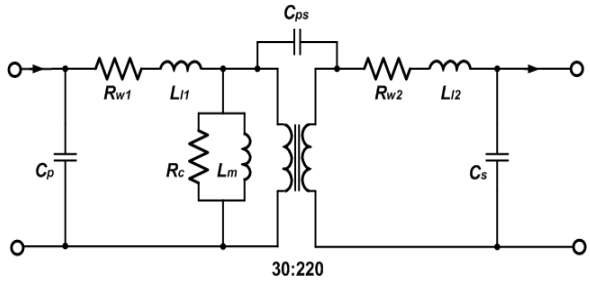
Parameters	Value
P_{OUT}	3[kVA]
V_{DC}	27[V_{DC}]
M_a	0.8
L_1	56[uH]
C_1	250[uF]
L_2	3[mH]
C_2	4.7[uF]
R_L	26.7[Ω]
N_1 : N_2	30:220

전압/대전류용 필터 인덕터를 제작하는 것이 쉽지 않다. 예를 들어, 3kVA의 정격출력에 22V급의 저전압계통에 설치하는 필터인덕터는 약 136A의 허용전류를 갖는 굵은 각형도체가 요구되지만, 같은 정격출력에 220V의 고전압계통에 설치하는 필터인덕터는 약 14A의 허용전류를 갖는 연선도체로 제작이 가능하므로, 제작하기도 간편하고 제작비도 저렴해 진다. 더욱이 상용전압인 220V급 필터인덕터는 일반적으로 산업체에서 많이 사용되는 표준적인 제품이기 때문에 구입이 용이하다.

따라서 성능이 보장된다면 교류측 LC 필터를 상용 변압기의 2차측에 설치하는 것이 바람직하다. 하지만 2차측에 LC 필터를 설치할 경우 상용변압기에 고주파 PWM 파형이 입력되고 그로 인해 효율이 낮아질 수 있다. 본 논문에서는 상용 변압기를 사용하는 가정용 ESS의 고주파 스위칭 구형파 입력에 따른 상용 변압기의 특성에 대하여 연구한다.



(a) Equivalent circuit with low frequency input



(b) Equivalent circuit with high frequency input

Fig. 2. Equivalent circuit of transformer.

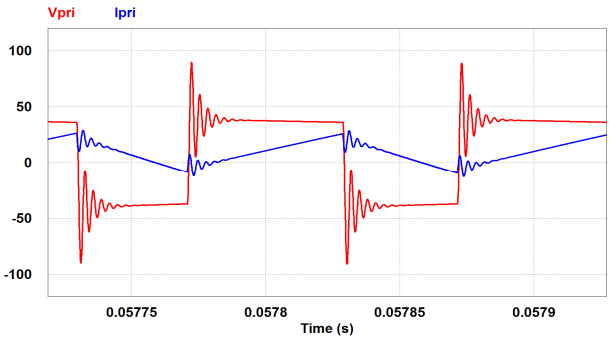
2. 필터위치에 따른 출력특성

2.1 필터위치에 따른 ESS-PCS 토폴로지

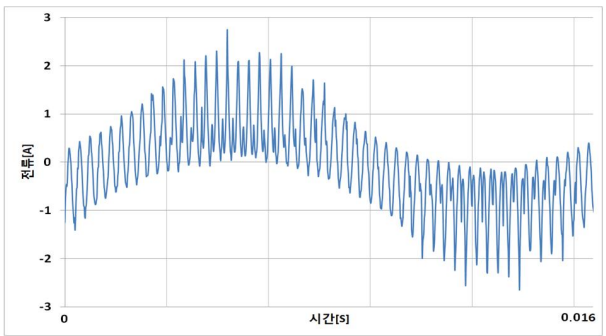
그림 1은 교류측 LC 필터의 위치에 따른 단상 ESS-PCS의 두 가지 전력 회로 토폴로지를 보인다. 그림 1(a)는 기존에 사용되는 전력회로 토폴로지로서 상용변압기 1차측에 LC 필터가 위치한 모양으로 PCS의 정지전력형 스위치에 의하여 발생된 고주파의 PWM 구형파가 LC 필터를 거쳐 정현파를 출력 한 후 상용 변압기에 의하여 승압된다. 그림 1(b)의 전력 회로 토폴로지는 상용변압기의 2차측에 LC 필터가 위치한 모양으로 PCS의 정지전력형 스위치에 의하여발생된 고주파의 PWM 구형파가 그대로 상용변압기에 의하여 고전압으로 승압된 후 LC 필터를 거쳐 정현파를 출력하게 된다.

표 1은 LC 필터의 위치에 따른 주택용 ESS-PCS의 출력특성 분석조건을 보인다. 본 연구에서는 제시된 두 가지 전력회로 토폴로지에 따라, LC 필터의 위치를 바꿔가며 그에 따른 상용변압기의 1차측 및 2차측 특성을 비교한다. L1 및 C1은 LC 필터가 상용변압기 1차측에 위치하는 경우의 필터 값이고, L2 및 C2는 LC 필터가 상용변압기 2차측에 위치하는 경우의 필터 값이다. 퍼유닛 개념에서 두 필터의 값은 전기적으로 동등하다.

그림 2는 두 가지 ESS-PCS 토폴로지에 대한 전기적 등가회로이다. 그림 2(a)에서 상용변압기에 60Hz의 기본파 전압이 인가된 경우와 그림 2(b)에서 10kHz의 고주파 PWM전압 파형이 인가된 경우 변압기의 등가 회로는 각기 다른 특성을 갖는다. 이는 저주파에서는 보이지 않았던 기생 성분들이 고주파로 올라갈수록 나타나기 때문이다. Cp, Cs, Cps는 권선의 코일에서 도체 사이의 coupling에 의해 생성되는 회로 상수이다.



(a) Simulated waveform



(b) Experiment waveform

Fig. 3. Excitation current by square wave with 10kHz switching frequency in primary side of transformer.

2.2 변압기 여자전류 특성

상용변압기에 10[kHz]의 PWM 구형파가 전달되는 것은 식 (1)과 식 (2)로 설명할 수 있다.

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \tag{1}$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)는 패러데이의 법칙으로써 변압기의 여자원리를 설명한다. 즉, 상용변압기의 1차측에 감긴 권선수에 변압기의 철심에 흐르는 자속의 시간에 대한 미분 값을 곱한 것이 입력전압이고, 상용 변압기의 2차측에 감긴 권선수에 변압기의 철심에 흐르는 자속의 시간에 대한 미분 값을 곱한 것이 출력전압임을 뜻한다. 즉, 변압기의 1차측 코일과 2차측 코일을 관통하여 동일한 크기의 자속이 형성되며, 이 자속은 변압기 1차측에 형성되는 여자전류에 의하여 발생된다.

그림 3은 정현파 PWM 스위칭 전압을 상용변압기의 1차측에 인가하였을 경우의 여자전류 특성을 보인다. 그림 3(a)는 PSIM을 사용하여 상용 변압기에 10[kHz]의 구형파 전압을 인가했을 때 발생되는 여자전류의 시뮬레이션 파형이다. 그림2(b)에서 설명했듯이 고주파의 영향으로 생긴 기생성분으로 인해 1차측 여자전압에 공진현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 여자전류는 구형파의 전압에 동기하여 증가/감소하는 삼각파형을 보인다. 그림 3(b)는 상용주파수의 한 사이클에서 PWM 스위칭 전압에 따른 여자전류의 특성을 보기위한 실험파형이다. 여기서는 보기 쉽게 하기 위하여 실제 상용변압기에 3[kHz] 구형파 전압을 가했으며, 기본 60[Hz]의 여자전류에 3[kHz]의 ripple 성분이 포함되는 것을 볼 수 있다. 만일 PWM 스위칭 주파수가 10[kHz]로 증가한다면, 변압기의 여자인덕턴스가 변하지 않는 한 리플성분 여자전류의 크기는 주파수에 역비례 하므로 약 3분의 1로 감소한다. 따라서, 상용변압기의 1차측에 PWM 스위칭에 의한 구형파 전압이 인가되는 경우, 변압기 1차측에는 기본파 전압에 대한 여자전류성분에 더해져서 스위칭 주파수에 따른 리플성분의 전류가 흘러서 철손과 동손이 증가하기는 하지만, PWM 스위칭에 의한 구형파 전압은 식 (1) 및 식 (2)에 의한 원리에 의하여 변압기의 2차측으로 무난히 전달되는 것을 알 수 있다.

TABLE II
EXPERIMENTAL RESULTS

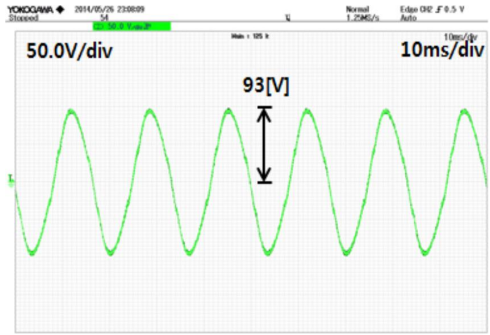
LC Filter position	Primary side	Secondary side
Vpeak[V]	93	91
Vrms[V]	66.61	64.53
THD[%]	4.13	3.72

2.3 출력전압 특성

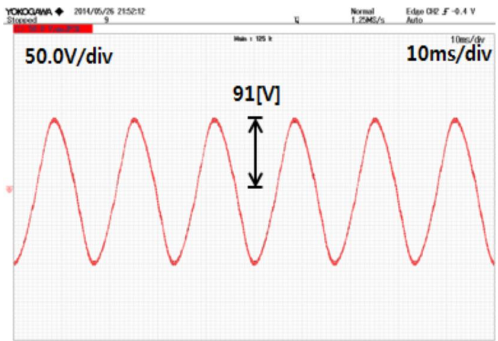
그림 4는 두 가지 토폴로지를 갖는 ESS-PCS의 최종 출력단자의 전압파형을 비교 하였다. 그림 4(a)는 LC 필터가 변압기 1차측에 위치하는 ESS-PCS 전력회로 토폴로지의 출력전압 파형을 보이며, 이때 출력전압의 피크값은 93[V]이다. 그림 4(b)는 LC 필터가 변압기 2차측에 위치하는 ESS-PCS 전력회로 토폴로지의 출력전압 파형을 보이며 출력전압의 피크값은 91[V]로서, 변압기 1차측에 LC 필터가 위치하는 전력회로 방법에 비하여 약 98%의 전압이 출력되는 것을 볼 수 있다. 이는 LC 필터가 변압기 2차측에 위치하는 ESS-PCS 전력회로 토폴로지가 LC 필터가 변압기 1차측에 위치하는 ESS-PCS 전력회로 토폴로지와 거의 동일한 부하출력전압을 갖는다는 것을 의미한다.

표 2는 그림 4의 실험 파형에 대한 실효전압과 THD 분석 결과이다. 같은 퍼유닛 임피던스를 갖는 LC 필터를 설치하였음에도, 변압기 2차측에 필터를 설치하는 경우의 THD가 더 개선되는 것을 볼 수 있다. 이는 변압기의 누설리액턴스가 필터 인덕턴스의 값을 증가시키는 효과가 있기 때문인 것으로 분석된다.

그림 5와 그림 6은 본 연구에서 제시된 두 가지 전력회로 토폴로지에 따른 변압기 1차측 및 2차측 전압파형을 상세히 분석한 결과를 보인다. 그림 5는 변압기 1차

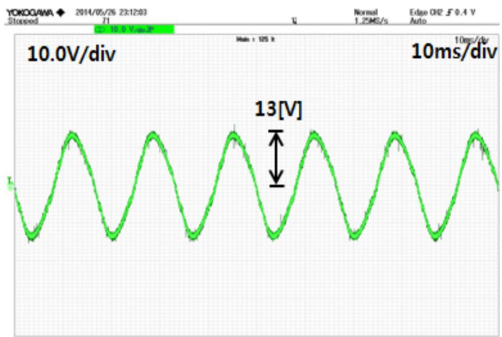


(a) LC filter on a primary side of transformer

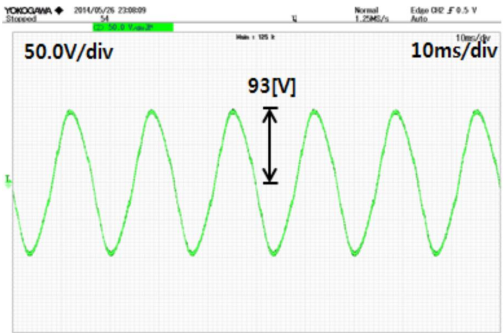


(b) LC filter on a secondary side of transformer

Fig. 4. Output voltage in ESS-PCS.



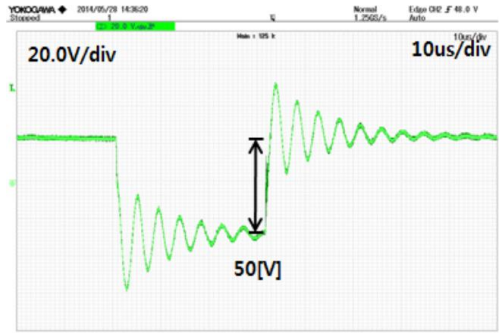
(a) Voltage waveform on primary side of transformer (Sine wave with 60Hz)



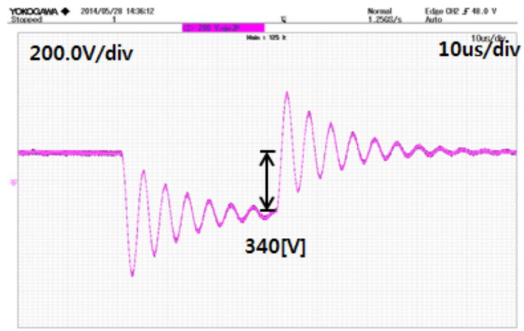
(b) Voltage waveform on secondary side of transformer (Sine wave with 60Hz)

Fig. 5. Experimental waveforms of ESS-PCS.

측에 LC 필터를 설치한 ESS-PCS 전력회로 토폴로지에 따른 상용변압기 1차측 및 2차측 전압파형으로서, LC



(a) Voltage waveform on primary side of transformer (Square wave with 10kHz)



(b) Voltage waveform on secondary side of transformer (Square wave with 10kHz)

Fig. 6. Experimental waveforms of ESS-PCS with LC filter on a secondary side of transformer.

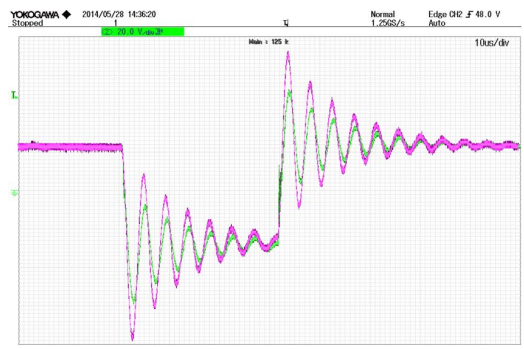


Fig. 7. Primary and secondary voltage waveforms of ESS-PCS with LC filter on a secondary side of transformer.

필터에 의하여 스위칭 성분의 고조파는 제거되고 기본파 성분의 전압이 변압기를 통하여 승압된다. 그림 5(a)는 변압기 1차측 전압파형이고, 그림 5(b)는 같은 조건의 변압기 2차측 전압파형이다. 1차측에 LC 필터를 설치한 ESS-PCS 전력회로 토폴로지에 따른 상용변압기 1차측 전압의 RMS값은 9.22[V]이고 2차측 전압의 RMS값은 65.3[V]으로서 전압 변환비는 약 7.08배이다.

한편, 그림 6은 변압기 2차측에 LC 필터를 설치한 ESS-PCS 전력회로 토폴로지에 따른 상용변압기 1차측 및 2차측 전압파형으로서, PWM으로 스위칭된 10[kHz] 주파수 대역의 구형파 전압이 변압기를 통하여 승압된

다. 그림 6(a)는 변압기 1차측 전압파형이고, 그림 6(b)는 같은 조건의 변압기 2차측 전압파형으로서 10[kHz] 주파수 대역의 구형파가 전달되는 것을 볼 수있다. 변압기 2차측에 LC 필터를 설치한 ESS-PCS 전력회로 토폴로지에 따른 상용변압기 1차측 구형파의 정상상태 peak 값은 50[V]이고 2차측 구형파의 정상상태 peak값은 340[V]으로 전압 변환비는 약 6.8배이다. 이것으로 보면 두 토폴로지에 따른 전압변환비의 차이는 약 96%인 것으로 보인다.

이는 그림 4에서 보이는 두 토폴로지의 최종 출력단자 전압변환비의 차이인 98% 보다 작다. 그 이유를 설명하기 위하여, 그림 7과 같이 변압기 2차측에 LC 필터를 설치한 ESS-PCS 전력회로 토폴로지에 따른 상용변압기 1차측 전압에 전압변환비 6.8배를 곱하여 2차측 전압에 중첩한 모양을 보인다. 즉, 1차측 전압과 2차측 전압을 등가화시킨 것이다. 이때 두 파형은 일치해야하지만, 그림 7에서 1차측 전압의 공진크기보다 2차측 전압의 공진크기가 더 커지는 것을 알 수 있다. 이는 최종적으로 2차측 기본파 전압의 RMS값을 증대시키는 현상으로 나타나며, 전압변환비의 증대를 가져오는 것으로 파악된다.

3. 결 론

본 논문에서는 주택용 단상 ESS-PCS의 LC 필터 위치에 따른 상용변압기의 특성을 비교 연구하였다. 변압기 2차측에 LC 필터를 설치한 ESS-PCS 전력회로 토폴로지에 10[kHz]의 구형파가 상용변압기에 입력될 때 상용변압기 내의 기생 성분들의 증가로 공진이 발생한다는 것과 고주파인 구형파가 변압기를 통과하는 원리를 규명하였다. 또한 변압기 1차측에 LC 필터가 위치한 ESS-PCS 전력토폴로지와 변압기 2차측에 LC 필터가 위치한 ESS-PCS 전력토폴로지에서 변압기의 전압 변환비는 피크치를 기준으로 98%로서 거의 동등하다는 것을 확인 하였다. 이는 가정용 ESS-PCS를 구축하는데 있어서 제작하기가 용이하지 않고 비용이 증가하는 저전압/대전류형 필터 인덕터를 사용하는 대신에 표준적으로 많이 사용되며 제작하기도 간편하여 비용이 적게 드는 220V용 필터인덕터를 사용할 수 있다는 장점을 제공한다. 또한 상용변압기의 누설인덕턴스를 활용하여 필터 인덕터를 대체함으로써 단순하고 경제성 있는 LC 필터 솔루션을 제공할 수 있다. 본 연구에서는 상용변압기의 철심을 일반적인 규소강판을 사용하였지만, 변압기 철심을 아몰퍼스 강판 등 고주파 특성이 좋은 코어를 사용한다면 변압기 2차측에 LC 필터가 위치한 전력회로 토폴로지가 전압 사용률 면에서도 우수한 성능이 보장될 것으로 예상된다.

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (2016R1D1A3B01008279)

References

[1] S. M. Lee, T. S. Yu, and H. S. Kim, “A design of power circuit and LCL filter for switching mode PV simulator,” *The Transaction of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 5, pp. 431-437, Oct. 2012.

[2] Y. Xue, L. Chan, S. B. Kiaer, J. Bordonau, and T. Shimizu, “Topolgies of single-phase inverters for small distrbuted power generator; an overviw,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, pp. 1305-1314, Sep. 2004.

[3] IEEE Standard P1547 Std: Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems.

[4] S. J. Kim, S. J. Ryu, T. H. Kim, J. H. Kim, and W. S. Nah, “High-frequency parameter extraction of insulating transformer using S-parameter measurement,” *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 3, No. 25, pp. 259-268, Mar. 2014.

김용중(金龍中)

1988년 11월 10일생. 2013년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2015년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 박사과정.

김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1997년 일본 오까야마대학 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.