

## 배전계통 연계형 태양광발전 시스템의 계통연계 하이브리드 변압기 적용에 따른 고조파 저감 시뮬레이션 분석

(Analysis of Harmonic Reduction Effects of Grid-Connected Hybrid Transformer on Photovoltaic Power Generation System Connected to Distribution System)

오진택\* · 이재호 · 고광철\*\*

(Jin-Taek Oh · Jae-Ho Rhee · Kwang-Cheol Ko)

### Abstract

As the power trading system diversifies and the amount of power generated by the photovoltaic power generation system increases due to its increased efficiency, the number of photovoltaic power generation system connected to power system is on a rising tendency. The harmonic components, produced in the process of connecting the photovoltaic power generation system to the power system, decrease the power quality of the power system and cause malfunctioning on the measuring devices. In this paper, the reduction of harmonic components are simulated using hybrid transformer instead of grid-connected transformer. The hybrid transformer has zig-zag windings and the voltage phase is shifted about 30 degrees. The hybrid transformer is modeled to have the transformation ratio of 370V / 22,900V. Through the simulation, it can be seen that the harmonic components on the voltage is reduced by min. 2% and the harmonic components on the current is reduced by min. 15%. Therefore, the hybrid transformer can be used in protecting the power system from the harmonic components of the photovoltaic power generation system.

Key Words : Photovoltaic Power Generation System, Hybrid Transformer, Harmonic Reduction

### 1. 서 론

기존의 수력 및 화력, 원자력의 발전방식은 소비적

발전방식으로서 온실가스, 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 원자력 폐기물 등에 의한 환경파괴가 발생하며, 특히 산업의 발전과 정보화로 인하여 전기에너지 사용량이 폭발적으로 증가함에 비해 위와 같은 이유로 인하여 발전소의 증설에 한계가 초래되고 있다. 또한 국제적으로 환경 보호와 이산화탄소 배출량 규제 강화에 따라 기존 발전방식의 대안으로 신재생 에너지에 대한 관심과 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1-2].

\* Main author : Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea

\*\* Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea

Tel : 02-2220-0348, Fax : 02-2220-1886

E-mail : kwang@hanyang.ac.kr

Received : 2017. 1. 17.

Accepted : 2017. 3. 7.

신재생 에너지에는 태양광발전, 풍력발전, 연료전지 등의 발전형태가 있으며, 그 중 태양광발전은 셀과 모듈의 발전 효율이 최대 30%로 향상되어 태양광이 있는 곳이면 어디든 설치가 가능하다는 장점을 나타낸다. 이런 장점에 기인하여 근래에는 공공건물 또는 대형건물의 지붕에는 태양광발전의 설치가 확대되고 있다[3-4]. 이와 같은 발전설비의 증가에 따라 발전량으로 비교했을 경우 화력, 원자력, 수력에 이어 제4의 발전 형태로 자리를 잡았다.

특히 태양광발전의 형태는 독립된 공간에서의 발전과 소비가 이루어졌지만, 최근 전력거래의 방식이 생산자와 소비자(개인)가 분리된 기존의 단방향거래(전력회사 → 개인)에서 쌍방향으로 전력거래방식이 변화됨에 따라 전력회사뿐만 아니라 개인도 소규모의 발전의 주체가 되고 있다. 이로 인하여 신재생에너지 발전이 독립적인 형태에서 계통 연계로 늘어나고 있다[5].

하지만 태양광발전의 계통연계과정에서 고조파의 발생은 피할 수 없다. 이는 태양광 셀 및 모듈에 의하여 직류가 생산이 되며, 계통 연계 또는 전기 사용을 위한 교류 변환과정에서 고조파가 발생된다. 특히 계통연계의 경우 고조파가 계통에 확대됨에 따라 전력품질 저하, 전력기기의 과열 및 소손과 보호기기의 오작동 문제를 초래한다[6-8].

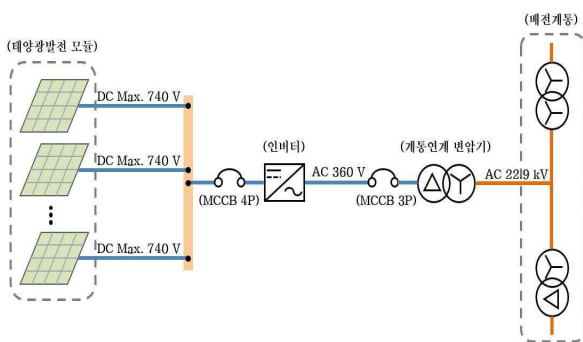


Fig. 1. Diagram of photovoltaic power generation system connected with power distribution system

이와 같은 피해를 최소화하기 위하여 고조파 저감방법 및 태양광발전에서 발생된 고조파가 계통에 미치는

영향 분석을 위한 방법이 요구된다.

본 논문에서는 그림 1에서와 같이 배전계통에 연계된 태양광발전 시스템을 모델링하고 계통연계용 승압 변압기 대신에 하이브리드 변압기를 적용함에 따라 배전계통에 유입되는 전력의 고조파 저감효과를 분석하였다.

## 2. 하이브리드 변압기 구조 및 특성 과 고조파 허용 기준

하이브리드 변압기는 고조파, 불평형 전류, 영상 전류의 감소를 위하여 개발된 변압기로서 2차측 권선을 zig-zag 권선으로 구성한다. 각 상 레그에 2개 상의 권선이 교차하도록 구성된다. 각 상의 권선은 정상과 역상이 교차하고 30°의 위상차가 발생하도록 설계된다. 특히 고조파저감과 변압이 함께 이루어지도록 개발된 변압기로 고조파 저감을 위한 추가기기가 필요없다. 이로 인하여 공간활용 및 경제성에서 장점을 나타낸다[9].

하이브리드 변압기는  $\Delta$ -Yz 결선으로  $\Delta$ 결선에 의해서 영상분 고조파인 3고조파는 제거된다. 그리고 2차측 zig-zag 권선에 의하여 30°의 위상차를 나타내게 된다. 그러므로 역상분 고조파의 고조파 변위가 150°이며 하이브리드 변압기에 의해 30°의 위상이 합하여져 180°의 위상변위 값을 가지며, 정상분 고조파는 고조파 변위 210°이며, 반대방향으로 30°가 되어 그 차가 180°를 나타낸다. 그러므로 역상분 고조파 제5고조파와 정상분 고조파 제7고조파가 상쇄된다. 이로 제3고조파, 제5고조파, 제7고조파가 상쇄하게 된다[10]. 한국전력공사에서는 양질의 전력품질 유지를 위하여 종합 전압 왜형율을 다음과 같이 규정하고 있다. 154kV 이상에서는 1.5%, 66kV 이하일 경우는 3%로 정하고 있다[11].

국제 규격 IEEE Std. 519에 의하면 계통전압 161kV 이상에서의 개별 고조파 왜형률 1%, 종합 고조파 왜형률 1.5%, 69kV에서 161kV까지는 개별 고조파 왜형률 1.5%, 종합 고조파 왜형률 2.5%, 69kV 이하에서는 개별 고조파 왜형률 3%, 종합 고조파 왜형률은 5%를 규정하고 있다[12].

### 3. 계통연계형 태양광발전 시스템

전력거래형태의 다양화에 따라 과거 전력회사에 의해서만 공급되던 형태에서 현재는 전력회사의 거래뿐만 아니라 개인과 전력회사, 개인과 개인 등 다변화가 이루어지고 있다. 이와 같은 추세에 따라 개인이 설치 및 운영이 가능한 다양한 친환경발전이 전력계통에 연결되어지고 있다.

태양광발전은 발전전압이 낮아 계통에 연결하기 위하여 승압하기 위한 변압기가 필요하게 된다. 그리고 태양광발전을 비롯한 친환경 발전형태가 직류를 발전하므로 계통에 연계하기 위하여 인버터를 사용하여 교류로 변환하게 된다. 이 과정을 거치면서 고조파가 발생하게 되며, 고조파가 계통을 통하여 확산하게 된다.

현재는 계통연계 과정에서 고조파가 일정 수준이상일 경우 계통에서 분리시키는 형태로 설계되어 있다. 이와 같은 방식은 발전의 효율저하뿐만 아니라 계통의 전력품질을 떨어뜨리는 영향을 끼치게 된다. 이런 문제점을 개선을 위하여 고조파 제거를 위한 개선이 필요하다.

### 4. 하이브리드 변압기 적용에 따른 고조파 저감 분석을 위한 계통연계형 태양광발전 시스템 PSIM 모델링

#### 4.1 계통연계를 위한 하이브리드 변압기 모델링

하이브리드 변압기는  $\Delta$ -Yz로서 2차측을 zig-zag 권선으로 구성되어 있다. 이 권선을 구성하기 위하여 PSIM 라이브러리의 1상 3권선 변압기를 이용하여 단상을 구성하였으며, 변압기 3대를 이용하여 3상을 구성하였다. 그림 2에서 보는 것과 같이 2차측의 2권선을 상간의 교차를 이용하여 zig-zag 구성으로 하이브리드 변압기를 모델링하였다[13].

zig-zag 권선에 대한 위상각을 나타내는 것은 그림 2에 나타내는 것과 같다. 위상각은  $30^\circ$ 의 위상차를 나

타내도록 권선의 방향 및 권서 수를 결정하였으며, 변압기 모델링에 대한 사양은 표 1에서 보는 것과 같다.

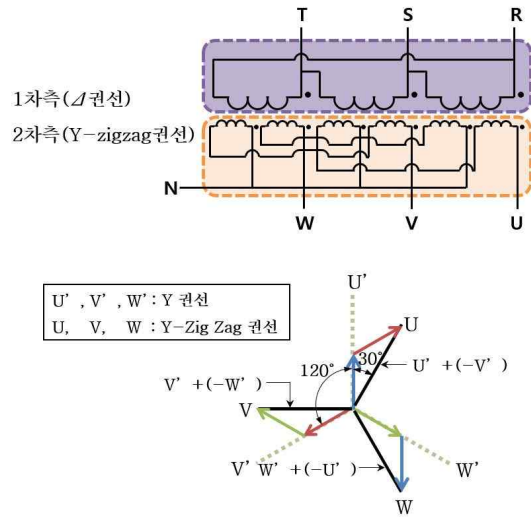


Fig. 2. Winding structure of hybrid transformer modelling and phase vector diagram of voltage

Table 1. Specification of hybrid transformer modelling for grid-connection

| 구분       | 단위 | 값             | 비고 |
|----------|----|---------------|----|
| 변압비      | V  | 370 / 22,900  |    |
| 입력 주파수   | Hz | 60            |    |
| 변압기 권선구조 | -  | $\Delta - Yz$ |    |

#### 4.2 하이브리드 변압기 고조파 저감 분석을 위한 계통연계 태양광발전 시스템 모델링

PSIM은 Powersim사의 제품으로 전자회로설계 및 해석에 가장 널리 사용되는 툴로서 사용되고 있으며, 다양한 전력전자소자의 라이브러리가 제공되므로 현재에는 전력전자설계, 모터드라이브, 전력변환에 대한 시뮬레이션의 편리성을 제공하고 있다. 그러므로 전력전자기가 포함된 계통해석에 사용이 확대되고 있는 추세이다.

계통연계 태양광발전 시스템에서 계통연계 승압

용 변압기 대신에 하이브리드 변압기 적용에 따른 고조파 저감을 분석하기 위하여 모델링을 실시하였으며, 크게 세부분으로 나눌 수 있다. 세부분은 태양광발전 시스템, 계통연계 승압용 변압기 그리고 배전계통이다.

첫 번째로 태양광발전 시스템은 태양광 모듈에 의하여 일반적으로 최대 직류 742V를 생산한다. 그리고 인버터를 통하여 전력기에 입력되는 전압은 교류 360V이나 모델링에서는 3상 인버터를 통하여 교류 370V, 60Hz가 되도록 모델링을 실시하였다. 인버터는 스위치 6개를 이용하여 위상각이 120°가 되도록 스위치 동작을 제어하였다.

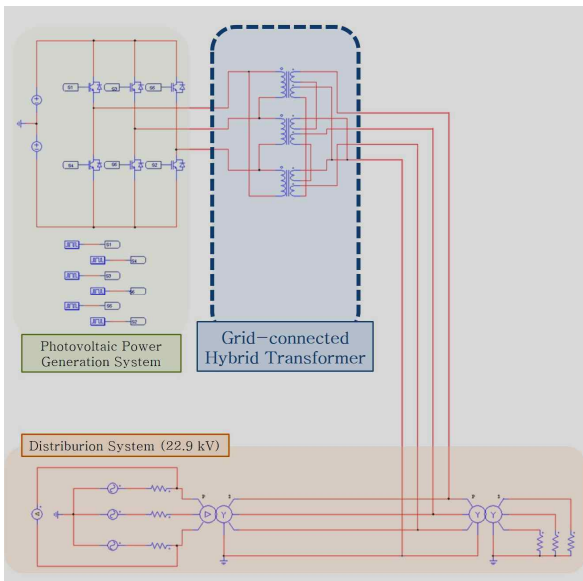


Fig. 3. PSIM modelling of grid-connected photovoltaic power generation system

두 번째로 계통연계 승압용 변압기는 위에서 모델링한 하이브리드 변압기로서 계통연계를 위하여 370V / 22,900V의 승압 변압기이다. 단상 3권선 변압기세대를 이용하여 3상을 구성하였다. 권선비는 1차 0.01615이며, 2차 1권선 0.57735, 2권선 0.57735로 모델링하였다.

세 번째로 배전계통은 계통전압 22.9kV로 모델링하였다. 송전전압 154kV에서  $\Delta - Y$  강압용 변압기를

이용하여 3상 4선식 22.9kV 계통을 구성하였다.

계통연계 태양광발전 시스템 해석을 위하여 위에서 실시한 세가지 모델링을 그림 3에서 보는 것과 같이 구성하여 하이브리드 변압기에 의하여 계통연계 태양광발전 시스템의 고조파 저감을 분석하였다. 위 모델링에 대한 모델링 설계 사양은 표 2에 정리하였다.

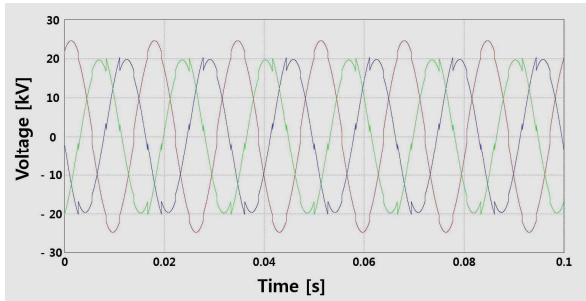
Table 2. Specification of Modelling for grid-connected photovoltaic power generation system

| 구분            |                     | 단위   | 값          | 비고      |  |
|---------------|---------------------|------|------------|---------|--|
| 태양광 발전 시스템    | 발전 전압               | V    | Max. 742   | DC      |  |
|               | 출력 전압               | V    | 370        |         |  |
|               | 출력 주파수              | Hz   | 60         |         |  |
| 계통연계 승압용 변압기  | 하이브리드 변압기 변압비       | V    | 370/22,900 |         |  |
|               | 하이브리드 변압기 권선비       | 1차   | turns      | 0.01615 |  |
|               |                     | 2차-1 | turns      | 0.57735 |  |
|               |                     | 2차-2 | turns      | 0.57735 |  |
| 배전계통 (22.9kV) | 변압기( $\Delta - Y$ ) | kV   | 154/22.9   |         |  |
|               | 변압기( $Y - Y$ )      | kV   | 22.9/22.9  |         |  |
|               | 계통 전압               | kV   | 22.9       |         |  |
|               | 계통 주파수              | Hz   | 60         |         |  |

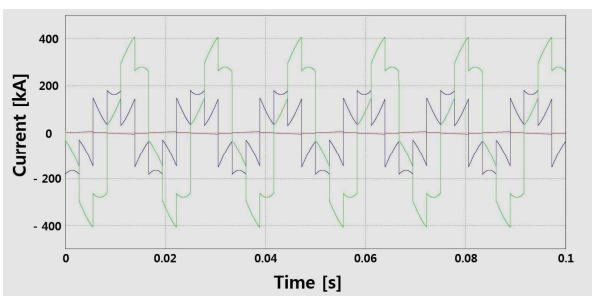
### 4.3 결과

계통연계를 위한 일반 승압용 변압기( $\Delta - Y$ )와 하이브리드 변압기( $\Delta - Yz$ ) 비교를 통하여 고조파의 저감을 분석하였다. 일반 변압기에 대한 전압과 전류의 출력파형은 그림 4에 나타냈으며, 하이브리드 변압기에 대한 전압과 전류의 출력파형 또한 그림 5에 나타내었다.

전압 출력파형은 선간전압을 측정하여 나타내었다. 그리고 하이브리드 변압기에 대한 고조파의 크기 비교는 3상의 각 고조파의 크기를 평균값으로 비교하였다.

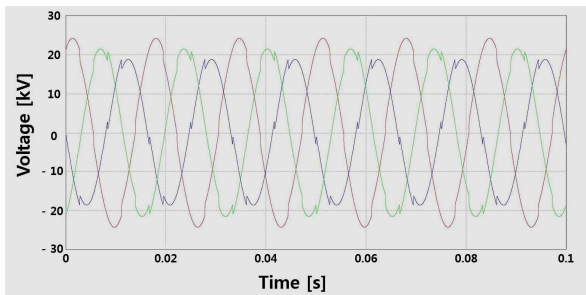


(a) 전압 파형

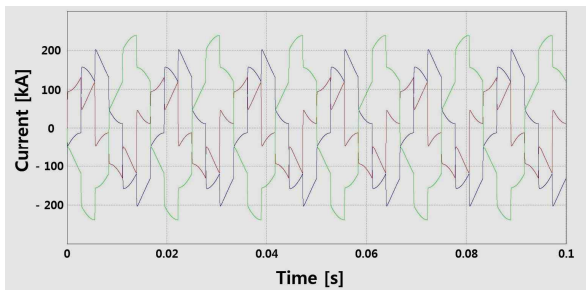


(b) 전류 파형

Fig. 4. Output waveform of normal transformer



(a) 전압 파형



(b) 전류 파형

Fig. 5. Output waveform of hybrid transformer

고조파에 대한 비교는 그림 6과 표 3에서 확인할 수 있으며, 전압의 평균고조파의 비교는 표 3 (a)에서와 같이 일반변압기에 비하여 하이브리드 변압기에서 2% 이상 감소함을 확인하였으며, 고조파 전류는 표 3 (b)에서와 같이 15%이상 감소함을 확인할 수 있었다. 이로서 하이브리드 변압기를 추가함에 따라 고조파가 저감됨을 확인할 수 있다.

Table 3. Comparison of normal transformer harmonics and hybrid transformer harmonics

※ 감쇄율 :  $(1 - \frac{B}{A}) \times 100$

(A : 일반-TR 고조파 크기, B : H-TR 고조파 크기)

(a) 고조파 전압 평균값 비교

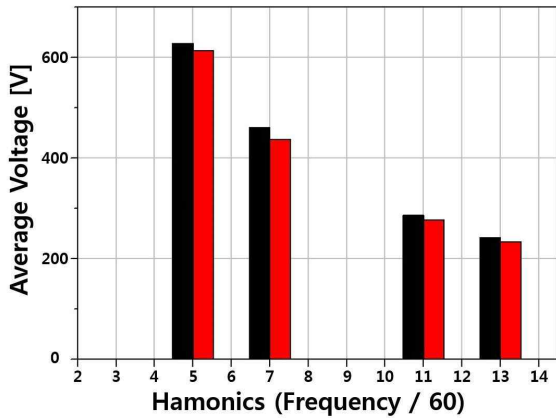
| 고조파 | 일반-TR (A) | H-TR (B) | 감쇄율(%) | 비교 |
|-----|-----------|----------|--------|----|
| 5   | 628       | 614      | 2      |    |
| 7   | 461       | 437      | 5      |    |
| 11  | 286       | 277      | 3      |    |
| 13  | 242       | 233      | 4      |    |
| ... |           |          |        |    |

(b) 고조파 전류 평균값 비교

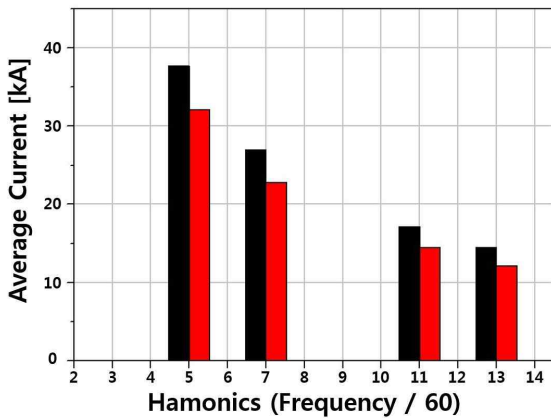
| 고조파 | 일반-TR (A) | H-TR (B) | 감쇄율(%) | 비교 |
|-----|-----------|----------|--------|----|
| 5   | 37699     | 32111    | 15     |    |
| 7   | 26930     | 22832    | 15     |    |
| 11  | 17135     | 14483    | 15     |    |
| 13  | 14502     | 12145    | 16     |    |
| ... |           |          |        |    |

그리고 고조파에 의한 왜형률은 표 4에서 보는 것과 같이 일반변압기에서는 전체 왜형률 4.0이며, 하이브리드 변압기에서는 전체 왜형률이 3.8으로 0.2 감소함을 확인하였으며, 각 고조파별 왜형률의 비교는 표 4에서 보는 것과 같이 일반변압기에 비하여 하이브리드 변압기에서 전체적인 감소를 확인할 수 있었다.

본 모델링 분석을 통하여 하이브리드 변압기를 도입함에 따라 고조파의 크기와 전압 왜형률이 개선됨을 확인할 수 있다.



(a) 전압 푸리에변환 그래프



(b) 전류 푸리에변환 그래프

Fig. 6. Comparison graph of normal transformer harmonics and hybrid transformer harmonics

### 5. 결 론

국내외적으로 발전시스템들이 점차적으로 친환경 신재생 에너지로 변화하고 있는 추세에, 특히 태양광 발전의 경우 구축에 있어 제약조건이 적어 공공시설 및 대형건물에 설치가 확대되고 있다. 태양광발전을 계통에 연계하기 위한 과정에서 고조파는 필연적으로 발생한다. 이와 같은 태양광발전은 발전에 있어서는 친환경 일수 있지만 발전과정에서 발생하는 고조파는 전력망에 유입, 확산됨에 따라 전력기기의 열화, 소손 및 계측기기의 오동작을 초래하므로 전력망에 있어서

Table 4. Distortion factor of each voltage harmonics

$$\text{※ 왜형률} : \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1}$$

( $V_2, V_3, \dots, V_n$  : 각 차수별 고조파전압)

| 일반 변압기           |     |     |     |     |                    |
|------------------|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| 고조파              | 5   | 7   | 11  | 13  | 비교                 |
| 전압 (V)           | 628 | 461 | 286 | 242 | 종합<br>왜형률<br>(4.0) |
| 각 차수별<br>왜형률 (%) | 2.9 | 2.1 | 1.3 | 1.1 |                    |
| 하이브리드 변압기        |     |     |     |     |                    |
| 고조파              | 5   | 7   | 11  | 13  | 비교                 |
| 전압 (V)           | 830 | 588 | 371 | 309 | 종합<br>왜형률<br>(3.8) |
| 각 차수별<br>왜형률 (%) | 2.8 | 2.0 | 1.2 | 1.0 |                    |

는 최소화할 필요가 있다.

본 논문은 계통연계 태양광발전 시스템에서 하이브리드 변압기를 적용함에 따른 모델링을 통한 고조파 저감 분석을 실시하였다. 모델링을 통하여 하이브리드 변압기에 의하여 계통에 유입되는 고조파가 저감됨을 확인하였다. 감소율은 3상 평균으로 비교 했을 때 전압고조파는 최소 약 2%, 전류고조파는 최소 약 15% 감소를 확인하였다. 그러므로 계통연계 태양광발전 시스템에서 발생하는 고조파를 하이브리드 변압기 적용에 따라 저감됨을 확인하였다.

본 모델링을 통하여 고조파의 저감효과 뿐만 아니라 신재생발전에서 생성된 고조파가 계통에 영향을 주는 범위 또는 계통보호 방법 등에 대한 연구가 가능할 것으로 사료된다.

### References

- [1] Dong-Jin Choi, "Comparison Researches for Installation of the Module Angles and Array Spacing on Photovoltaic Power System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 23, No. 1, 2009.
- [2] Won-Sik Moon, Ara Jo, Jae-Chul Kim, "Economic Evaluation of Power Grid Interconnection between Offshore Wind Power Plants", The Transactions of the

- Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63P, No. 4, 2014.
- [3] Seok-Hyun Kim, Jung-Ha Hwang, Yong-Ho Cho, Young-Hum Cho, "A Study on method for improving renewal energy supply ratio for the school building applied PV system", Journal of the Korean photovoltaic Energy Society, Vol. 33, No. 3, 2013.
  - [4] Yong-Ho Lee, Sang-Hyun Seo, Hyung-Jin Kim, Young-Hum Cho, Jung-Ha Hwang, "Analysis of New & Renewable Energy Application and Energy Consumption in Public Buildings", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 3, 2012.
  - [5] S-Y Kim, "Expansion and prospect for grid-connection of dispersed generator", Journal of Electrical World Monthly Magazine, Vol. 474, 2016.
  - [6] Kyung-Chul Kim, "A Study on the Harmonics Reduction using Phase Shifting Transformer in a Electric Power Distribution System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 16, No. 2, 2002.
  - [7] Yong-Peel Wang, Jong-Won Jeong, Dong-Il Jeong, "A Study on Harmonics Analysis and Modelling for Distribution System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 21, No. 3, 2007.
  - [8] Kyung-Chul Kim, Hyoung-Bumb Choi, "A Study on the Power Factor Correction and Harmonics Reduction of Capacitor Banks Installed at Customers", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 22, No. 8, 2008.
  - [9] Ji-Ho Kim, Sung-Ho Han, Jin-Gun Son, "Performance Test and Design of Harmonic Reduction Hybrid Transformer", The Trnas. of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63P, No. 4, 2014.
  - [10] J-C Lee, "Analysis on causes of harmonics and measure arrangement", Process Control Instrumentation Technology, 2015.
  - [11] Ji-Ho Kim, Hoon-Yang Park, Jin-Geun Shon, "Analysis and Performance Test of Hybrid Transformer used in the Grid-Connected Photovoltaic Generation System", The Trnas. of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63P, No. 4, 2014.
  - [12] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1992.
  - [13] Young-Joo Song, Jin-Taek Oh, Na-Un Kim, Hye-Young Shin, "A Study on the Uninterruptible Power Open Phase Compensation Device", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 28(8), 2014.

## Biography



### Jin-Taek Oh

He received the B.S. degree in electrical engineering from Suncheon University, Jeollanam-do, Korea, in 1992, and the M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2010, where he is currently pursuing the Ph.D degree with the Department of Electrical Engineering. In 2015, he joined the Dream Engineering Ltd., where he is currently a Representative director.



### Jae-Ho Rhee

He received the B.S. degree in electrical engineering from Gachon University, Gyeonggi-do, Korea, in 2006, and the M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2013, where he is currently pursuing the Ph.D degree with the Department of Electrical Engineering.



### Kwang-Cheol Ko

He received the B.S. degree in electrical engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 1982, and the M.S. and Ph.D. degrees from Tokyo Institute of Technology (TITech), Tokyo, Japan, in 1986 and 1989, respectively. From 1990 to 1995, he has been an assistant professor at the department of electrical engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, Korea. In 1995, he joined the faculty in the department of electrical engineering, Hanyang University, where he is currently a Professor. His research interests include pulsed power technologies and their applications.