

하이브리드 변압기 회로 모델링을 적용한 전력계통연계형 태양광발전 시스템의 고조파 영향 분석

(Analysis of Harmonic Effect on Grid-connected Photovoltaic Generation System applying Hybrid Transformer Circuit Modeling)

오진택* · 이재호 · 고광철**

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

Abstract

The hybrid transformer is developed for not only boosting voltage but also removing harmonic in 2009. So far researches for hybrid transformer have been done about study of only operation characteristic or analysis by using simulation of grid mainly. In this paper, we modeled the hybrid transformer and analyze its effect in real power grid. For verifying reduction of harmonic, we modeled the grid-connected photovoltaic generation system, which is typical eco-friendly generator, as a harmonic source. Hybrid transformer, a transformer with Zig-Zag winding, is used in analyzing the phase change between input and output voltage when the winding direction of the transformer is altered. Also, the harmonic content of source is analyzed depending on the existence of hybrid transformer. As a result, it can be seen that the hybrid transformer reduces the harmonic content by 9%.

Key Words : Harmonics, Hybrid Transformer, Zig-Zag Windings

1. 서 론

현대의 전력망은 시스템의 지능화 확대와 전력용 반도체 스위치 발전에 따라 전력변환장치 사용이 증가하는 추세에 있다[1]. 대표적인 전력변환장치인 컨버

터와 인버터는 동작 시 게이트 신호의 빠른 스위칭 주파수로 인해 고조파의 주요 발생원이 되며, 사용되는 비선형 부하와 불평형 부하에 의한 고조파 발생은 과거에서부터 고조파의 주요 원인으로 고려되었다. 이러한 원인들로 인하여 부하에서 발생된 고조파가 전력망으로 유입되어 배전 전압의 왜곡현상과 변압기의 소음발생을 유발하고, 용량변화에 따른 발열현상으로 인해 전력기기의 수명저하 등의 문제점을 발생시킴으로써 계통의 신뢰성 및 유지보수 비용의 증가를 초래한다[2-3].

또한 유엔기후변화협약(UNFCCC : UN Framework

* 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 : 2016. 8. 29.

Accepted : 2016. 12. 6.

Convention on Climate Change)에 의해 이산화탄소를 포함한 온실가스의 배출을 줄이기 위한 방향으로, 국내에서도 기존의 시스템을 친환경적인 신재생에너지 발전시스템으로 변화를 추구하고 있다. 그러나 태양광발전과 풍력발전, 연료전지발전 등의 친환경 발전시스템은 부하 및 전력계통에 연결하기 위하여 인버터를 필수적으로 요구하게 된다. 그러므로 신재생에너지 발전은 친환경이지만 전력계통에 있어서는 고조파 발생의 주요원인이 되고 있다[4]. 특히 태양광발전에서 태양전지 등의 구축비용의 저감으로 인하여 공공건물뿐만 아니라 일반가정에서도 쉽게 설치하여 발전하고 있으므로, 고조파의 발생이 더욱 커질 것으로 예상된다.

신재생발전 중 전력계통연계형 태양광발전의 확산은 친환경 측면에서는 바람직한 방향이나, 고조파에 의한 전력품질의 저하를 피할 수가 없다. 따라서 전력계통연계 모델링을 통하여 사전에 다양한 사고 분석을 통하여 전력계통의 신뢰성 향상 및 부하 변동성에 대처하여 비용 및 시간적 절약이 가능해 질 것으로 예상된다. 이런 측면에서 평가, 분석을 위한 모델링 구축이 필요하게 된다.

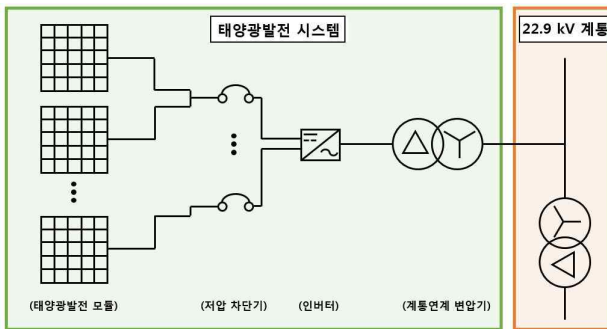


Fig. 1. Schematic of in grid-connected photovoltaic system

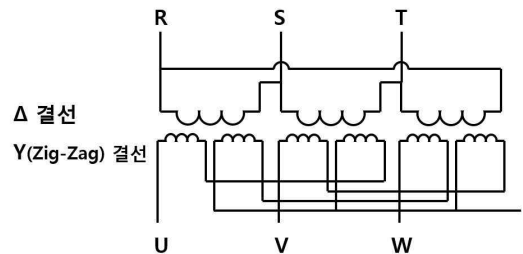
고조파 제거 방법으로서 과거에는 고조파 필터 및 위상 변경을 위한 Zig-Zag 변압기 등을 이용하였으나, 현대에 들어와서는 승압과 위상변경이 가능한 하이브리드 변압기를 이용하여 고조파 제거에 사용하고 있다. 하이브리드 변압기를 사용하므로 기존 대비 공간과 비용이 절감되는 장점을 나타낸다[5].

본 논문에서는 그림 1에서와 같이 전력계통에 연계된 태양광 시스템 모델링과 고조파 저감을 위하여 하이브리드 변압기를 적용하고, 이를 분석하기 위한 변압기 모델링을 다음과 같이 실시하였다. (1) 하이브리드 변압기 모델링을 통하여 실제 하이브리드 변압기의 특성과 비교, (2) 하이브리드 변압기가 포함된 전력계통 연계 태양광 시스템 모델링을 통하여 계통의 고조파 저감효과 및 영향을 분석한다.

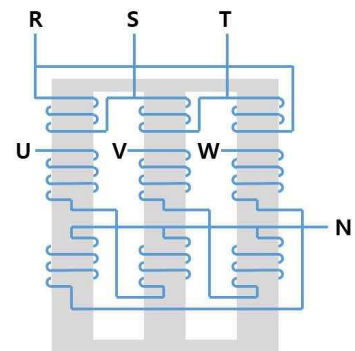
2. Hybrid Transformer 이론

2.1 구조 및 특성

하이브리드 변압기는 기존의 Zig-Zag 권선 변압기에 승압기능을 추가한 형태로 Δ -Y 결선 중 Y의 권선에 Zig-Zag 결선을 추가한 형태이다.



(a) 하이브리드 변압기 개념도



(b) 하이브리드 변압기 구성도

Fig. 2. Structure of hybrid transformer[6]

하이브리드 변압기의 대표적인 구성도는 그림 2에서 보는 것과 같다[6]. 1차측은 Δ 결선으로 구성하며, 2차측은 Y결선으로 변압기의 1차측과 2차측은

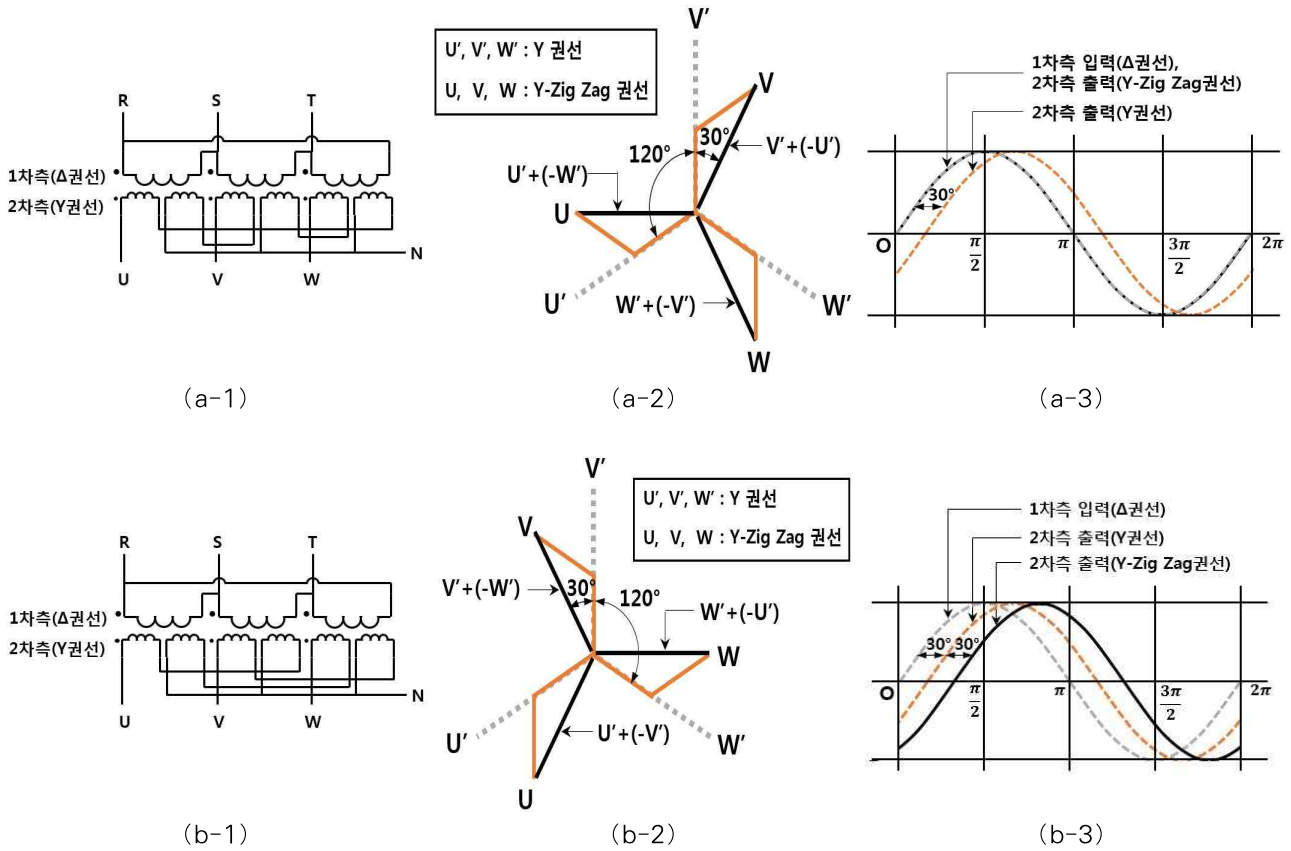


Fig. 3. Schematic and vector diagram and output waveform of Hybrid Transformer according to winding direction

기본적으로 30°의 위상차를 나타낸다. 그리고 그림 3에서 보는 것과 같이 변압기 2차측 Zig-Zag 권선의 방향에 따라서 추가적으로 +30° 또는 -30°의 위상각도의 변화를 나타낸다. 그러므로 Zig-Zag 권선에 의하여 1차측과 2차측의 위상차가 같거나, 60°의 위상차가 된다.

므로 각 상에서 정상과 역상이 교차하게 되며 Zig-Zag 결선에 의하여 30° 위상차를 제어함으로 부하에서 발생하는 고조파 및 불평형 전류를 억제시킨다[6].

2.2 고조파 저감 원리 및 허용 기준

하이브리드 변압기는 Δ-Y결선으로 구성되므로 1차측 Δ결선에 의하여 3고조파가 제거된다. 그리고 2차측 권선은 Y결선으로 Zig-Zag 결선을 한다. Zig-Zag 결선은 각각의 레그에 2개의 권선이 교차한다. 각 상의 자속이 정상과 역상이 되도록 설계하

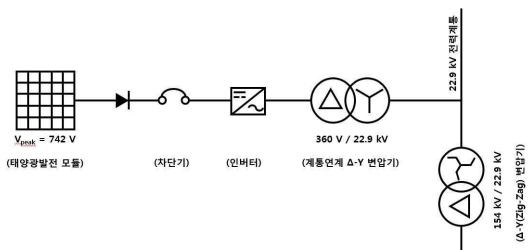
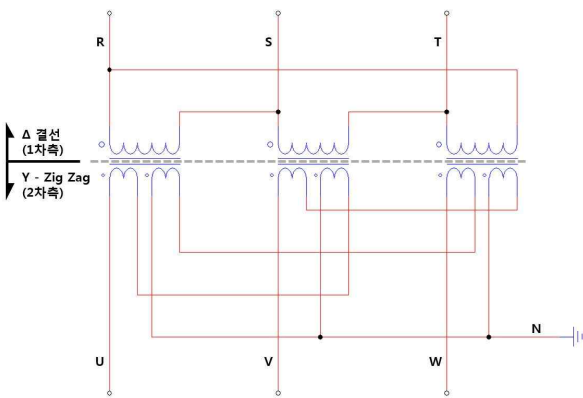


Fig. 4. Single line diagram of grid-connected photovoltaic power generation system applying hybrid transformer model

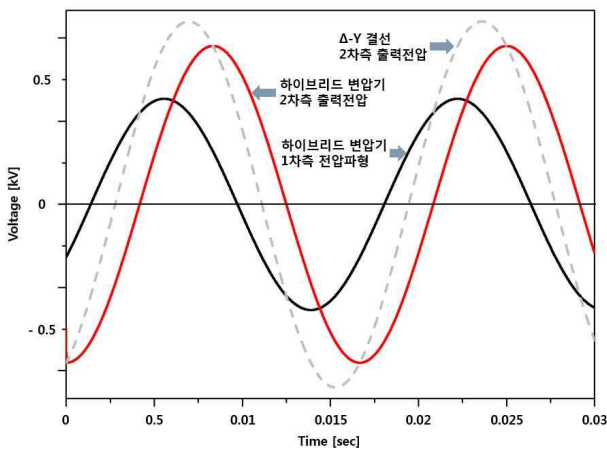
그리고 한국전력공사 전기공급 약관에 의하면 66kV 이하일 경우는 3%의 전압왜형율의 기준을 준수해야 한다[7].

3. 계통연계형 태양광시스템 및 하이브리드 변압기의 회로 모델링

3.1 하이브리드 변압기 모델링



(a) PSIM 모델링



(b) 출력파형

Fig. 5. Output waveform and PSIM modeling of Hybrid Transformer

하이브리드 변압기 모델링은 PSIM을 이용하였으며, PSIM은 회로해석에 널리 사용되는 상용 툴로 다양한 전력전자소자가 라이브러리화되어 있는 장점을 가진다. 현대의 전력계통은 스마트와 자동화로 전력

전자소자를 많이 사용하여 구축된다. 그러므로 PSIM은 현대의 전력계통해석에 장점을 가진 툴이라고 할 수 있다. 하이브리드 변압기는 PSIM 라이브러리가 없으므로 동일한 동작특성을 나타낼 수 있도록 하는 모델링이 필요하다.

본 논문에서는 3상 Δ -Y의 Y권선을 Zig-Zag로 표현하기 위하여 단상 3권선 변압기 3대를 이용하였으며, 단상 3권선 변압기에서 2차, 3차 권선을 이용하여 Zig-Zag 권선을 구성하였다[8]. 구성은 그림 5 (a)에서 보는 것과 같으며, 1차측은 단상변압기 3대를 Δ 결선, 2차측은 2권선을 잇갈리게 결선하여 Zig-Zag 구성을 하였다. 모델링 사양은 표 1에서 같다. 하이브리드 변압기를 통한 출력파형은 그림 5 (b)에서와 같이 입력대비 위상차가 60° 가 된다. Δ -Y변압기는 1차측과 2차측의 위상차가 30° 에서 Zig-Zag 권선에 의하여 위상이동이 발생함을 확인할 수 있다.

Table 1. Hybrid transformer modeling specification

구분		단위	값	비고
입력 전원	단상 입력 전압	V	220	상전압
	입력 주파수	Hz	60	
	삼상 위상차	도	120	
변압기 권선비	1차 권선	-	1	
	2차 권선	-	0.5	
	3차 권선	-	0.5	

3.2 전력계통에 연결된 태양광시스템 모델링

계통연계형 태양광발전시스템의 기본 구성은 그림 6과 같이 태양광모듈에 의하여 발생된 DC를 인버터를 이용하여 교류를 발생한다. 계통과 연계하기 위하여 Δ -Y 승압용 변압기를 설치하여 계통에 연결하게 된다. 태양광 발전의 발전 용량 등에 의하여 계통에 연결하는 부분이 다를 수 있으며, 본 논문의 모델링은 22.9kV의 계통에 연결되는 태양광 발전시스템을 모델링하였다. 계통에서의 하이브리드변압기를 적용한 부분은 계통의 154kV에서 22.9kV로 강압시키는 변압기에 모델링을 적용하였다. 하이브리드변압기의 모델링 사양은 표 2에 나타내었다.

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

구분	단위	값	비고	
태양광 발전 시스템	계통연계용 승압 변압기 변압비	V	370 / 22,900	
	계통연계용 승압 변압기 권선비	turns	1 / 36.73	
	출력 전압	V	370	
	출력 주파수	Hz	60	
3상 인버터	입력전압	V	414	
	출력전압	V	360	선간전압
	스위칭 주파수	Hz	60	
하이브리드 변압기	하이브리드 변압기 변압비	kV	22.9 / 154	
	하이브리드 변압기 권선비	turns	0.5 / 0.5 / 11.65	
	입력 전압	kV	150	선간전압
	입력 주파수	Hz	60	
	위상차	°	120	

고조파 발생원으로서 태양광 발전에 대한 모델은 실제 설계된 시스템을 기반으로 태양광 발전 최대 발생 전압 742V로 인버터를 통하여 교류 선간전압 약 370V가 되도록 설계를 하였으며, 고조파성분이 포함된 태양광발전의 출력파형은 그림 7에서 보는 것과 같다.

3.3 결 과

본 논문에서는 하이브리드변압기 회로 모델링과 하이브리드변압기를 적용한 계통연계형 태양광시스템의 고조파 영향 분석을 수행하였다. 하이브리드변압기 회로 모델링은 그림 5 (a)의 모델링에 표 1의 사양을 사용하여 그림 8에서 보는 것과 같은 결과를 도출하였다. 일반적으로 Δ -Y의 변압기 구조에서는 입력대비 출력파형이 위상차는 30° 를 나타낸다.

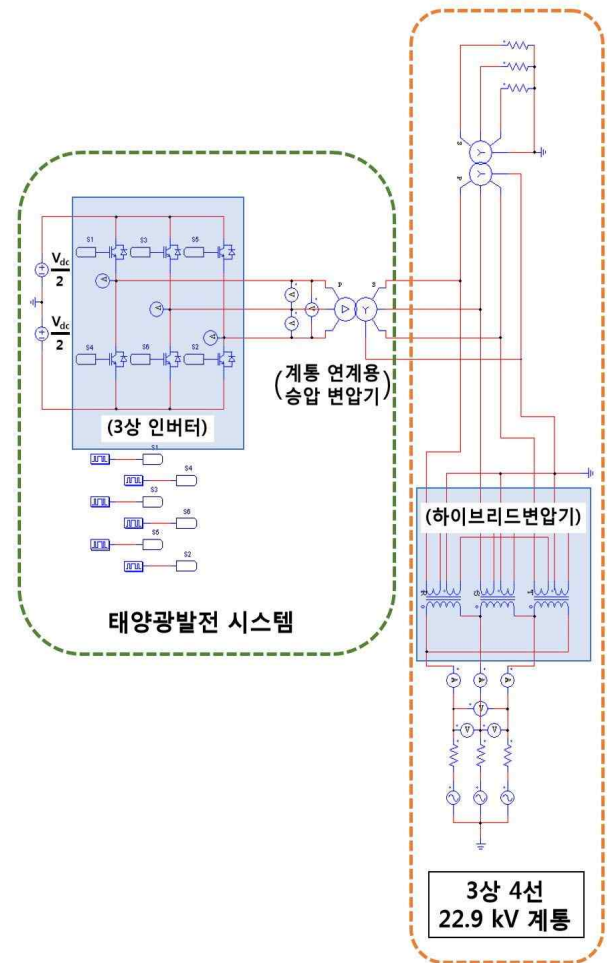


Fig. 6. Circuit diagram of grid-connected photovoltaic power generation system applying hybrid transformer model

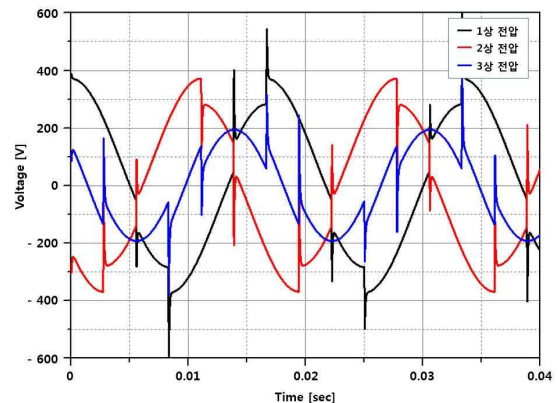


Fig. 7. Output waveform of photovoltaic power generation system including harmonics

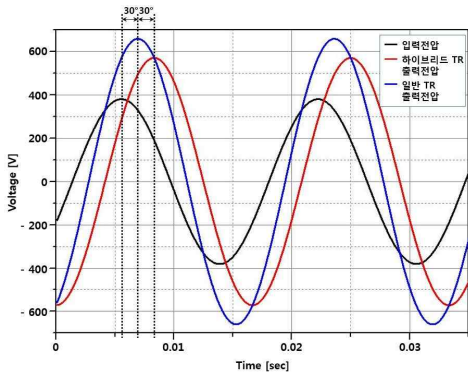


Fig. 8. Input and output voltage waveform of hybrid transformer model

Table 3. Harmonics values of normal transformer and hybrid transformer

(a) 전압 평균값

고조파	일반-TR	H-TR	감쇠율(%)	비고
5	8343.77	7640.92	9	
7	5913.03	5396.93	9	
11	3730.42	3413.92	9	
13	3108.21	2825.91	10	
...				

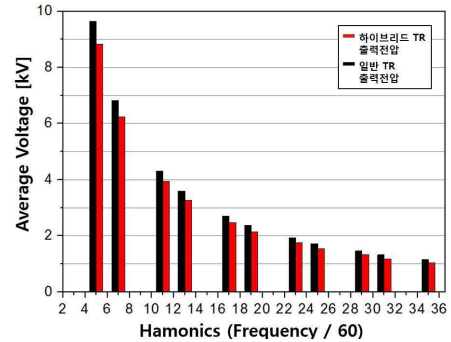
(b) 전류 평균값

고조파	일반-TR	H-TR	감쇠율(%)	비고
5	9635.07	8823.07	9	
7	6827.94	6231.78	9	
11	4307.76	3942.14	9	
13	3589.12	3263.02	10	
...				

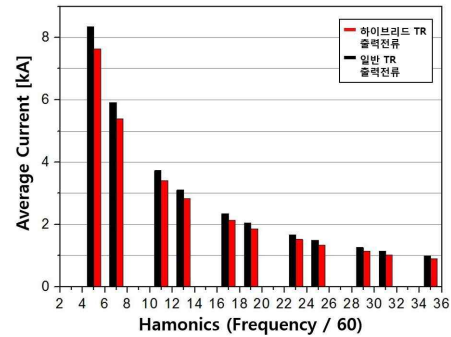
그림 8에서 보는 것과 같이 하이브리드 변압기의 출력파형이 일반변압기에 비하여 30°의 위상차를 확인할 수 있다. 이는 하이브리드변압기에 적용된 Zig-Zag 권선의 특성으로 하이브리드변압기의 특성이 반영된 모델링이라고 판단할 수 있다.

위의 하이브리드변압기모델링을 계통연계형 태양광발전시스템에 적용하므로 계통에 인입되는 고조파의 영향을 분석하였다. 영향분석을 위하여 그림 6의 회로도를 사용하였으며, 회로도의 세부 모델링 사양은 표 2와 같다. 그림 6 회로도에서 하이브리드변압기와 일

반변압기 일 때의 3상 전압과 전류의 푸리에변환 평균값을 표 3에 나타냈으며, 두 가지 경우에서 고조파의 크기를 비교하였다.



(a) 전압 푸리에변환 그래프



(b) 전류 푸리에변환 그래프

Fig. 9. Comparison graph of normal transformer harmonics and hybrid transformer harmonics

비교 결과 일반변압기보다는 하이브리드변압기에서 약 9%의고조파 감소를 모델링에서 나타냈다. 그림 9는 표 3의 값을 그래프로 나타낸 것으로 전체적으로 하이브리드변압기에 고조파가 작은 것을 확인할 수 있다. 그리고 △결선에 의해서 3고조파가 제거되는 것을 모델링을 통하여 확인할 수 있다.

4. 결론

국내외에서 발전시스템들이 친환경적인 신재생 에너지로 변화하고 있는 추세이며, 특히 태양광 발전의 경우 구축비용 저감이 가능하여 공공시설 및 일반 가

정에서 널리 사용될 것으로 기대된다. 하지만 계통에 연계된 태양광발전은 계통에 대해 고조파 발생원으로 작용하므로, 전력품질과 안정성을 확보하기 위한 대책이 요구된다. 현재 고조파 저감의 대책으로 하이브리드변압기가 도입되었으나, 이에 대한 모델링 및 계통 해석에 대한 연구가 미비한 실정이다.

본 논문에서는 하이브리드변압기의 고조파 저감원리를 바탕으로 PSIM을 이용하여 하이브리드변압기가 포함된 계통연계형 태양광발전시스템의 회로모델링을 실시하였다. 태양광발전시스템이 발생하는 고조파가 일반변압기를 구성하였을 보다 하이브리드변압기를 적용에 따라 감소됨을 확인할 수 있다.

본 모델링을 이용할 경우 계통연계형 태양광 발전시스템의 추가 등에 따른 고조파 문제를 사전에 하이브리드변압기에 의하여 감소를 확인할 수 있으며, 얼마나 많은 감소를 나타낼 수 있는지 분석이 가능하므로 안전 및 경제적인 측면에서 도움이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] Su-Eog Cho, "A Study on the Power Loss Simulation of Inverter and Converter for Elevator", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 28, No. 12, 2014.
- [2] Yong-Peel Wang, Jong-Won Jeong, Dong-Hi 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.
- [3] Kyung-Chul Kim, Hyung-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.
- [4] Hyung-Bumb Choi, Kyung-Chul Kim, Young-Rok Hwang "A Study on the Power Quality of the Grid connected Photovoltaic Power System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 25, No. 8, 2011.
- [5] Bhim Singh, P. Jayaprakash, T. R. Somayajulu and D. P. Kothari, "Reduced Rating VSC With a Zig-Zag Transformer for Current Compensation in a Three-Phase Four-Wire Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 24, No. 1, 2009
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] Young-Joo Song, Jin-Tack 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 Sunchon 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.