

SPWM 구동 방식을 이용한 단상 풀 브리지 인버터의 전압 제어에 대한 연구

고윤석*

A Study on the Voltage Control of a Single Phase Full-bridge Inverter using SPWM Driving Method

Yun-Seok Ko*

요 약

본 연구에서는 SPWM 구동방식의 단상 풀 브리지 인버터의 전압제어계를 설계하였다. 전압제어계는 단상 풀-브리지 인버터, 출력전압과 기준전압의 오차를 선형적으로 보상하기 위한 PI 제어기, 제어기 신호로부터 SPWM 방식을 이용하여 게이트 신호를 발생시키기 위한 PWM 구동회로, 인버터 출력 전압 파형을 정현 파형으로 필터링하기 위한 LC 필터로 구성하였다. 끝으로, EMTP-RV를 이용하여 PWM 구동방식을 기반으로 하는 단상 풀-브리지 인버터의 전압 제어계를 모델링하였고 수개의 기준전압에 대한 시뮬레이션 연구를 통해 출력전압이 정확하게 기준전압을 수렴하는 것을 확인함으로써 제어계 설계의 유효성을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

In this study, the voltage control system of a single phase full bridge inverter was designed based on the SPWM driving method. The voltage control system consists of a single-phase full-bridge inverter, a PI controller for linearly compensating the error between the reference voltage and the output voltage, a PWM driving circuit for generating the gate signal using the SPWM method from the controller signal, and an LC filter for filtering the inverter output voltage waveform into sinusoidal waveform. Finally, the voltage control system of a single-phase full-bridge inverter based on the PWM driving method was modeled using EMTP-RV and by showing that the output voltage accurately converges the reference voltage through several simulation examples, the validity of the control system design was verified.

키워드

Single Phase Inverter, Full Bridge Inverter, PWM Control, Voltage Control
단상 인버터, 풀 브리지 인버터, PWM 제어, 전압 제어

1. 서 론

최근, 전력제어, 철도제어, 전기자동차 제어, 로봇제어 그리고 반도체 장비 등 전 산업분야에서 시스템제어기술이 핵심기술로서 인식되고 있다. 시스템 제어는

기본적으로 시스템, 제어기 그리고 구동회로로 구성된다. 특히 구동회로는 최근 급속한 발전을 이룬 전력전자 기술을 이용하여 디지털 전력변환이 가능해 짐으로서 제어기를 추종하는 실시간 디지털 전력제어를 통해 시스템 제어의 고도화를 가능하게 하고 있다.

* 교신저자 : 남서울대학교 전자공학과
• 접 수 일 : 2017. 09. 28
• 수정완료일 : 2017. 10. 06
• 게재확정일 : 2017. 10. 18

• Received : Sep 28, 2017, Revised : Oct 06, 2017, Accepted : Oct 18, 2017
• Corresponding Author : Yun-Seok Ko
Dept. Electronic Engineering, Namseoul University,
Email : ysko@nsu.ac.kr

특히 직류를 교류로 변환하는 DC/AC 변환기, 즉 전력용 인버터는 출력전압의 크기와 주파수를 변조할 수 있기 때문에 시스템 액츄에이터로 활용되고 있는 유도전동기 및 동기전동기의 속도 및 토크 제어를 위한 핵심 요소로 활용되고 있다. 지금까지 인버터 제어 설계에 관한 다수의 논문들이 제시되었는데, 참고문헌 [1-5]에서는 태양광이나 연료전지 적용을 위한 단상 풀-브리지 인버터의 모델링 및 PWM(Pulse Width Modulation) 제어 방법들을 제시하며, 참고문헌 [6-9]에서는 단상 풀 브리지 인버터의 효과적인 LC 필터 설계방법들을 제시한다. 또한 참고문헌 [10]에서는 고주파 분리회로를 가지는 AC-DC Buck 컨버터 설계 방법론을 제안한다. 최근에는 태양광 또는 풍력 기반의 분산전원에 대한 전력계통 연계 기술 측면에서 그 중요성이 더욱 증대되고 있어[10-16]. 다양한 재생 에너지원의 계통 연계 적용을 위한 단상 인버터의 출력전압 제어방법론들이 큰 관심을 받고 있다.

따라서 본 연구에서는 단상 풀 브리지 저압제어 기법들을 분석하고 SPWM 방식의 단상 풀 브리지 인버터의 전압제어계를 설계한다. 전압제어계는 단상 풀-브리지 인버터, 출력전압과 기준전압의 오차를 선형적으로 보상하기 위한 PI 제어기, 제어기 신호로부터 게이트 신호를 발생시키기 위한 SPWM 구동회로, 인버터 출력 전압 파형을 정현 파형으로 필터링하기 위한 LC 필터로 구성된다. 최종적으로 EMTP-RV를 이용하여 SPWM 구동방식을 기반으로 하는 단상 풀-브리지 인버터의 전압 제어계를 모델링하였고 수개의 기준전압에 대한 시뮬레이션 연구를 통해 출력전압이 정확하게 기준전압을 수렴하는 것을 확인함으로써 제어계 설계의 유효성을 확인한다.

II. 단상 풀 브리지 인버터 구조

단상 풀 브리지 인버터는 기본적으로 DC 전원 E , 커패시터 C , DC를 주어진 전압 주기와 주파수를 가지는 AC로 변환하기 위한 4개의 스위칭 디바이스들 S_1, S_2, S_3, S_4 와 부하로 구성된다. 그림 1은 대표적인 단상 풀 브리지 인버터의 구조를 보인다. 단상 풀 브리지 인버터의 전압제어는 4개의 스위칭 디바이스들의 게이트들 g_1, g_2, g_3, g_4 에 인가되는 입력신호들을 통해 스위칭 디바이

스의 온/오프 동작을 제어함으로써 이루어지는데 수개의 대표적인 전압제어 기법들이 존재한다.

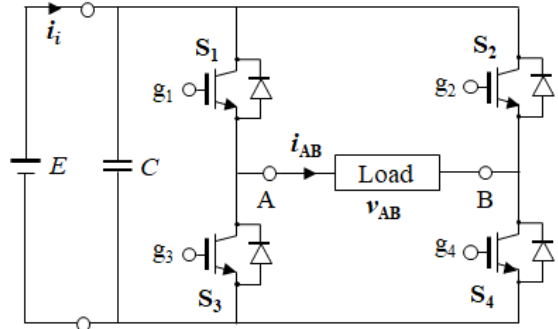


그림 1. 단상 풀 브리지 인버터의 구조

Fig. 1 Topology of a single phase full-bridge inverter

III. 전압제어 기법 분석

단상 인버터의 전압 제어를 위한 대표적인 방법으로는 펄스 폭 변조를 기반으로 하는 단 펄스폭 변조 기법 (Single Pulse Width Modulation), 다중 펄스폭 변조 기법(Multiple Pulse Width Modulation) 정현파 변조 기법 (Sinusoidal Pulse Width Modulation), 수정 정현파 변조 기법(Modified Sinusoidal Pulse Width Modulation)과 위상 변위 제어를 기반으로 하는 위상 변위 제어(Phase Displacement Control) 방법 등이 있다[17-18]. 본 장에서는 이들 방법들 중 전압제어를 위해 주로 사용되는 펄스 폭 변조 기반의 3가지 인버터 전압제어 방법들에 대해서 설명된다. 인버터의 전압제어 기법은 스위칭 손실, 최대 가능 출력 전압의 크기, 전압 및 전류제어의 선형성 그리고 전압 및 전류의 고조파 등을 고려하여 선택해야 한다.

3.1 단 펄스폭 변조 기법

단 펄스폭 변조 기법에서는 구형과 기준신호를 변조과파 비교함으로써 게이트 신호를 발생시키는데, 기준신호의 크기를 변화시키면 게이트 신호의 펄스폭이 증감함으로써 인버터 출력 전압의 크기가 제어될 수 있다. 이때 출력전압은 반주기마다 게이트 신호의 펄스폭에 따라 변화하는 하나의 펄스 파형을 가지기 때문에 단 펄스폭 변조기법이라 불린다.

3.2 다중 펄스폭 변조 기법

다중 펄스폭 변조 기법은 단 펄스폭 변조기법과는 달리, 구형파 기준신호를 반주기 내에 존재하는 다중 개의 변조파형들과 비교함으로써 다중 개의 게이트 펄스 신호들을 발생시킨다. 그림 2는 단상 인버터의 전압제어를 위한 다중 펄스폭 변조기법을 보인다[19].

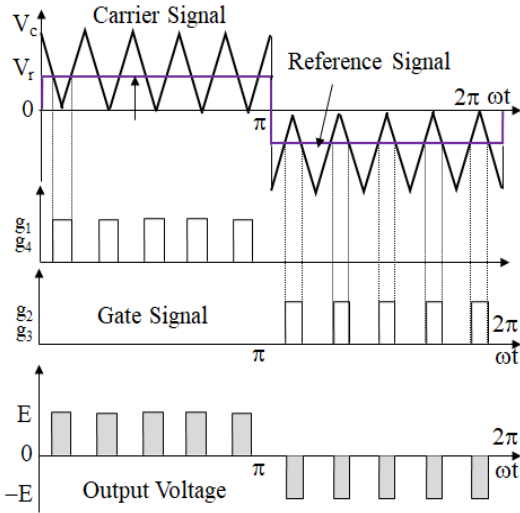


그림 2. 다중 펄스폭 변조 기법
Fig. 2 Multiple pulse width modulation method

인버터 출력전압은 이들 게이트 신호들에 의해서 반주기마다 다중개의 펄스를 가지게 되기 때문에 다중 펄스폭 변조기법으로 정의된다. 이들 펄스 파형들은 기준신호의 크기에 비례하여 펄스폭을 증감함으로써 크기를 제어한다. 이 변조기법의 장점은 다중개의 전압 펄스 파형을 가지므로 단 펄스폭 변조방식에 비해 출력전압의 고조파 량을 감소시켜 보다 개선된 전력품질을 얻을 수 있다. 출력전압의 주파수와 크기는 기준 신호의 주파수와 크기에 따라 변조되며, 매 주기 내의 펄스 수는 변조파의 주파수에 따라 결정된다.

3.3 정현파 펄스 폭 변조 기법

정현파 펄스 폭 변조기법은 모든 펄스가 동일한 폭을 가지는 다중 펄스폭 변조법과는 달리, 각 펄스가 정현파의 크기에 비례하는 펄스폭을 가짐으로서 신호 왜곡 및 고조파를 크게 감소시킬 수 있다. 이 기법에

서 게이트 신호들은 정현파 기준신호를 삼각 반송파와 비교함으로써 발생시키게 되는데 특히, 단상 풀 브리지 인버터의 경우 정현파 기준신호와 반전 정현파 기준신호를 삼각 반송파와 비교함으로써 교류 출력을 얻게 된다. 그림 3은 단상 풀 브리지 인버터를 위한 SPWM 방식을 설명하는데, 출력전압이 정현파 기준신호에 비례하는 펄스폭을 가짐을 확인할 수 있다. 그림 3은 정현파 펄스폭 변조기법을 보인다[20].

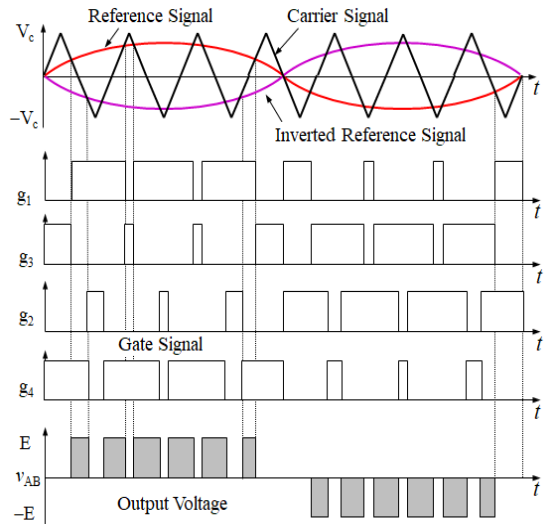


그림 3. 정현파 펄스폭 변조 기법
Fig. 3 Sinusoidal pulse width modulation method

IV. 전압 제어계 설계

본 장에서는 고조파를 최소화하여 DC 전원으로부터 고 품질의 정현파 AC 전원을 얻을 수 있도록 앞에서 기술된 전압제어 기법들 중 SPWM 기법을 이용하여 전압 제어계를 설계한다. 그림 4는 단상 풀 브리지 인버터의 전압제어계 시스템의 구성을 보인다. 전압 제어계는 DC 전원, 풀 브리지 인버터, SPWM 변조기, PI 제어기 그리고 전기부하로 구성된다. 전압 제어계는 SPWM 기법을 이용하여 게이트 신호를 변조하여 DC 전원으로부터 크기와 주파수가 변조되는 AC 전원을 얻는다. 이때, 발생하는 출력 전압은 펄스

과형이기 때문에 LC 필터를 통해 전형 과형으로 필터링되어 부하에 공급된다. 이때 필터링된 출력전압의 크기 v_{AB} 는 기준전압의 크기 v_{AB}^* 와 비교되며, 그 에러신호 e 는 PI 제어기에 공급된다. PI 제어기는 에러신호를 선형적으로 보정하여 SPWM 게이트 신호를 발생시킨다. 이러한 과정은 에러신호 e 가 0가 되도록 연속적으로 이루어진다.

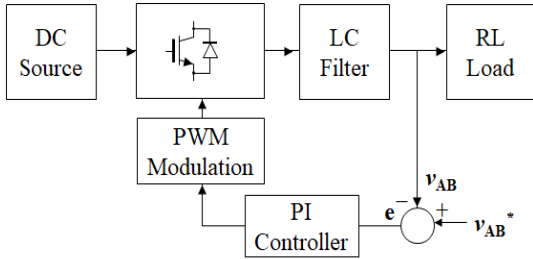


그림 4. 단상 풀 브리지 인버터의 SPWM 제어계
Fig. 4 The SPWM control system of a Single phase full-bridge inverter

본 장에서는 참고문헌 [16]에서 스마트 그리드의 전기적 특성을 다운 스케일된 보다 안전한 전기적 레벨에서 실험할 수 있도록 제안되는 마이크로 스마트 그리드 시뮬레이터의 적용을 고려하여 단상 풀 브리지 인버터의 제어계를 표 1에 보인바와 같이 설계하였다.

표 1. SPWM 제어계 설계
Table 1. The SPWM control system design

Elements	Modeling constant	
	Parameters	Values
DC Source	Voltage	20V
LC Filter	R/L/C	0.5Ω/3mH/10mF
Load	RL	Variable
PI Controller	K_p/K_i	2/400
SPWM	Switching Frequency	1200Hz

V. EMTP-RV 기반 시뮬레이션 검증

본 장에서는 설계결과와 유효성을 확인하기 위해서 전력계통 과도특성 해석도구인 EMTP-RV[21]를 이용하여 표 1의 설계 데이터를 기반으로 하는 단상 풀 브리지 인버터의 제어계를 모델링하며 기준전압 v_{AB}^* 를 3Vrms로 하여 제어결과를 모의한다. 특히, 시간에 따라 동적으로 변화하는 RL 가변 부하를 설계하여 SPWM 제어계의 동적으로 변화하는 부하전압에 대한 추적능력을 확인한다. 그림 5는 EMTP-RV를 이용하여 모델링된 SPWM 제어 방식의 단상 풀 브리지 인버터의 제어계를 보인다.

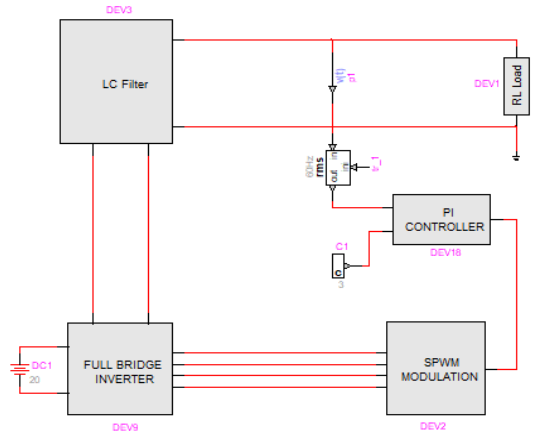


그림 5. EMTP-RV 기반 SPWM 제어계 모델링
Fig. 5 The SPWM control system modelling using EMTP-TV

먼저 PI 제어기는 RMS 측정기능으로부터 제공되는 인버터 출력전압(RMS) 값과 기준전압 (RMS) 값을 비교하여 그 오차신호를 SPWM 변조기능에 궤환 제공한다. 다음 단상 풀브리지 인버터는 SPWM 변조신호를 기반으로 DC 전원을 스위칭하여 인버터 출력전압의 크기를 제어하게 된다. 이때, SPWM 변조기능으로부터 제공되는 초기 게이트 신호는 인버터 출력전압과 기준전압의 오차신호가 커서 최대의 전압이 발생할 수 있도록 다중 펄스 방식의 게이트 신호형태를 보이다가 점차적으로 정현파 펄스폭 변조 게이트과형을 보이게 된다. 그림 6은 EMTP-RV시뮬레이션

결과에서 제공되는 대표적인 정현파 펄스폭 변조 게이트 신호를 보인다.

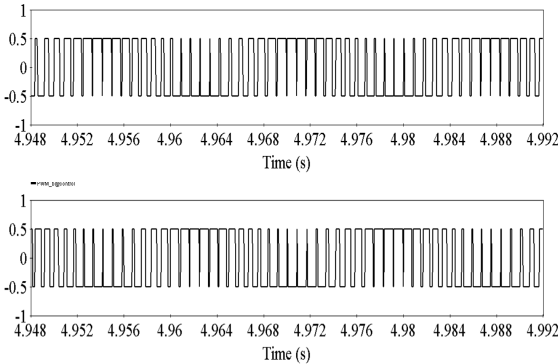


그림 6. 정현파 펄스폭 변조 게이트 신호
Fig. 6 SPWM gate signal

인버터 출력전압은 그림 6에 보인 SPWM 게이트 신호에 따른 스위칭 소자들의 온/오프 동작을 통해서 얻어지게 된다. 그림 7은 이때, 얻어지는 LC 필터 전의 펄스 열 형태의 전압파형을 보이는데, LC 필터의 필터링을 기능을 통해 부드러운 정현파 파형으로 변환되어 출력되며, 다시 PI 제어기의 입력으로 제공됨으로서 연속적인 전압제어가 이루어지게 된다.

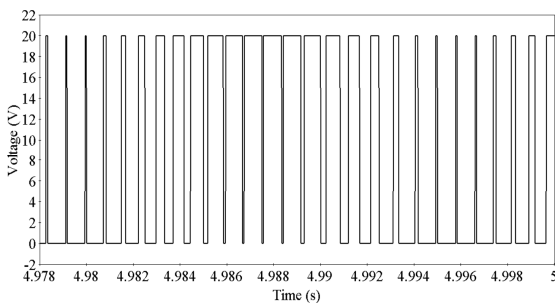


그림 7. 인버터의 LC 필터 전 출력 전압
Fig. 7 The output voltage of inverter before LC filter

그림 8은 부하급변 시의 연속적인 전압제어 능력을 검증하기 위해 제공되는 RL 가변부하를 보인다. 1초 간격으로 저항 부하와 리액턴스 부하가 변화하는 가변부하로 모델링된다.

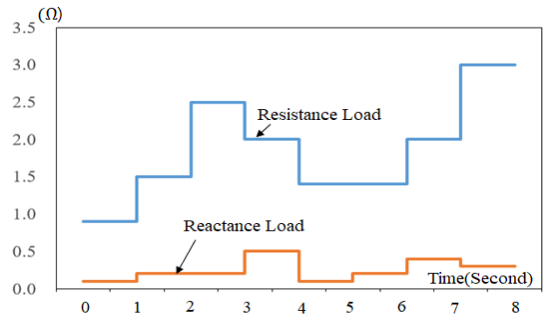


그림 8. 가변 부하 패턴
Fig. 8 The variable load pattern for five second

부하가 증가하면 전류가 감소하여 전압이 높아지게 되는데 이를 증가분을 보상하기 위해서 전압은 낮추어져야 한다. 반면에 부하가 감소하면 전류가 증가하여 전압이 낮아지게 되며 이 감소분을 보상하기 위해서는 인버터의 전압이 높아져야 한다. 그리고 이러한 부하변화에 따른 전압제어 과정을 통해서 인버터의 출력전압이 기준전압을 추종하게 된다. 그림 9는 RMS 값으로 표시된 인버터의 출력전압이 부하가 순간적으로 변화할 때마다 빠르게 대응하여 기준전압을 추종해가는 것을 보인다.

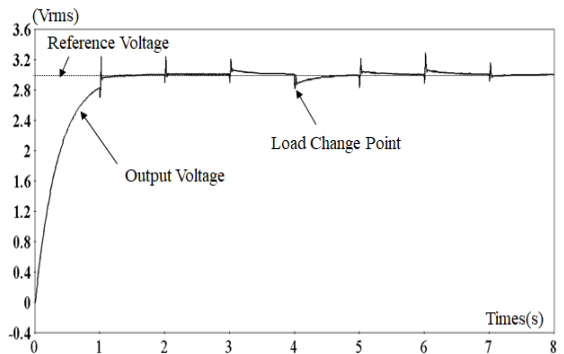


그림 9. 인버터 출력전압의 RMS 값
Fig. 9 The RMS value of inverter output voltage

그림 9가 인버터 출력전압의 RMS 값인 반면 그림 10은 대응하는 인버터 출력의 전압 파형을 보인다.

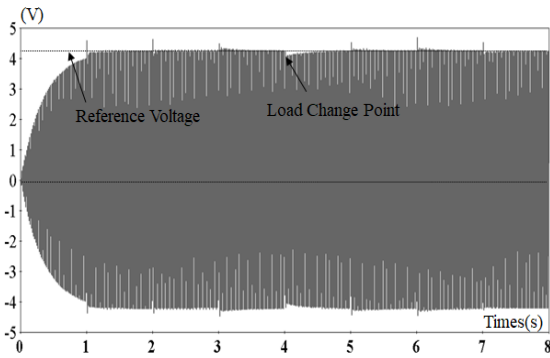


그림 10. 인버터의 출력 전압 파형
Fig. 10 The output voltage waveform of inverter

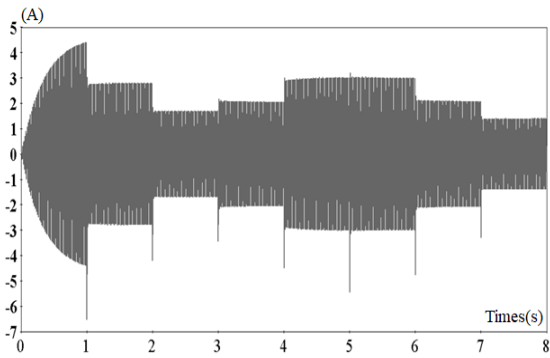


그림 11. 인버터의 부하 전류 파형
Fig. 11 The load current waveform of inverter

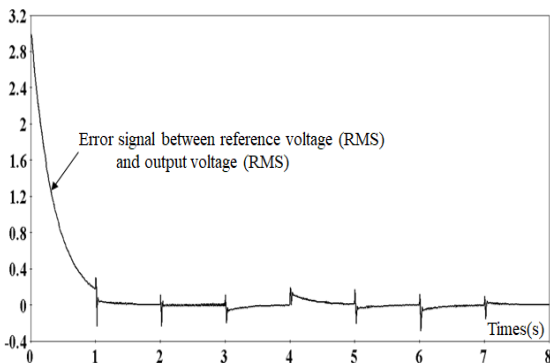


그림 12. 에러신호의 변화
Fig. 12 The change of error signal

그림 11은 입력전압의 변화에 따라 적응적으로 대응하여 변화하는 부하전류의 파형을 보인다. 그림 12는 전압추종과정에서 발생하는 인버터의 출력전압과 기준전압과의 오차신호 e 의 변화를 보이는데, 부하가 급변하는 순간마다 전압제어를 통해서 빠르게 0으로 수렴하는 것을 보인다.

VI. 결 론

본 연구에서는 단상 풀 브리지 인버터의 전압제어 방법들을 분석하였다. 또한 이를 기반으로 SPWM 구동방식의 단상 풀 브리지 인버터의 전압제어계를 설계하였다. 단상 풀-브리지 인버터, 출력전압과 기준전압의 오차를 선형적으로 보상하기 위한 제어기로서 PI 제어기를 선택하였다. 그리고 제어계 설계의 유효성을 확인하기 위해 설계결과에 근거하여 EMTP-RV를 이용하여 SPWM 구동방식의 단상 풀-브리지 인버터의 전압 제어계를 모델링하였고, 목표 기준전압에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였으며 출력전압이 정확하게 기준전압을 수렴하는 것을 확인함으로써 제어계 설계의 유효성을 확인할 수 있었다. 차후, 이들 설계기술은 마이크로 스마트 그리드 시뮬레이터의 3상 태양광 인버터 설계의 기본 기술로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 2017년도 남서울대학교 교내 연구비의 지원에 의하여 연구되었음

References

- [1] A Qazalbash, A Amin, A Manan and M Khalid, "Design and Implementation of Microcontroller based PWM Technique for Sine Wave Inverter", *International Conference on power Engineering Energy and Electrical Drives*, Lisbon, Portugal, March 2009, pp. 163-167.
- [2] Y. Jiang and J. Pan, "Single Phase Full Bridge Inverter with Coupled Filter Inductors and

- Voltage Doubler for PV Module Integrated Converter System", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, vol. 57, no. 4, 2009, pp. 355-361.
- [3] C. L. Smith, "Modeling and Control of a Six-Switch Single-Phase Inverter, Degree of Masters of Science in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, Aug. 2005.
- [4] M. Dave1 and S. R. Vyas, "Simulation and Modelling of Single Phase DC-AC Converter of Solar Inverter", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 9, Dec. 2015, pp. 2225-2230.
- [5] P. H. Zope1, P. G. Bhangale, P. Sonare and R. Suralkar4, "Design and Implementation of Carrier based Sinusoidal PWM Inverter, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*," vol. 1, no 4, Oct. 2012, pp.230-236.
- [6] P.A. Dahono, A. Purwadi and Qamaruzzaman, "An LC Filter Design Method for Single-Phase PWM Inverters", *Proceedings of 1995 the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, Feb. 1995, pp.21-24.
- [7] A. A. Ahmad, A. Abrishamifar, M. Farzi, "A New Design Procedure for Output LC Filter of Single Phase Inverters", *Proceedings of 2010 the International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System*, Shenzhen, China, vol. 3, Nov. 2010, pp. 86-91.
- [8] V. Vlatkovi, D. Borojevi and F. C. Lee, "Input Filter Design for Power Factor Correction Circuits", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 11, no. 1, Jan. 1996, pp. 199-205.
- [9] V. Sharma, R. Kumar and N. Tripathi, "Current mode Controller Design for Single Phase Grid Connected Inverter Using Proportional Resonant Control Strategy," *International Journal of Emerging Technologies and Engineering*, vol. 2, no. 8, Aug. 2015, pp. 125-130.
- [10] R. Ramesh, U. Subathra and M. Ananthi, "Single phase AC-DC Power Factor corrected Converter with High Frequency Isolation using Buck Converter", *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4, no. 3, Mar. 2014, pp. 79-82.
- [12] Y. Ko, "A Study on the Agent (Protective Device)-based Fault Determination and Separation Methodology for Smart Grid Distribution System," *J. of the Electrical Engineering and Technology*, vol 10, no. 1, Jan. 2015, pp. 102-108.
- [13] W. Seo and M. Jun, "A Direction of Convergence and Security of Smart Grid and Information Communication Network," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol.5, no. 5, 2010, pp. 477-486.
- [14] H. Song, K. Park and E. Kim, "Design and Implementation of Stand-alone Microgrid Monitoring System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol.10, no. 4, 2015, pp. 527-532.
- [15] B. Chang, C. Moon, Y. Chang, T. Park and M. Jeong, "A Study on Optimal Capacity Design of Renewable Combined Power System for Energy Self-Sufficient Island", *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 11, Oct. 2015, pp. 1271-1276.
- [16] Y Ko, S. Oh, H. Kim, I. Kim, "A Study on the Basic Theory for a Micro Smart Grid Simulator Design Using MEMS' Miniaturization Technology," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 2, Apr. 2017, pp. 315-324.
- [17] S. K. Singh1, H. Kumar, K. Singh and A. Patel, "A Survey and Study of Different Types of PWM Techniques used in Induction Motor Drive", *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*, vol. 4, no. 1, Feb. 2014, 018-122 pp. 18-22.
- [18] A. Hanif, A. Mukhtar, U. Farooq and A. Javed, "Comparative Analysis of Voltage Control Signal Techniques for Single Phase Inverter," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 3, no. 6, Dec. 2011, pp. 762-770.
- [19] R. Panda and R. K. Tripathy, "A Simple and Efficient Symmetrical Hybrid Sine PWM Inverter for PV Power Cells," Degree of Masters of Technology in Department of

Electrical Engineering, Motilal Nehru National Institute of Technology, University of Allahabad, Uttar Pradesh, India, June 2006.

[20] K. Han, R. Hwang and S. Lee, Power Electronics Engineering, Hyungsul Publisher, Paju, Kyunggi, South Korea, 1996.

[21] PowerSys, EMTP-RV manual.

저자소개



고 윤 석(Yun-Seok Ko)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업(공학사).

1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사).

1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).

1986년~1996년 한국전기연구소 선임연구원.

1996년~1997년 포스코 경영연구소 연구위원.

1997년~현재 남서울대학교 전자공학과 교수.

2012년~2013년 University of Utah 방문교수

※ 관심분야 : 전력시스템 자동화, 배전자동화, 주택자동화, 로봇제어