태양전지 실리콘 결정 성장용 120kW 3kA PWM 컨버터 시스템 개발

Development of PWM Converter System for Solar Cell Silicon Ingot Growing 120kW 3kA

김민회[†] · 박영식^{*}
(Min-Huei Kim · Young-Sik Park)

Abstract - This paper is research result for a development of solar cell silicon ingot growing(SCSIG) PWM converter system for 120[kW] 3[kA]. The system include 3-phase AC-DC rectifier diode converter of input voltage AC 460[V] and 60[Hz], DC-AC single phase full bridge PWM inverter of high frequency, AC-DC single-phase full wave rectifier using center-tapped of transformer for low voltage 50[V] and large current 3,000[A], carbon resistor load 0.2[m Ω]. PWM switching frequency for IGBT inverter control set 15KHz. The suggested researching contents are designed data sheets of power converter system, PSIM simulation, operating characteristics and analysis results of developed SCSIG system

Key Words : Silicon ingot growing converter, High frequency transformer, H-bridge inverter, Center-tapped transformer rectifier, THD

1. 서 론

산업용으로 적용하고 있는 대용량 전력변환 컨버터 시스템에 많이 사용되어온 전력용 반도체 소자인 SCR은 구동시 전력소모가 적고 자기소호 기능이 있는 IGBT로 대체하여 컨버터 시스템으로 소형, 경량화, 고성능제어 그리 가격저하 등을 통하여 효율을 증대시키려는 연구가 활발하게 진행되고 있는 추세에 있다[1-8].

SCR을 사용하는 위상제어용 컨버터 제어시스템은 출력 정압의 정밀제어에 있어 어려움이 따르고, 시스템의 효율이 낮으며, 출력에 고조파 성분이 많이 포함되는 문제점을 갖고 있다. 따라서 IGBT 전력용 소자를 사용하는 전력변환 컨버터 시스템을 개발하는 주목적은 출력의 정밀제어와 효율증대 및 THD 감소를 위한 것이다[1-4].

최근에는 사파이어(sapphire) 단결정 성장용으로 사용하기 위한 전력변환 시스템으로 30[Ka] 용량을 가지는 정밀 온도제어 시스템 개발에 대한 연구도 이루어지고 있다[5].

일반적으로 대전력 전력변환 컨버터 시스템에서, 입력 측과 출력 측에서 THD를 적게 하기 위하여 고주파 변압기를 사용하여 스위칭에 의한 직접 전력을 전달하는 PWM 인버터 제어시스템으로, 구형파 PWM, 정현파 PWM, 공진형 제어시스템 등이 적용 되고 있다[6-8].

본 연구에서는 태양전지 실리콘 결정 성장(SCSIG)에 사

용하기 위하여 정밀 온도제어용으로 120[kW], 50[V], 3,000[A]급 전력변환 컨버터 제어시스템의 개발을 완료하여, 그 결과를 제시한다. 연구결과로 제시된 내용은 적용된 전력변환 컨버터 시스템의 기본 설계자료, PSIM 시뮬레이션, 개발된 시스템의 운전특성 시험 및 분석 결과를 고찰하였다.

2. 전력변환 시스템의 사양

일반적으로 태양전지 실리콘 결정 성장용으로 많이 사용되고 있는 전력변환 컨버터 시스템 개발에 요구되는 정밀 온도제어 시스템의 사양 특성은 다음과 같다.

입력 전원은 3상 60[Hz], 380-480[V], 200[A]이며, 출력은 직류 전압 60[V], 전류 3000[A], 출력 120[kW] 이상, 역율 95[%]이상, 효율 95[%]이상, 출력 전류 THD 20[%] 이하로 설정되었다. 또한 부하는 온도제어용으로 카본 저항 0.2 m Ω 이다[5].

3. 컨버터 시스템 설계

대용량의 온도를 정밀 제어하기 위해 적용된 전력변환 시스템은 그림 1과 같이 전력용 다이오드를 사용하는 3상 AC-DC 변환 정류기, LC 직류필터, H-Bridge DC-AC 인버터와 스너버용 LC 소자, 2차 중간 탭을 가지는 단상 고주파 변압기, 전력용 다이오드를 사용한 단상 AC-DC 정류기 및 부하저항으로 구성된다[6-9]. 많은 시뮬레이션과 컨버터 시스템 제작 및 시험결과를 검토하여 다음과 같은 설계로 요약 되었다[9].

[†] 교신저자, 정회원 : 영남이공대학 전기자동차과 교수
E-mail : mhkim@ync.ac.kr

^{*} 정 회 원 : ㈜하이템 기술이사
접수일자 : 2014년 4월 22일
수정일자 : 2014년 6월 25일
최종완료 : 2014년 7월 10일

그림 1 적용된 전력변환 컨버터 시스템

Fig. 1 Circuit diagram of adapted power converter system

3.1 3상 AC-DC 정류기 설계

- L_s 는 입력전류의 고주파 성분을 줄이기 위하여 사용되는 교류 필터로, 600[V] 200[A]의 용량으로, 동선 직경 10[mm] x 11[Turn]으로 제작 되었다. 이때 제작하여 사용한 각상 인덕터의 값은 $L_{s1} = 0.359[\text{mH}]$, $L_{s2} = 0.401[\text{mH}]$, $L_{s3} = 0.360[\text{mH}]$ 이다.
- 정류용에 적용한 3상 브리지 다이오드는 1200[V] 600[A]으로, MMF400Y040DK1을 사용하였다.
- L_{bus} 는 정류된 직류 전류성분을 필터하기 위하여 사용되는 인덕터로, 1,200[V] 300[A]의 용량으로, 동선 직경 6.35[mm] x 17[Turn] x 2[Line]으로 제작 되었다. 이때 인덕턴스 값은 $L_{bus} = 0.478[\text{mH}]$ 이다[12].
- C_{bus} 는 정류된 직류 전압성분을 필터하기 위하여 사용되는 커패시터로, 900[V], 2,320[uF](=580[uF] x 4ea)를 사용하였다.
- 정류된 직류 버스전압은 $V_{bus} = 620[\text{V}]$ 이다.

3.2 H-Bridge DC-AC 고주파 인버터 설계

요구되는 전압과 전류가 1200[V] 300[A]이므로 IGBT는 Infineon사의 FF1200R12KE3를 사용한다.

- L_{sn} 은 전력용 스위칭 소자인 IGBT를 보호하기 위한 L-C 스너버 회로용 인덕터로, 평균동선 8.8[sq] x 15[Turn]으로 제작하였으며, 인덕턴스 값은 $L_{sn} = 0.283[\text{mH}]$ 이다[12].
- C_{sn} 은 L-C 스너버 회로용으로, 800[V]인 $C_{sn} = 50[\text{uF}]$ 를 사용한다.
- C_s 는 고주파 변압기의 1차측 권선의 자기 인덕턴스와 직렬공진용으로, 800[V] 내압용 커패시터인 $C_s = 400[\text{uF}]$ 를 사용한다.

3.3 고주파 변압기 설계

- 설정된 인버터의 스위칭 주파수가 30[kHz]으로 온도상승 및 손실을 고려하여, 고주파 변압기 설계에 따라, 철심의 규격은 표 1과 같으며, 권선 도체의 규격은 표 2와 같다 [4,11,12].
- 스위칭 주파수는 30[KHz]에서도 동작하는 EI 철심 코아

를 사용한다.

- 1차 정격전압은 480[V], 2차 정격전압은 60[V]로 결정하여 제작하였다.
- 고주파 변압기에서 발생하는 열을 냉각하기 위하여 물을 순환시키는 냉각방식을 사용한다.

표 1 철심 코아 설계

Table 1 Designed iron core

구분	철심 설계		단위
	1차권선	2차권선	
최대 전압	480	60	[V]
도체 권선수	8	1 * 2	[Turn]
코아 형태 및 크기	EI, BK 62*41*20		[cm]
철심 재료	PM12		[Turn]
철심 단면적	3918.4		[mm ²]
주파수	30		[kHz]
최대 자속밀도	229.2		[mT]
포화 자속밀도	290		[mT]
최대 철심 단면적	5084.0		[mm ²]
냉매 통과 설비	400 * 250 * 480		[mm]

표 2 권선 설계

Table 2 Designed winding

구분	권선 설계		단위
	1차권선	2차권선	
권선 제작방법	권선법	압축법	-
도체 형태	평각릿츠 동선	릿츠동선	-
도체 규격	8.0	16*25	[mm]
도체 권선수	8	1+1	[mm]
인덕턴스	7.327	0.042	[mH]
치수	폭	4.0	20.0
	넓이	30.0	80.0
	면적	120.0	1600.0
허용전류	350	3,000	[A]
전류밀도	2.7	1.6	[A/mm ²]

3.4 단상 변압기 중간탭 AC-DC 정류기

- 단상 고주파 정류기는 고주파 변압기의 2차 측의 중간탭을 이용하는 방식으로, 권선수 비는 8 : 1 : 1로 설계 제작 하였다[10].
- 정류용 다이오드는 고주파용으로, 1200[V], 900[A]용 10개를 병렬로 연결하여 사용한다.

3.5 부하저항

부하는 대용량 열 제어용으로 사용되는 카본저항(Carbon resistor) 또는 텅스텐(Tungsten resistor)을 사용한다. 한 모듈 당 150[KW] 용량을 가지는 태양전지 실리콘 결정 성장

용에 사용하는 고온 발생용 카본저항 $R_L=2[m\Omega]$ (저항 10개를 병렬로 연결)을 사용한다.

4. 시스템 시뮬레이션

그림 1과 같이 적용된 전력변환 시스템에 설계된 소자의 값을 사용한 PSIM 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 한 결과는 다음과 같다[5]. 그림 2는 3상 입력특성으로, 입력 상전압 V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} 와 선간전압 V_{sab} 파형, 3상 입력 선전류 $I(L_{sa})$, $I(L_{sb})$, $I(L_{sc})$ 파형, 필터된 직류 버스전압 V_{bus} 와 전류 $I(L_{dc})$ 파형, 입력측 고조파 성분 I_{THD_input} 와 $I_{THD_input_F1}$ 의 분석 파형을 보여준다. 그림 3은 고조파 인버터 특성으로, 변압기 입력측 전압(V_{pin})과 전류($I(C_{inv})$) 파형, 출력측 전압파형 V_{outP} 와 V_{outN} , 스너버용 C_{s1} 와 C_{s2} 전류 및 L_{resf} 와 L_{resr} 에 흐르는 전류파형, 인버터 입력 전류의 고조파 성분 I_{inv_THD} 의 분석 결과를 보여준다. 그림 4는 출력특성으로, 출력 전압 V_{out} 와 전류($I(R_{out})$)의 파형, 입력(변압기 2차측) 교류 전압파형과 고조파 전류성분의 파형을 보여준다. 표 3은 시뮬레이션에 적용한 파라메타 값을 정리한 것이다.

표 3 시뮬레이션에 적용한 파라메타 값

Table 3 Adapted parameters value for simulation

파라메타	적용한 값	파라메타	적용한 값
L_{s1}	0.360 [mH]	C_s	400 [uF]
L_{bus}	0.478 [mH]	L_s	7.327 [mH]
C_{bus}	2,320 [uF]	$S.F$	30 [kHz]
L_{sn}	0.283 [mH]	R_L	0.2 [$m\Omega$]
C_{sn}	50 [uF]	Turn ratio	8 : 1 : 1

5. 시스템 제작과 특성 실험

앞의 설계에서 제시된 자료를 근본으로 하여, 현장에서 오랜 경험으로 축적된 제작기술에 의해 요구된 사양에 적당한 전력변환 컨버터 시스템을 제작하였다. 그림 5는 고주파 변압기 제작 과정의 사진이며, 그림 6은 제작된 컨버터 시스템의 외형을 보여준 것이다.

개발된 컨버터 시스템의 운전특성을 조사하기 위해서, 부하는 현재 산업현장에서 태양광 실리콘 결정 성장용으로 사용되고 있는 고주파 히터용 카본저항을 실 부하로 실제 제조하는 환경에서 실험을 실시하였다.

그림 7은 고주파 변압기의 입력측의 전압 및 전류 파형을 관측한 것으로, 입력 실효치 전압 534[V]와 전류 실효치 332[A]이다. 그림 8은 측정하는 출력 단자의 직류 전압과 전류를 예로서 보여준 것으로, 평균전압 49.40[V]와 평균전류 3,083[A]을 나타내고 있다. 표 4는 개발된 컨버터 시스템의 운전특성을 요약한 것이다.

그림 2 시뮬레이션 입력특성

Fig. 2 Simulation results of input characteristic

그림 3 시뮬레이션 고조파 인버터 특성

Fig. 3 Simulation results of HF inverter characteristic

그림 4 시뮬레이션 출력특성

Fig. 4 Simulation results of output characteristic

표 5는 개발된 전력변환 컨버터 시스템의 특성을 측정된 결과를 보여준다. 또한 개발된 시스템의 특성을 그래픽으로 표시한 것으로, 그림 9는 입력 측의 역률과 시스템의 종합 효율을, 그림 10은 전원에 포함된 전압 및 전류의 THD 특성, 그림 11은 출력 특성을, 그림 12는 시스템의 운전특성 곡선을 보여준다.

그림 5 고주파 변압기 제작과정

Fig. 5 Manufacturing process of HF Transformer

그림 6 제작된 컨버터 시스템의 외형

Fig. 6 Assembly appearance of converter system

그림 7 고주파 변압기의 입력측 전압 및 전류 파형

Fig. 7 Input voltage and current waveform on HF Transformer

그림 8 측정된 출력의 직류 전압과 전류

Fig. 8 Measured output DC voltage and current value

표 4 개발된 컨버터 시스템의 특성

Table 4 Characteristics of developed converter system.

구분	규격	구분	규격
정격 출력	120[kW]	입력 전압 THD	7.6 [%]
정격 출력전압	DC 50[V]	입력 전류 THD	36.5 [%]
정격 출력전류	DC 3,000[A]	효율	94 [%]
정격 입력전압	AC 380~480[V]	역율	94 [%]
정격 입력전류	AC 200[A]	스위칭 주파수	15[kHz]

그림 9 역율 및 효율 특성

Fig. 9 Characteristics of input power factor and efficiency

그림 10 전원에 포함된 전압 및 전류의 THD 특성

Fig. 10 THD characteristics of input voltage and current

표 5 개발된 컨버터의 특성실험 결과

Table 5 Experimental Characteristic results of developed converter system

시스템 지령	입력 측정에 따른 고조파 및 전력 분석						출력 측정과 부하 특성				계산
전력 [kW]	전압 [V]	전류 [A]	V-THD [%]	I-THD [%]	유효전력 [kW]	역율 [%]	전압 [V]	전류 {A}	메타 [A]	출력 [kW]	효율 [%]
10.0	462.4	28.0	3.1	123.1	14.6	63	12.2	28.0	913	11	76
20.0	462.7	49.0	4.6	109.3	26.5	67	17.2	39.3	1278	22	83
30.0	462.1	61.0	5.0	79.2	38.4	79	21.0	48.1	1572	33	86
40.0	460.2	75.0	5.2	63.9	49.9	84	24.2	55.7	1812	44	88
50.0	460.7	87.0	5.4	53.9	61.4	89	27.1	62.2	2016	55	89
60.0	460.2	101.0	5.9	47.8	73.0	91	29.8	68.1	2215	66	90
70.0	458.0	114.0	6.2	43.6	83.9	92	32.1	73.5	2386	77	91
80.0	458.7	130.0	6.6	40.5	96.2	93	34.5	78.8	2570	89	92
90.0	456.3	145.0	7.0	37.7	107.1	94	36.6	83.6	2727	100	93
100.0	459.3	159.0	7.1	36.5	118.6	94	38.5	88.1	2878	111	94

그림 11 직류 출력 특성

Fig. 11 Characteristics of DC output power

그림 12 시스템의 운전특성 곡선

Fig. 12 Operating characteristic curve of the system

6. 개발된 시스템 특성 검토

연구 개발하여 제시된 120[kW] 3,000[A] 컨버터 시스템의 특성은 다음과 같이 요약된다.

- 시행오차에 의해 결정된 소자 값을 사용하여 제시된 컨버터 시스템을 PSIM 프로그램을 사용하여 모의 실험한 결과 전반적으로 이론적인 측면에 잘 접근하고 있음을 확인 하였다.
- 개발된 컨버터의 시스템의 특성을 요약한 결과는 표 4에서 보여 주었다.

- 실부하의 변화에 따른 개발된 컨버터 시스템의 운전특성이 표 5에서 제시되었다.
- 역율 및 효율 특성은 그림 9에서 보는 바와 같이 50[kW]이상의 부하에서 90[%]이 됨을 알 수 있다.
- THD 특성은 그림 10에서 보는 바와 같이 경 부하에서는 고조파 전류 성분(I-THD)이 많이 포함되고 있으나, 부하가 증가됨에 따라 현저히 감소됨을 보여준다.
- 직류출력 특성은 그림 11에서 보는 바와 같이 선형적인 특성이 얻어짐을 보여준다.

7. 결 론

본 연구는 태양전지 실리콘 결정 성장용으로 개발된 120[kW] 3,000[A] 컨버터 시스템에 대하여 개발한 결과를 보여준다. 제안된 컨버터 시스템은 3상 AC-DC 정류변환기, DC-AC 고주파 변환 단상 전파 브리지 PWM 인버터, AC-DC 변압기 중성점을 이용한 단상 전파정류기로 구성되어 있다. 입력 전압은 3상 460[V]이며, 출력은 직류 50[V], 3000[A]로 카본 저항 0.2[m Ω]의 부하에 전력을 공급하며, 인버터의 고주파 변압기를 사용하여 스위칭 주파수 15[KHz]로 PWM제어한다.

개발된 시스템의 실 부하 시험에서 얻어진 특성으로 입력 전압 459.3[V], 입력전류 159[A], 직류 111[kW] 출력에서, 부하단 직류 전압 38.5[V], 전류 2,878[A], 효율 94[%], 역율 94[%], 전압 THD 7.1[%], 전류 THD 36.5[%] 이다. 앞으로 입력전류에 포함되는 고조파 성분 감소와 역율 및 효율 증가의 특성 개선에 대한 연구가 계속적으로 이루어 질 것이며, SPWM 방식과 공진 회로 방식을 적용한 시스템 개발에 대한 연구도 진행 할 예정이다.

References

- [1] Haifeng Fan and Hui Li, "High-Frequency Transformer Isolated Bidirectional DC-DC Converter Modules With High Efficiency Over Wide Load Range for 20KVA Solid-State Transformer", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 26, No. 12, pp. 3599-3608, Dec. 2011.
- [2] Mehdi Abolhassani, "Modular Multipulse Rectifier Transformers in Symmetrical Cascaded H-Bridge Medium Voltage Drives", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 27, No. 2, pp. 698-705, Feb. 2011.
- [3] Je-hyung Cho, Ki-Bum Park, Jin-Sik park, Gun-Woo Moon, and Myung-Joong Youn, "Design of a Digital Offset Compensator Eliminating Transformer Magnetizing Current Offset of a Phase-Shift Full-Bridge Converter", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 27, No. 1, pp. 331-341, Jan. 2012.
- [4] Hans Rossmanith, Marc Doebröenti, Manfred Albach, and Dietmar Exner, "Measurement and Characterization on High Frequency Losses in Nonideal Litz Wires", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 26, No. 11, pp. 3386-3394, Nov. 2011
- [5] Min-Huei Kim, Young-Sik Park, Hyun-Gik Song, "Developed Solar Cell Silicon Ingot Glowing Converter System of 120kW 3kA", 2012 Power Electronics Autumn Conference, pp. 237-238, 2012. 11. 23.

- [6] Young-Su Kong, "Non-Contact power Supply Using the Series-Parallel Resonant Converter", Trans. of KIEP, Vol. 9, No. 5, pp. 405-412, 2004. 10.
- [7] Sang-Ho Cho, Jong-hae Kim, "Zero-Current Switching LLC Resonant Post-Regulator for Independent Multi-Output" Trans. of KIEP, Vol. 14, No. 1, pp. 46-53, 2009. 02.
- [8] Sungwan Kim, Changsun kim, "The Efficiency Characteristics" of LLC half-Bridge Resonant Converter. Vol. 60, No. 7, pp. 1366-1371, Jul. 2011.
- [9] Fang lin Luo and Hong Ye, "Power Electronics - Advanced Conversion Technologies", CRC Press, 2010.
- [10] Bogdan M. Wilamowski and J. David Irwin. "The Industrial Electronics Handbook", CRC Press, 2011.
- [11] Xose M. Lopez-Fernandez, H. Bulent Ertan and Janusz Turowski, "Transformers - Analysis, Design, and Measurement", CRC Press, 2013.
- [12] Colonel Wm. T. McLyman, "Transformer and Inductor Design Handbook", CRC Press, 2011.

저 자 소 개

김 민 회 (金 玟 會)

1951년 8월 25일생. 1974년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년 3월~현재 영남이공대학교 전기자동차과 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구교수. 1996년 8월 IECON'96 최우수논문상 수상. 1998년~2006년 전력전자학회 이사, 부회장, 감사, 전동력응용연구회 위원장 역임. 현재 IEEE Senior Member. 본 학회 종신회원.

박 영 식 (朴 永 植)

1967년 2월 11일생. 1992년 영남이공대 전기과 졸업. 2003. 01 ~ 2012. 12. ㈜아람이엔지 "대전류형 전력변환 컨버터 시스템 개발" 연구위원 및 책임연구원. 2013 ~ 현재 (주)하이템 부설연구소 연구소장. 2012. 01 ~ 현재, 전력전자학회 정회원. 2014 현재 본 학회 정회원.