

고주파 링크 전력계통 연계형 PCS

김은수, 윤광호, 강성인, 차인수*
전주대학교, 동신대학교*

High Frequency Link PCS for Interfacing with Power Utility System

E.S Kim, G.H Yoon, S.I Kang, I.S Cha*
Jeon-Ju University, Dong-Shin University*

ABSTRACT

Recently, new technologies of the PCS (Power Conditioning System) for energy generating using solar cells or fuel cell are required for smaller unit with low cost and high performance. In this paper, the proposed high frequency AC linked DC/AC converter which consisted of LLC resonant and LF cycloconverter is presented, described and verified through the experimental results of 1kW PCS.

로만 구성된 고효율의 High Frequency Link PCS (Power Conditioning System)에 대한 회로를 제안하였다. 제안된 회로에서는 인덕터와 변압기를 하나의 변압기로 일체화시켜 LLC 공진인버터가 동작되도록 하였고 특히 변압기 2차측 누설인덕턴스를 증가시키는 방향으로 변압기를 권선하여 출력 측 필터 인덕터 처럼 동작되도록 설계함으로써 저가격, 고집적화 PCS를 구현하도록 하였다.

1. 서론

최근에 PCS(Power Conditioning System)는 고집적화 및 고기능화를 통해 소형화 및 단가를 저감하는 추세에 있다. 따라서 PCS 시스템에 적용되는 전원장치에 있어서 크기 및 무게저감 그리고 높은 전력밀도와 효율 특성을 요구하고 있고, 이러한 요구조건을 만족하기 위해 고주파 스위칭방식의 ZVS DC/DC 컨버터가 적용된 PCS시스템들이 연구되어왔고^[1], 더욱더 전력밀도 및 효율특성을 증가시키기 위해 공진컨버터가 검토되고 있는 추세이다^[2, 3].

하지만, High Frequency Link 계통연계 PCS (Power Conditioning System)는 절연을 위한 변압기를 소형경량화 할 수 있지만 계통연계 (110VAC/60Hz)를 위한 PWM 인버터 부분의 하드스위칭에 의한 전력변환손실 증가 및 PWM 인버터 입력커패시터 (C_o)와 60Hz의 저주파 인덕터(L_f)를 사용함으로써 부피 및 크기를 저감시키는데 한계성을 가지고 있다.

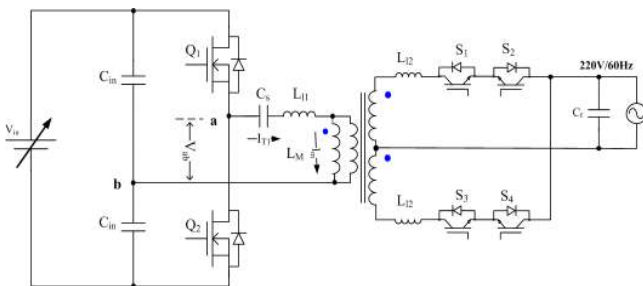


그림 1. High Frequency Link 고집적 LLC 공진인버터와 LF Cycloconverter를 적용한 제안된 PCS 주회로도

본 논문에서는 LLC 공진컨버터와 계통연계 인버터로 구성된 PCS시스템 보다는 구성부품의 최소화 및 단가저감을 위해 그림1에 나타낸바와 같이 LLC 공진인버터와 계통연계 (110VAC/60Hz)를 위한 LF(Low Frequency) Cyclo-converter

2. LLC 공진인버터와 LF Cycloconverter 적용 PCS

2.1 PCS 동작원리

본 논문에서 제안된 LLC 공진인버터 와 LF Cycloconverter로 구성된 PCS에서 승압모드와 강압모드 둘 다 동작될 수 있고, 상대적으로 좁은 주파수 제어범위에서 넓은 범위의 입·출력 전압제어를 할 수 있으며, 스위칭 동작영역에서 모든 스위칭소자들이 소프트 스위칭 할 수 있는 등의 여러 장점들을 갖고 있는 LLC 공진인버터의 이득특성 중 가변 제어 스위칭주파수에 따라 3가지 동작영역으로 나누어 설명 할 수 있다. 첫 번째 동작영역은 그림 2에서 볼 수 있듯이 ZVS 영역 중에서도 스위칭 동작영역이 규준화된 주파수(f_n)가 1보다 낮은 주파수 동작 영역인 불연속모드(Discontinuous Mode)에서 스위칭 하는 경우이다. 불연속 모드 동작 구간동안 흐르는 자화전류에 의해 주스위칭 소자는 영전압 스위칭 (ZVS)을 하게 되고, 변압기 2차측 LF Cycloconverter의 스위칭소자에서는 불연속 동작특성에 따라 영전류 스위칭(ZCS)하게 된다. 두 번째 동작영역은 그림 2에 나타낸 것처럼 규준화된 주파수(f_n)가 1보다 높은 주파수영역인 연속모드(Continuous Mode)에서 스위칭 하는 경우이다. 이때에는 단자전압(V_{ab}) 보다 변압기 1차측에 흐르는 전류(I_{T1})가 지연되어 순환전류인 지연전류(Lagging Current)가 흐르므로 주스위칭 소자는 영전압 스위칭(ZVS)을 하게 되고, 변압기 2차측 LF Cycloconverter의 스위칭소자 또한 영전압 스위칭(ZVS) 동작을 하게 됨으로 불연속모드 뿐만 아니라 연속모드 동작영역 모든 구간에서도 소프트 스위칭 되는 특성을 얻을 수 있다. 세 번째 동작영역은 LLC 공진인버터의 전압이득을 더 낮은 전압으로 낮추기 위해 설정된 영역이다. LLC 직렬공진 인버터는 최대 스위칭주파수(F_{max}) 이상에서 스위칭 동작되도록 제어한다 할지라도 이득변화가 크지 않고, 기본적인 전압이득특성을 갖고 있기 때문에 이때에는 설정된 최대 스위칭 동작주파수 (F_{max}) 이상에서는 적용된 제어회로의 Controller에 따라 Burst Mode(L6599) 또는 Duty Control(MC34067)를 통해서 전압이득을 낮출 필요가 있다.

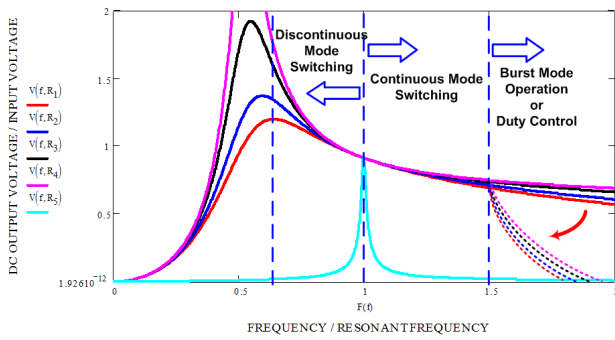


그림 2. LLC 공진 인버터 이득특성

2.2 전력계통 연계형 PCS 제어회로

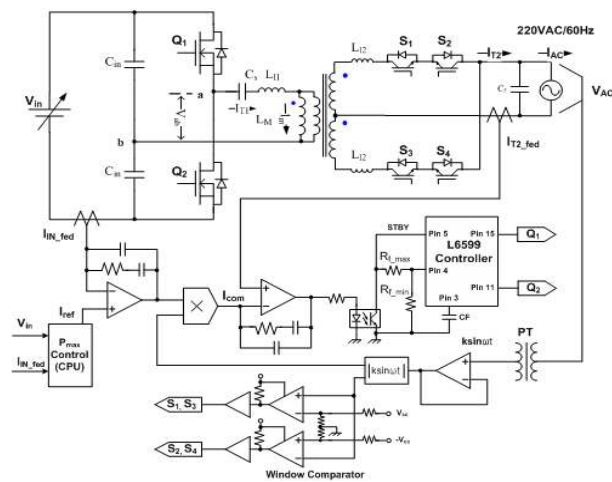


그림 3. 제어회로 구성도

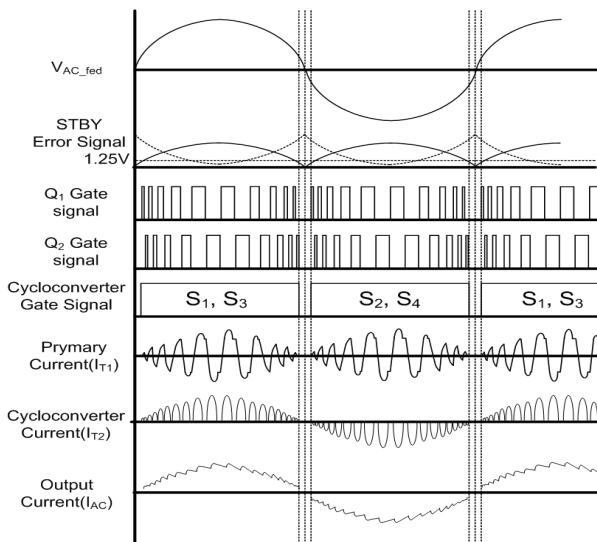


그림 4. 동작파형

그림 2에 나타난 LLC 공진인버터의 이득특성을 이용하여 계통전압(V_{AC})으로 어떻게 전력변환 되어 제어되는지에 대해서 설명하고자 한다. 그림 3의 제어회로 구성도 에서처럼 계통전압(V_{AC})을 검출하여 강압($ksin(\omega t)$)한 뒤 Window

Comparator를 거쳐 구형파를 만들고 계통전압(V_{AC})의 극성에 따라 변압기 2차측에 위치한 Cycloconverter의 스위칭소자를 교번으로 구동하게 된다. (Positive 전압일 경우 : S_1, S_3 Turn-on, S_2, S_4 Turn-off, Negative 전압일 경우 : S_2, S_4 Turn-on, S_1, S_3 Turn-off)

이와 동시에 계통전압(V_{AC})과 동상의 출력전류(I_{T2}) 파형으로 제어하기 위한 동기기준신호파형은 절대 값으로 정류된 후 ($|ksin(\omega t)|$) 곱셈기 입력단자에 연결되고 최대전력제어를 위한 CPU 전류제어신호(I_{ref})와 피드백 된 입력전류신호(I_{in-fed})가 Outer-loop 전류 보상기에서 여러 출력신호가 기준신호파형($|ksin(\omega t)|$)과 곱셈기를 통해서 곱하게 되어 출력전류(I_{T2}) 제어를 위한 전류 Command(I_{com}) 신호로 사용된다. Inner-loop 전류 보상기에서 전류 Command 신호(I_{com})에 따라 출력전류피드백(I_{T2-fed}) 신호는 계통전압(V_{AC})과 동상의 전류파형이 되도록 Inner-loop 전류 보상기 Error 신호로 출력되고 이 값에 따라 포토커플러의 입력다이오드의 전류를 제어한다. 제어된 신호에 따라 포토커플러 출력트랜지스터가 L6599제어기에 연결되어 있는 최대 스위칭주파수 제어저항(R_{f-max})과 최소 스위칭주파수 제어저항(R_{f-min}) 사이에 연결되어 임피던스를 제어함으로 L6599제어기의 스위칭주파수가 가변제어 되어 부하에 흐르는 출력전류파형(I_{AC})이 계통전압(V_{AC})과 동상의 전류파형이 되도록 제어된다.

3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 LLC 공진인버터와 계통연계(110VAC/60Hz)를 위한 Cyclo-converter로 구성된 High Frequency Link PCS를 구현하기 위해 적용 실험하였다. 입력전압(350V_{DC} ~ 400V_{DC})에서 계통전압(110V_{AC}/60Hz)으로 연계하여 출력하였다. 제안된 PCS에 대한 실험조건과 적용된 소자 등을 표1에 나타냈다.

표 1 High Frequency Link PCS 주요정격 및 파라미터

입력전압	350V _{DC} ~ 400V _{DC}	출력전압	110V _{AC} /60Hz
공진주파수(f_r)	64kHz	스위칭주파수(f_s)	63kHz ~ 240kHz
주스위칭소자 (Q_1, Q_2)		SD20N60(600V, 20A)	
LF Cycloconverter IGBT (S_1, S_2, S_3, S_4)		11N120CND (1200V, 43A)	
필터커패시터(C_f)	3uF	공진커패시터(C_s)	44nF
고주파 변압기 ($N_1/N_2 : 36/27$)			
1차측자기인덕턴스(L_p)	354.6uH	1차측 누설인덕턴스(L_{l1})	95.8uH
2차측자기인덕턴스(L_s)	175.61uH	2차측 누설인덕턴스(L_{l2})	30uH
등가누설인덕턴스(L_{eq})	138.9uH	자화인덕턴스(L_M)	258.8uH

직렬 커패시터(C_s)는 변압기 등가 누설 인덕턴스(L_{eq})와의 관계에 의해 공진 주파수(f_r)에 맞춰 계산된 값을 적용하였고, 1차측 누설인덕턴스(L_{l1})와 2차측 누설인덕턴스(L_{l2}) 및 자화인덕턴스(L_M)는 정규화 된 수식에 의해서 추출하였다. 제작된 변압기에서 각각의 파라미터 L_{l1} , L_{l2} , L_M 을 근거로 Math-CAD를 이용하여 부하(R_L) 변화(20Ω(1.2kW) ~ 120Ω

(200W)에 따른 전압이득 특성을 그림 5에 나타냈다.

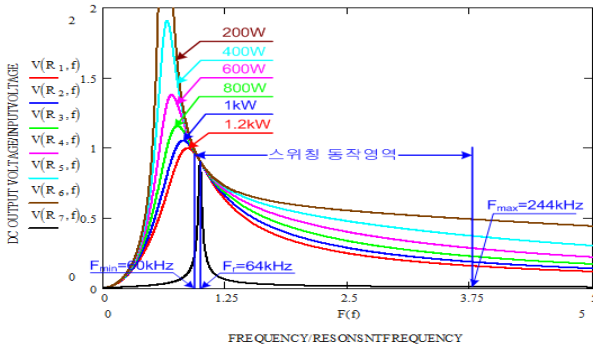
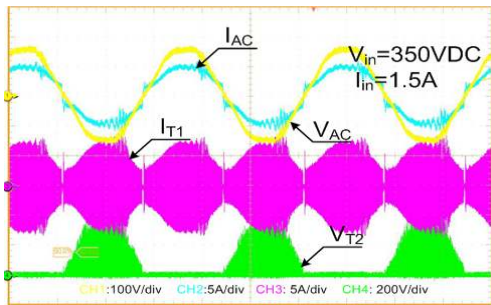
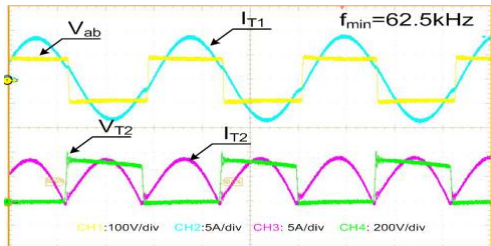


그림 5. 부하(R_L) 변화($20\Omega(1.2kW) \sim 120\Omega(200W)$)에 따른 전압이득 특성

동작 중 110VAC/60Hz 피크전압에서 최대 전류가 흐르기 때문에 주회로 설계에서 순간 최대전력에서 주 회로를 설계 검토하여야한다. 따라서 최대전력을 전달하는 전압이득특성으로부터 직렬공진주파수(f_r)가 64kHz이고 최대부하(1.2kW) 이득 특성 기울기가 Negative에서 Positive로 꺾이는 주파수가 57kHz이기 때문에 모든 스위칭소자들의 소프트 스위칭을 위해 최소스위칭주파수(F_{min})를 60kHz로 제한하였고, 최대 주파수는 244kHz로 두고 적용 실험했다. 그림 6과 그림 7은 입력전압(V_{in})을 각각 350VDC, 400VDC로 두고서 입력전류(I_{in})를 1.5A 일정 정 전류제어를 통해서 110VAC/60Hz 계통연계 된 PCS의 각 부 파형을 나타냈다. 계통전압(110VAC, 60Hz)에 따라 동상전류 제어됨을 볼 수 있다. 그림 6의 (b) 및 그림 7(b)의 실험파형을 통해 공진인버터 1차측 주 스위칭소자(Q_1, Q_2) 뿐만 아니라 2차측의 LF Cycloconverter IGBT(S_1, S_2, S_3, S_4) 피크전압 없이 소프트 스위칭 됨을 확인 할 수 있다. 그림 8은 표 1 조건에서 측정된 효율특성으로 350VDC 입력전압(V_{in}), 입력전류(I_{in})를 1.5A에서 91.3%의 효율특성을 보여주었으며 400VDC 입력전압(V_{in}), 입력전류(I_{in}) 1.5A에서는 입력전압 증가에 따른 여자전류증가 및 1차 측 전류(I_{T1})의 증가에 의해 90%로 다소 효율특성이 저하되었다.

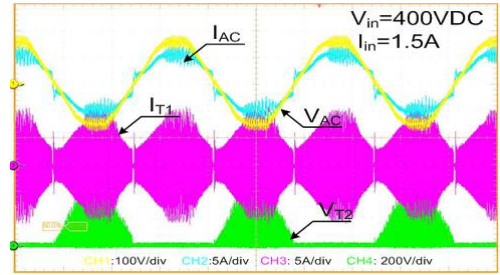


(a) 350VDC 입력전압(V_{in})에서 계통연계 PCS 실험파형

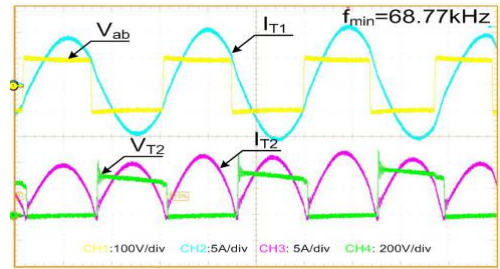


(b) 350VDC 입력전압(V_{in})에서 PCS 세부 실험파형

그림 6. 입력전압(V_{in} : 350VDC), 입력전류 (I_{in} :1.5A)에서 110VAC/60Hz 계통연계 PCS 실험파형



(a) 400VDC 입력전압(V_{in})에서 계통연계 PCS 실험파형



(b) 400VDC 입력전압(V_{in})에서 PCS 세부 실험파형

그림 7. 400VDC 입력전압(V_{in})에서 입력 정 전류(I_{in} : 1.5A) 제어상태 따른 110VAC/60Hz 계통연계 PCS 실험파형

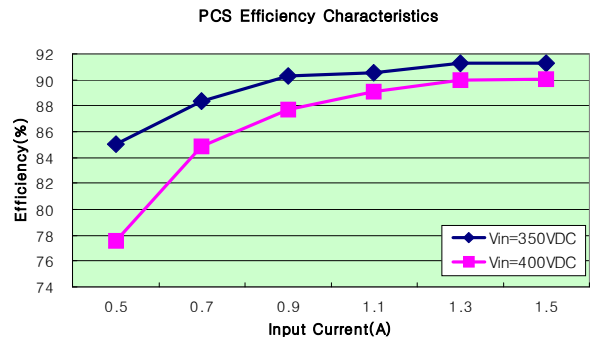


그림 8. 효율특성

4. 결론

본 논문에서는 구성부품의 최소화 및 단가저감을 위해 Half-bridge LLC 공진인버터와 계통연계(110VAC/60Hz)를 위한 Cyclo-converter로만 구성된 고효율의 High Frequency Link PCS (Power Conditioning System)에 대한 회로를 제안하여 700W PCS 시제품을 제작하였고 110VAC/60Hz 계통연계 실험적용 하였다.

5. 참고문헌

[1] M. Cacciato, A. Consoli, etc., "A Digitally Controlled Double Stage Soft Switching Converter for Grid-connected Photovoltaic Applications" IEEE APEC, pp 141~147, 2008.
 [2] Yong-Ho Chung, Bong-Soo Shin, Gyu-Hyeong Cho, "Bilateral Series Resonant Inverter for High Frequency Link UPS", 1989. IEEE PESC '89, vol.1, pp 83~90, 1989

[3] 서현우, 권정민, 김응호, 권봉환, "모듈형 계통연계 태양광 PCS", 전력전자학회논문지 제13권 제2호, pp119~127, 2008. 4.

이 논문은 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원
(R-2005-B-117)의 주관으로 수행된 과제임