

저항용접용 풀-디지털제어 대용량 소프트 스위칭 DC/DC 컨버터

Full-Digital Controlled High Power Soft Switching DC/DC Converter for Resistance Welding

김은수*, 김태진*, 변영복*, 조기연*, 조상명**
 * 한국전기연구소 전력전자연구그룹,
 ** 부경대 생산가공공학과

Abstract - Conventionally, ZVS FB DC/DC converter was controlled by monolithic IC UC3879, which includes the functions of oscillator, error amplifier and phase-shift circuit. Also, microprocessor and DSP have been widely used for the remote control and for the immediate waveform control in ZVS FB DC/DC converter. However the conventional microprocessor controller is complex and difficult to control because the controller consists of analog and digital parts. In the case of the control of FB DC/DC converter, the output is required of driving a direct signal to the switch drive circuits by the digital controller. So, this paper presents the method and realization of designing the digital-to-phase shift PWM circuit controlled by DSP (TMX320C32) in a 2,500A, 40kW ZVS FB DC/DC converter.

1. 서론

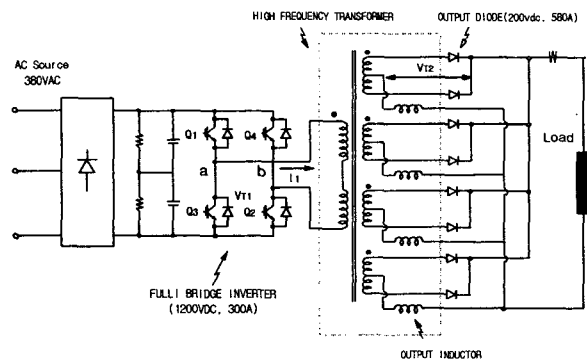
본 논문은 저항용접용 또는 도금용 등 저전압 대전류 ZVS FB DC/DC 컨버터의 디지털 구동 제어회로에 관한 것으로서, 전원장치의 제어회로 분야에 있어서 Phase shift FB DC/DC 컨버터의 구동을 디지털로 제어하기 위해, DSP(Digital Signal Processor) 또는 마이크로프로세서(80C196 또는 TMS320C24X DSP)에서 연산 처리된 디지털 값 그리고 프로그램 가능 논리소자(EPLD)를 사용하여 Phase shift된 디지털 값으로 변환하고, 이에 따라 대용량 ZVS FB DC/DC 컨버터의 구동을 제어하는 Digital-to-phase shift PWM 발생회로 및 적용 실험된 연구에 관한 것이다.[1,2,3]

본 연구에서는 제어회로의 유연성 및 단순화를 위해 아날로그 제어를 제외하고 단지 DSP(TMS320C32)를 이용한 제어회로만으로 40kW FB DC/DC 컨버터를 제어하는 디지털 제어회로를 구성하여 적용했다.

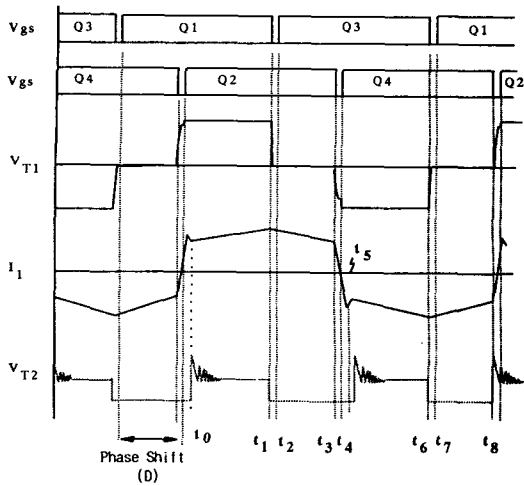
2. FB DC/DC 컨버터의 Digital-to-Phase-Shift PWM 발생회로

저전압 대전류 구동을 위한 ZVS FB DC/DC 컨버터는 그림 1에 나타낸 바와 같이 안정한 영전압 스위칭(Zero voltage switching: ZVS) 동작 영역을 확보하기 위해 Q₂와 Q₄에 대한 게이트신호가 Q₁과 Q₃에 대하여 Phase shift 되게 제어함

으로써, 변압기 2차 측 전압이 Zero인 시간간격 동안 1차 측 스위치 중 하나가 항상 On되게 제어한다. 이는 고주파 변압기의 누설인덕턴스와 스위칭소자의 기생출력 캐패시턴스와의 기생공진 문제를 해결할 수 있도록 누설인덕턴스에 따른 전류를 순환시키기 위한 낮은 임피던스 경로를 제공시켜준다. 이것은, 환류기간동안(t₁-t₃) 고주파변압기 1차 측 순환전류가 스위칭소자 Q₃의 역 병렬다이오드, 고주파변압기, 스위칭소자 Q₂를 통해 순환되고, 환류기간동안(t₆-t₈) 고주파변압기 1차 측 순환전류가 스위칭소자 Q₁의 역 병렬다이오드, 고주파변압기, 스위칭소자 Q₄를 통해 순환하게 함으로써 낮은 임피던스 경로를 제공하는 것이다[4].



(a) FB DC/DC 컨버터 주 회로도



(b) FB DC/DC 컨버터 동작파형

그림 1. FB DC/DC 컨버터 주 회로 및 동작 파형

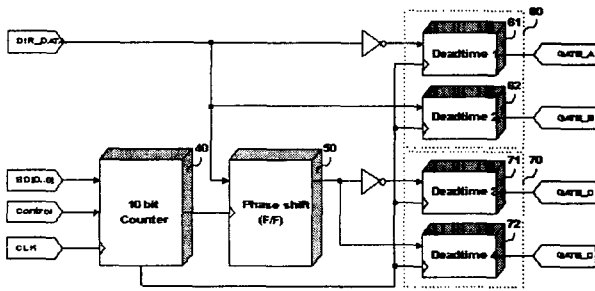


그림 2. Digital-to-phase-shift 발생회로 구성도

따라서, Phase shift PWM 동작에 따라 FB DC/DC 컨버터 1차 측 Bridge 스위칭소자들이 영 전압 스위칭을 하게됨으로써 스위칭손실 및 노이즈를 저감할 수 있다. 이러한 스위칭 패턴을 제공하고 구성하기 위한 Digital-to-phase shift PWM 발생회로가 필요하다. 위에 설명한 바와 같이 Digital-to-phase shift PWM 발생회로는 FB DC/DC 컨버터 1차 측 Bridge 스위칭소자가 고정된 스위칭주파수에서 각각 50% 듀티비를 갖는 방형파를 발생시켜야하고, 또한 FB DC/DC 컨버터의 한쪽 암(Q₁, Q₃)의 스위칭소자에 구동신호를 교번 적으로 제공하기 위한 신호와 스위칭소자 각 암 사이의 위상 차 제어를 위해 한쪽 암(Q₁, Q₃)에 대해 다른 쪽 암(Q₂, Q₄)의 스위칭소자의 교번 구동신호를 지연시킬 수 있는 Phase Shift 회로 발생 부로 구성되어야 한다. FB DC/DC 컨버터 스위칭소자의 각 암 사이의 위상 차는 노드a와 노드b 사이의 PWM 전압 파형을 결정하는 동작 듀티비 이다. 즉, 0 동작 듀티비는 0°의 위상차이고, 0.5의 동작 듀티비는

90°의 위상차를 갖고, 1.0의 동작 듀티비는 180°의 위상차를 갖는다. DSP 또는 마이크로프로세서의 출력은 Phase Shift된 동작 듀티비를 나타내는 디지털 수(Counter Register 또는 Period/Compare Register 데이터 값)이므로 DSP 또는 마이크로프로세서에서 연산 처리된 디지털 값을 Phase Shift된 값으로 변환하기 위한 Digital-to-phase-shift PWM 발생회로의 구성 및 적용이 본 연구의 목적이다.

표 1. 주요 특성 표

항 목	저전압 대전류 디지털제어 ZVS FB DC/DC 컨버터
입력 전압	AC 입력: AC 380 [V], DC 입력: DC540V(V _{in})
주스위칭 소자(Q ₁ -Q ₄)정격	IGBT(SK300GB123D) : 1,200[V] / 300[A]
스위칭 주파수(f _s)	20[kHz]
변압기(TR)	TDK 페라이트코어 PE38 UU120×310×20, 턴수비(n) : n = N ₂ /N ₁ = 1/16
누설인덕턴스(L _l), 2차측 필터(L _f)	6[uH], 5.75uH(R _i :0.1mΩ),
출력 전압(V _o)	DC 0 ~ 20[V]
출력전류, 부하(R), 리플율	0~2,500[A], 6mΩ, 5.5%(2100A 부하시 측정리플)
효율 및 출력 용량, 냉각방식	87%(정격부하시), 40[kW], 강제 풍냉
출력단 FRD	200V, 580A (t _{rr} :150ns, V _F :1.08)
출력 capacitor(C)	실험에는 사용되지 않음 (1% 미만의 정밀리플 요구 시: 400,000 μF, R _c :1.08mΩ)
데드타임: Dead time(δ _t)	1.02 [μs]
DSP 제어기	▶ TMS320C32-50 DSP적용 ▶ EPLD(EPM1796SQC160), A/D(MAX120) ▶ Key-Pad에 의한 파형 제어

3. 실험 결과

저항용접용 또는 도금용 저전압 대전류 전원장치로 제작 실험된 디지털제어 FB DC/DC 컨버터는 3상 AC 380V를 입력받아 3상 정류기를 통해 정류된 DC 전압(V_{in}:540V)을 입력으로 하여 출력 17[VDC], 2,500[A], 스위칭 주파수 20[kHz]로 구동하여 실험하였고, 실제 실험에 있어서는

대 전류 부하로 주물저항(0.001Ω/500A)을 직·병렬 연결하여 실험하였다.

DSP(TMS320C32)를 사용한 Digital-to-phase-shift 발생회로1을 적용한 대용량 FB DC/DC 컨버터의 사양 및 특성은 다음과 같다. 그림 3은 Digital-to-phase shift PWM 발생회로를 적용한 IGBT 구동회로의 실험결과 파형이다.

그림 4은 대용량 ZVS FB DC/DC 컨버터의 고주파변압기 1, 2차 측 전압, 전류 파형을 보여준다. 실험의 변압기 1차 측 파형 결과에서 고주파변압기의 누설인덕턴스와 1차 측 스위칭소자의 기생 캐패시턴스와의 공진 특성에 따라 데드타임 동안 영전압 스위칭 됨을 볼 수 있다. 그림 4(b) 및 그림 5(a)의 실험 파형에서는 출력정류다이오드의 역회복 특성 및 고주파 변압기 누설인덕턴스와 출력정류다이오드의 기생 캐패시턴스에 따른 기생공진에 의해 서지(Surge)전압이 발생함을 볼 수 있다. 이에 따라 출력 전류에 고주파 노이즈가 발생되어 출력전류 리플을 증가시키는 큰 요인이 된다. 본 논문에서 실험된 컨버터는 도금용 전원으로 출력 전류 리플을 5%정도 요구하기 때문에 DC 출력단에 출력콘덴서를 적용하지 않아도 정격부하에서 5.5%의 리플특성을 얻을 수 있었다. 향후, EMI 및 1%미만의 고주파 리플저감을 위해서는 출력콘덴서 적용 및 2차 측 정류부도 소프트 스위칭 될 수 있는 스너버의 적용이 필요하다.

그림 5(b),(c)의 파형은 전류명령에 따른 전류제어특성으로 DSP 제어회로에 있어서 Digital-to-phase-shift 발생회로1로 직접 구동 제어 및 간단한 PI 제어알고리즘만으로 정밀한 선형제어 및 유연성을 갖음을 볼 수 있다. 출력전류 I_{out}는 대전류 Probe가 없어 Hall 전류센서(LEM HAX2500:2, 500A/4V)를 사용하여 검출된 신호 파형이다.

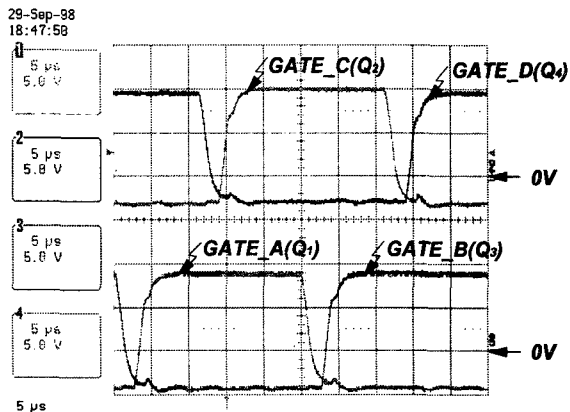
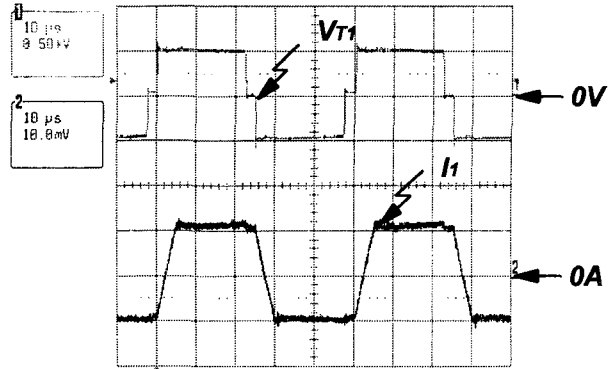
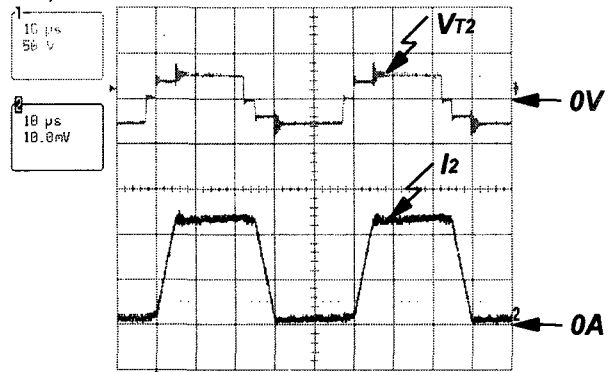


그림 3. Digital-to-phase shift circuit 1을 사용한 EXB841 IGBT 구동회로 실험 파형

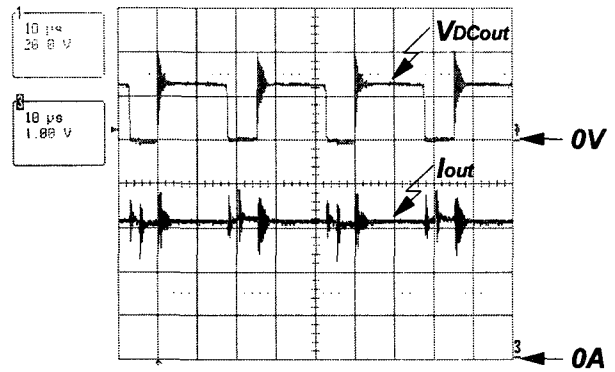


(a) 고주파 변압기 1차측 전압 전류 파형 (500V/div, 100A/div, 10us/div)

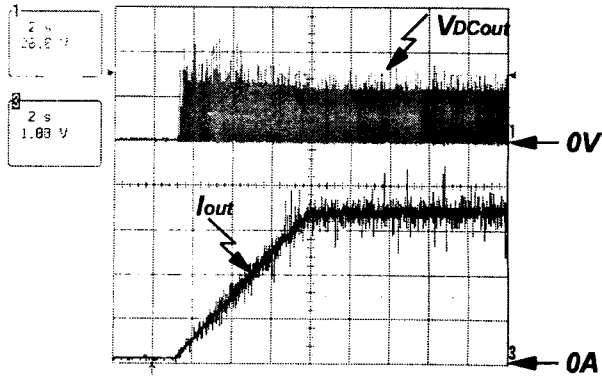


(b) 2차측 정류부 Unit1의 고주파 변압기 전압 전류 파형 (500V/div, 200A/div, 10us/div)

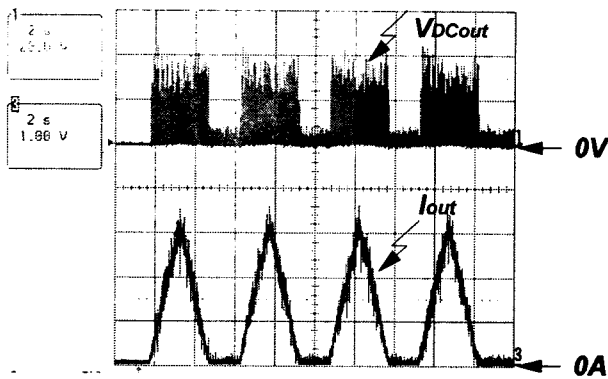
그림 4. 100% 부하(17VDC, 2300A)에서의 고주파변압기 1, 2차측 전압 전류 실험파형



(a) DC 출력전압 및 전류파형



(b) DSP 제어기 적용 Soft Start 제어시의 출력 응답 특성



(c) DSP 제어기의 전류 Command에 따른 출력 응답 특성 파형

그림 5. 100%부하(17VDC, 2300A)에서의 출력 제어 특성 (20V/div, 650A/1V/div, 2s/div)

5. 결 론

저항용접용 또는 도금용 저전압 대전류 전원 장치의 제어회로 분야에 있어서 ZVS FB DC/DC 컨버터의 구동을 디지털로 제어하기 위해, DSP 또는 마이크로프로세서에서 연산 처리된 디지털 값 그리고 프로그램 가능 논리소자 (EPLD)를 사용하여 Phase shift된 디지털 값으로 변환하고, 이에 따라 ZVS FB DC/DC 컨버터의 구동을 제어하는 Digital-To-Phase Shift PWM 발생회로에 대해 제안하였고, 이에 대한 동작원리 및 시뮬레이션과 DSP (TMS320C32)제어기를 이용한 제어회로만으로 저전압 대전류 저항용접용 또는 도금용 전원인 2,500A 40kW FB DC/DC 컨버터를 실험을 통해 적용 가능성을 보였다.

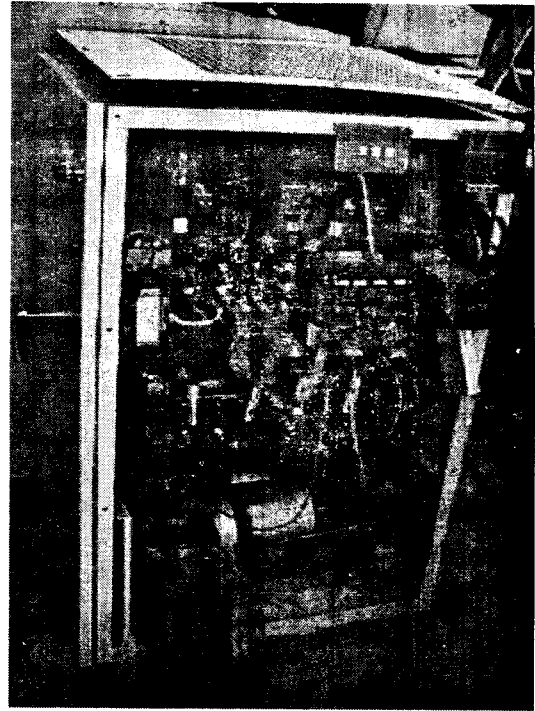


그림 6. DSP적용 40kW FB DC/DC 컨버터 시제품 사진

참 고 문 헌

- [1] P.F. Kocybik, K.N. Bateson "Digital Control of a ZVS Full-Bridge DC-DC Converter", IEEE APEC, 1995, pp. 687~693
- [2] C.H. Chan, M.H. Pong, "DSP Controlled Power Converter", IEEE Catalogue No.95TH8025, 1995, pp.364~369
- [3] I. K. Ellis, A. J. Forsyth, Z. Lu, "A High-Performance Digital Phase-Shift-Controller for The Zero-Voltage-Switching FB Converter", IEEE EPE, 1997, pp.3.173~3.178
- [4] Qing Chen, Ashraf Lotfi, F.C Lee, "Design Trade-offs for 5V Output Off-line Zero-Voltage-Switched PWM Converters", IEEE, Intelec'91, 1991, pp.616~623
- [5] Vlako Vlatkovic, Juan A. Sabate, Raymond B. Redley, Fred C. Lee, Bo H CHO "Small-Signal Analysis of the Phase-Shifted PWM Converter", IEEE Trans. Power Electron. vol.7, no1, pp.128-135, 1992
- [6] Texas Instrument, "TMS320C32-Addendum to the TMS320C3X Users Guide ", 1995