PLC 전원공급장치의 고장 방지를 위한 HOT-SWAP 기술에 관한 연구

A Study about The Hot-Swap Function for Prevention of Trouble in PLC Power Supplies

박종진*, 이종재**, 권봉환***
Jong-Jin Park, Jong-Jae Lee, Bong-Hwan Kwon

Abstract - In this paper PLC Power Circuit with Hot-Swap Function is proposed for stable power supplies. The power modules of the proposed devices are implemented by CRM flyback converter using new synchronous rectifier circuit for high efficiency. By a variable switching frequency controller, this converter is operated with a reduced turn-on switching loss. Also, the load current in these power modules are shared by auto master / slave method using Outer loop. The proposed devices are analyzed in detail and optimized for high performance. Experimental results for a 100W power module at the variable switching frequency of 30~70kHz were obtained to show the performance of the proposed device.

Key Words : Hot-swap, Active Current Sharing, CRM Flyback Convertor, synchronous rectifier circuit, Auto master/slave method

1. 서 론

최근, 보안장비나, 주요 공장라인의 제어부에 공급되는 전원공급 장치는 안정적이고 고효율을 갖는 반영구적인 특성들을 요구한다. 따라서 부하용량 증가와 소자 스트레스의 분산, 그리고 고장 난 모듈을 동작 중 교체 할 수 있도록 여러 개의 전원모듈들을 병렬로 운전하게 된다. [1]~[2] 이러한 전원공급 장치의 균등한 전력분산을 위해서 전체 부하전류를 모듈들 간에 공유를 해야 한다. 전원 모듈들 간에 균등한 부하전류 분담을 위해서 지금까지 많은 기술들이 개발되어 왔다. 부하분담기술로써 크게 Droop방법과 Active current-sharing 방법으로 나뉠 수 있다. Active current-sharing 방식은 출력전압의 나쁜 regulation과 효율감소의 단점을 부담해야 하는 droop 방식과 달리, 모듈들 간에 통신을 할 수 있도록 하는 전류 reference를 갖는 제어회로를 이용하여 완벽한 부하분담을 할 수 있다. 전류 부하분담 기술로 많이 이용되는 active current-sharing 방식은 전류 reference를 제공하는 방식에 따라 크게 average 방식, dedicated master 방식, 그리고 auto master-slave 방식으로 나뉜다. 다른 모듈 고장 시 전류 reference의 변동으로 모듈들 간 균등한 부하분담을 실패하는 average와 dedicated master 방식과 달리 auto master-slave 방식은 모듈들 간에 가장 많은 전류가 흐르는 모듈이 master가 되어 reference를 제공하고 다른 모듈들이 slave가 되어 master의 전류를 추종하는 방식이다. 따라서 master 모듈이 고장이 나더라도 slave 모듈들 중 가장 많은 부하를 부담하고 있는 모듈이 master가 되어 전류 reference를 제공함으로써 안정적인 모듈들 간의 균등한 부하 분담이 가능하다. [6]~[7] 각각의 모듈을 구성하고 있는 dc-dc 컨버터는 소프트 스위칭이 가능한 저렴하고 고효율의 컨버터를 요구하게 된다. 보통 dc-dc 컨버터로 플라이백 (flyback) 컨버터가 많이 이용되는데 플라이백 컨버터는 큰 turn-on 스위칭 손실을 갖는다. 따라서 새로운 소프트 스위칭 기법으로 기존의 PWM 방식과 달리 주파수 제어방식을 사용하여 불연속 전류모드 (discontinuous conduction mode)에서 누설인덕턴스와 스위치의 기생 커패시턴스간의 공진에 의에 발생하는 스위치의 최소전압을 검출하여 turn-on 함으로써 스위칭 손실을 줄일 수 있으며 고속 스위칭으로 인해 발생하는 EMI로 인한 노이즈를 줄여 줄 수 있다.[3] 또한 부가적으로, 높은 효율을 얻기 위해서 dc-dc 컨버터는 출력 측에 사용되는 다이오드를 스위치로 전환해 줌으로써 다이오드의 drop전압으로 인한 전력손실을 줄여 줄 수 있다. 출력 측의 다이오드 정류방식으로 인한 손실은 낮은 출력 전압, 높은 부하 전류를 갖는 컨버터에서 지배적이다.[4~5] 본 논문에서는 소프트 스위칭이 가능한 주파수 제어방식과 새롭게 제안하는 제어 게이트 구동회로를 이용하여 고효율, 저가의 전원모듈을 개발한다. 그리고 모듈간의 병렬연결 시 불가피하게 추가되는 오링 다이오드 (Oring diode)로 인한 손실을 줄여주기 위해서 SR 구동회로를 추가 구현하였다. 이렇게 개발되어 진 고효율의 모듈들은 앞서 언급되어진 Auto master/Slave 방식의 부하분담 제어기술을 적용하여 동작 중에도 수리 보수가 되는 Hot-swap이 가능한 고효율의 전원공급 장치를 구현 할 수 있다. 본문에서는 여러 가지의 부하분담 제어기술들을 알아보고, 새롭게 개발한 SR 구동회로와 플라이백 컨버터에 대해서 상세히 분석하였다. 또한 이를 이용하여 30~70 kHz의 주파수에서 소프

저자 소개
* 浦項工科大學 鐵鋼學科 碩士課程
** 浦項工科大學 電子電氣學科 博士課程
*** 浦項工科大學 電子電氣學科 敎授 · 工博

트 스위칭이 가능한 플라이백 컨버터를 이용한 100W/5V급 모듈을 실제 구현하였고 실험 결과와 파형을 통해 제안하는 컨버터의 성능을 증명하였다.

2. 부하분담기술의 고찰

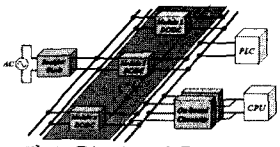


그림 1. Distrbuted Power system

그림 1은 여러 개의 컨버터 모듈을 병렬 운전하여 모듈의 부하분담을 감소시키며 PLC나 CPU를 동작시키는 시스템을 나타낸 것으로 다음과 같은 유리한 장점을 갖는다.

-.Redundancy: 요구되는 부하의 최소모듈(n) 이상 사용.

-.Thermal Management: 모듈의 부하분담으로 전력절감.

-.Maintainability: on-line 상태에서 고장 난 모듈 교체 가능(Hot-swap 기능)

이러한 부하분담 시스템은 컨버터들 간의 균등한 부하분담이 필수이다. 따라서 모듈들 간 균등한 부하분담을 위한 기술로 그림 2와 같이 분류될 수 있다.

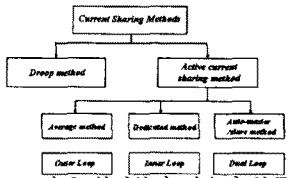
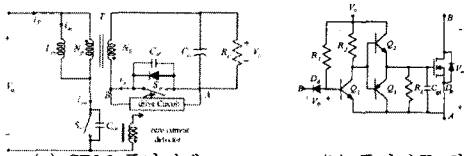


그림 2. 부하분담 기술의 분류

모듈간의 부하량에 대한 정보를 주고받는 능동 부하분담기술들 중 가장 많은 부하를 갖는 모듈이 master가 되고 나머지 모듈들이 slave가 되어 master의 전류량을 추종하는 master/slave 방식이 널리 쓰이고 있다. 본 논문에서는 새롭게 제안하는 동기정류회로를 이용한 고효율을 모듈들이 master/slave 방식을 통해 구현하였다.

3. 고효율 전원모듈



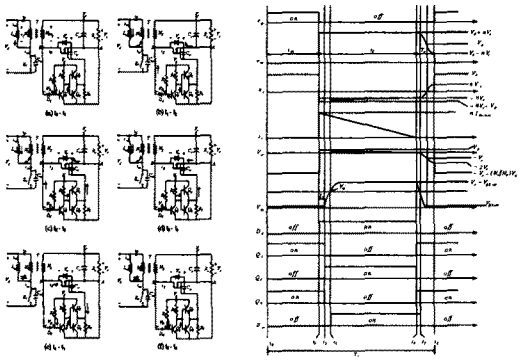
(a) CRM 플라이백 (b) 동기정류 회로

그림 3. 제안하는 CRM 방식의 전원모듈

동기정류기를 이용한 고효율의 전원모듈이 그림 3에 보여진다. 그림 3(a)는 스위치의 전압이 공진에 의해서 최소전압이 되는 순간을 검출함에 의해서 스위치를 도통시키는 주파수변동 제어방식을 이용한다. 그림 3(b)는 본 논문에서 새롭게 제안하는 동기정류기의 제어회로이다. 제안하는 고효율을 갖는 모듈의 정상상태는 그림 4에서 볼 수 있듯이 한주기 Ts 동안 6개의 모드로 나뉘게 된다.

Mode 1 [t0, t1]: t_0에서, 스위치 S_w가 도통 될 때 자화 인덕턴스 L_m에 인가되는 전압은 V_d가 된다. 따라서, 스위치 S_{sr}에 인가되는 전압 V_{sr}는 다음식과 같이 음의 값을 갖는다.

$$V_{sr} = -V_o - \frac{V_d}{n} < 0 \qquad (1)$$



a) 동작 모드 b) 이론적 파형

그림 4. 제안하는 전원모듈의 이론적 해석

D_d의 전압은

$$V_D = -V_o - \frac{V_d}{n} + V_{Q1,sat} \qquad (2)$$

이다. 따라서 D_d는 역바이어스 되고 Q_1은 도통된다. 이러한 조건하에서 Q_2와 Q_3로 구성된 푸시-풀 회로의 입력전압은 $V_{Q1,sat}$과 동일하게 된다. Q3만이 도통되고 푸시-풀 회로의 출력전압 V_{gs}는 $V_{Q3,sat}$가 된다. $V_{Q3,sat}$은 S_{sr}의 임계전압 V_{th} 보다 매우 낮다. 그러므로 S_{sr}은 꺼진 상태를 유지한다.

Mode 2 [t_1, t_2]: 스위치 S_w가 t_1에서 꺼질 때 스위치 S_{sr}에 인가되는 전압 V_{sr}는 아래 식과 같이 양의 값을 갖는다.

$$V_{sr} = V_F > 0 \qquad (3)$$

여기서 V_F는 S_{sr}의 다이오드 D_{sr}에 인가되는 순방향 drop전압이다. D_d의 순방향 전압은

$$V_D = V_F + V_{Q1,be(sat)} \qquad (4)$$

이다. 따라서 D_d가 도통된다. 그러나 트랜지스터의 스위칭 특성으로 인해 Q_1은 시간 t_s동안 꺼진 상태를 유지한다. 따라서 그림 4(a)에서처럼 시간 t_s 동안에 D_{sr}을 통하여 전류가 흐르기 시작한다.

Mode 3 [t_2, t_3]: t_2에서 초과전류에 의해 Q_1의 베이스에 과충전되어 있던 전하는 완전하게 제거된다. 이 조건에서, Q_2만이 저항 R_2를 통하는 전류에 의해 도통되고 푸시-풀 회로의 출력전압은 V_o-$V_{Q2,sat}$까지 증가한다. Q_2의 콜렉터전류는 스위치 S_{sr}의 기생콘덴서 C_s를 통하여 흐르기 시작하여 전압 V_{gs}은 증가한다.

Mode 4 [t_3, t_4]: t_3에서는 C_{sr}에 인가된 전압 V_{gs}가 임계전압 V_{th}보다 높기 때문에 S_{sr}은 도통된다. S_{sr}에 인가된 전압은 아래식과 같이 양의 값을 갖는다.

$$V_{sr} = i_s R_{on} > 0 \qquad (5)$$

여기서 R_{on} 이 스위치 S_{sr}의 도통 저항이다.

Mode 5 [t_4, t_5]: t_4에서 전류 i_s는 S_{sr}이 꺼지기 전에 영이 되고 L_m과 C_{sw}는 공진하기 시작한다. 그림 4(b)에서처럼 이 공진 구간동안 변압기의 2차측에 인가된 전압은 아래와 같다.

$$v_2(t) = -V_o \cos\omega_o t \qquad (6)$$

따라서 S_{sr}에 인가된 전압은 다음과 같이 음의 값이 된다.

$$V_{sr}(t)=V_o(\cos\omega_o t-1)<0 \qquad (7)$$

그리고 D_d는 역 바이어스 되고 Q_1은 도통된다.

Mode 6 [t_5, t_6]: t_5에서 V_{gs}는 임계전압보다 매우 낮기 때문에 스위치 S_{sr}은 꺼지게 된다. 게다가, 최소전압 스위칭이 가변 스위칭 주파수 제어에 의해 가능해져 스위치 S_w가 도통된다. 이때 2차 권선의 전압 v_2가 V_o에 도달하고 전압 V_{sr}은 그림 4(b)에서 알 수 있는 것처럼 $-2V_o$가 된다. 위의 상세 분석으로부터 S_{sr}의 V_{gs}가 전압 V_s의 극성에 의해 제어되는 것을 볼 수 있다. 또한, 2차측 전류 i_s가 흐르지 않는 영역에서는 구동 전압 V_{gs}가 발생되지 않기 때문에 제안된 SR 구동 회로는 DCM 영역에 매우 안정적이다.

4. 실험 결과

그림 3에 보여 지는 새로운 SR 구동회로를 이용한 CRM으로 동작하는 플라이백 컨버터의 하드웨어가 프로토타입이 이론적인 분석을 증명하기 위해서 구현되었다. 구현된 컨버터는 입력전압 90~265V에서 측정 되었고 가변 스위칭 주파수 제어방식에 의해서 출력전압을 제어하게 된다. 컨버터의 출력전압과 최대 부하는 5V와 100W이다. 변압기의 턴비는 9이고 최대 시비율은 0.47. 그리고 최소주파수는30Khz로 선택하였다. 그림 5 CRM으로 동작하는 전원모듈들이 균등한 부하분담이 가능하도록 Automatic Master/Slave 방식을 택한 Hot-Swap이 가능한 전원공급 장치를 나타낸 것이다.

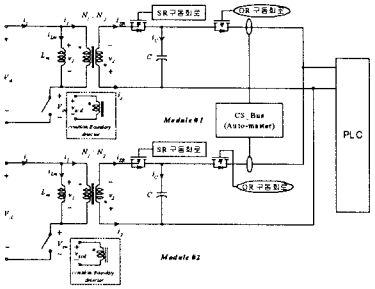
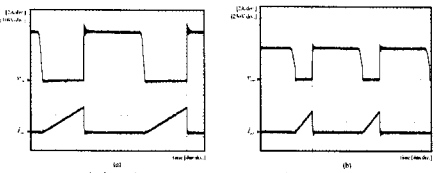


그림 5. Hot Swap이 가능한 PLC용 전원공급장치

상당히 많은 전류가 흐르는 곳에 불가피한 오링 다이오드의 존재는 효율감소의 주요 원인중 하나이다. 따라서 이 다이오드를 동기화된 스위치로 대치함으로써 효율 상승을 피할 수 있다.



(a) 120 V. (b) 230 V.

그림 6. 실험 파형 v_{SW} and i_{SW}.

그림 2-18은 입력측 스위치에 인가되는 전압과 출력측 스위치에 흐르는 전류파형을 나타낸 것이다. 2차측 스위치는 CRM 영역 동작으로 인해서 영전류 스위칭이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 그림 2-19는 모든 입력전압에서 1, 2차측 스위치에 인가된 전압과 2차측 SR 스위치 구동 파형이다.

(b) 120 V. (c) 230 V.

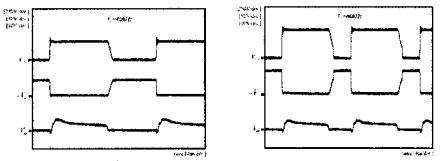
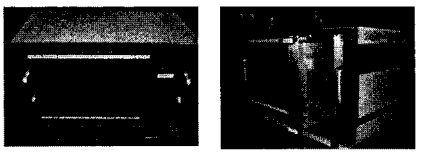


그림 7. 실험 파형 v_{sw}, V_{sr}, and Vgs.

이렇게 설계된 100W급 전원모듈은 제안하는 동기정류 구동회로와 최소전압에서 최소전압 턴온 스위칭하는 주파수 제어 방식을 이용함으로써 85%이상의 높은 효율을 얻을 수 있었다. 총 10개의 Power Module을 제작하여 그림2-20과 같이 Auto Master/Slave 전류분담 제어회로를 이용해 Hot-Swap이 가능한 고신뢰성 고효율의 PLC용 전원공급장치를 구현하였다.



5. 결론

본 논문에서는 SR 구동회로와 가변 주파수 Controller에 의한 최소전압 턴온스위칭기법을 이용하여 고효율의 dc-dc 컨버터가 제안되었다. 제안된 SR 구동 회로를 이용한 CRM 플라이백 컨버터가 상세하게 분석되었고 실험파형과 결과를 통해 높은 효율의 전원모듈을 확인하여 보았다. 전반적인 효율은 85% 이상이다. 그리고 10개의 고효율의 전원모듈을 auto master/slave 부하분담 기술을 이용하여 Hot-Swap이 가능한 안정적이고 신뢰성이 강한 고효율의 PLC용 전원장치를 구현하였다.

참 고 문 헌

[1] Y.Panov, J.Rajagopalan, and F.C.Lee, "Analysis and Design of N Parallel DC-DC Converters with Master-Slave Current- Sharing Control," APEC 1997 Record,pp436-42.

[2] J.G. Kassakian and D.J. Perreault, "An Assessment of Cellular Architectures for Large Converter System," First International Conference on Power Electronics and Motion Control, Beijing, 1994, pp.70-79

[3] Xunwei Zhou, Peng Xu and Fred C. Lee, "A High Power Density, High Efficiency and Fast Transient Voltage Regulator Module with a Novel Current Sharing Control Technique", VPEC seminar'99.

[4] Amir M. Rahimi, M. H. Alavi, M. R. Zolghadri, "A precise large signal model for a flyback converter in critical conduction mode," in *Proc. IEEE Power Electronics and Drive Systems conference*, vol.2, 2001, pp.22-25.

[5] C. Blake, D. Kinzer and P. wood, "Synchronous Rectifiers versus schottky diodes: a comparison of the losses of a synchronous rectifier versus the losses of a schottky diode rectifier," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference*, vol.1, 1994, pp.17-23.