

GPU용 3상 4선식 Split 커패시터형 인버터의 전압제어

조현길, 조현식, 차한주
충남대학교

Voltage Control of Split Capacitor Inverter for 3 Phase 4 Wired GPU

Hyeungil Jo, Hyunsik Jo, Hanju Cha
Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 400Hz 항공기용 3상 4선식 인버터의 전압 제어에 대해 연구하였다. 시스템에서 불평형이 발생하면 중성선 전류가 증가하며 이에 따라 출력전압 불균형 및 왜곡 증가 등 시스템에 심각한 문제를 발생시킨다. 전압의 크기를 제어해주는 RMS 제어의 경우 불평형 발생 시 전압의 크기는 정상적으로 제어가 가능하지만, THD가 상승하여 전력의 품질이 저하될 수 있다. 다른 제어 방식인 비례 공진(PR) 제어는 순시적으로 제어를 함으로써 전압의 크기뿐만 아니라 위상차 및 THD 감소 등의 향상된 전력 품질을 기대할 수 있다. 두 제어방법의 비교는 시뮬레이션 및 실험을 통해 수행하였으며, 두 제어방법 불평형 발생 시 모두 전압의 크기 오차가 3% 이하로 정상적으로 제어하는 것을 확인하였고, THD는 RMS 제어에 비하여 PR 제어의 결과가 2% 감소하는 것을 확인하였다.

1. 서론

현재 대부분의 군사용 또는 항공기용 전원 장치 Ground Power Unit(GPU)는 400Hz 전원으로 고품질의 전원이 요구된다. 기본파의 주파수가 400Hz로 계통 주파수에 비하여 높으므로 현재 효과적인 제어방법을 위하여 활발히 연구 중에 있다. RMS 제어 방법의 경우, 불평형 발생 시 각 상전압의 크기는 정상적으로 제어할 수 있지만, THD가 상승하여 고품질의 전력을 제어하기 어렵다. 그에 반하여, 순시적으로 제어가 가능한 PR 제어기를 사용하는 경우 불평형 발생 시 평형 부하와 같은 전력 품질의 유지를 기대할 수 있다^[1]. 본 논문에서는 GPU용 전원 장치 제어 방법으로 RMS 제어와 PR 제어를 비교하였으며 각 제어기의 성능은 시뮬레이션과 실험을 통하여 불평형 발생 시 각각의 전력 품질을 확인하였다.

2. GPU 제어 방법

2.1 Root Mean Square(RMS) 제어

그림 1은 항공기용 전원 장치의 구조를 보여주고 있다. GPU의 경우 3상 4선식을 사용하며, 중성점은 DC-Link 중간에 위치한다. 인버터와 부하 사이에 LC 필터가 있으며, 커패시터와 부하 간의 중성점은 DC-link의 중성점과 연결된다. 그림 2는 RMS 제어의 구조를 보여주고 있다. 각 상의 전압은 변압기

를 통하여 감압된 후 RMS로 변환된다. RMS 제어의 경우 복잡한 제어 기법이 필요 없이 각 상의 크기를 독립적으로 제어 가능하며, 400Hz 전원 시스템의 불평형, 비선형 부하와 같은 조건에서 안정적으로 크기를 제어할 수 있는 장점이 있다.

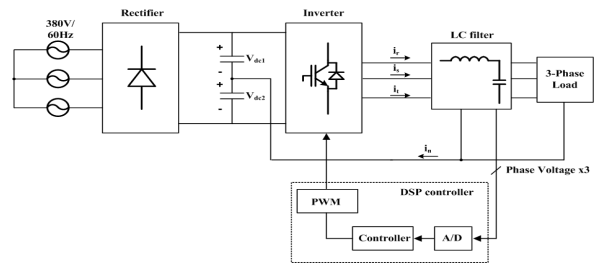


그림 1 항공기용 전원장치 구조

Fig 1. structure of ground power unit

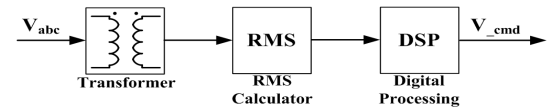


그림 2 RMS 제어 방식

Fig 2. RMS control method

2.2 Proportional-Resonant(PR) 제어

그림 3은 PR 제어기를 이용한 GPU 전압 제어 구조를 보여 준다. 제어 대상은 부하의 상전압이고, 기본파 제어를 위한 PR 제어기, 3 고조파 보상을 위한 R 제어기, 시스템 지연의 전달 함수는 s 도메인에서 각각 식 (1)-(3)으로 표현된다.

$$G_{PR}(s) = kp_{PR} + \frac{2ki_{PR}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2} \quad (1)$$

$$G_{R,3}(s) = \frac{2ki_{R,3}\omega_{c,3} s}{s^2 + 2\omega_{c,3} s + \omega_{n,3}^2} \quad (2)$$

$$G_d(s) = e^{-15 T_s s} \quad (3)$$

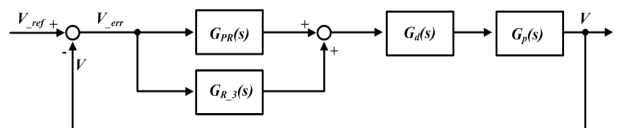


그림 3 PR 제어기 전압 제어 구조

Fig. 3 Block diagram of Voltage PR control

그림 3에서 G_p 는 플랜트 전달함수를 의미한다. 식 (1), (2)의 k_{PR} 은 PR 제어기 비례 이득, k_{iPR} 과 $k_{iR,3}$, ω_c 과 $\omega_{c,3}$, ω_n 과 $\omega_{n,3}$ 은 각각 PR 제어기와 R 제어기의 공진 이득, 제어기 대역폭, 공진 주파수를 의미한다. 식 (3)의 T_s 는 샘플링 주파수이며, 시스템 지연은 DSP 연산 및 PWM으로부터 발생하는 모든 지연 성분을 고려하였다. 그림 4는 PR 제어기 사용 시 GPU 시스템의 안정도를 확인하기 위하여 이산 영역에서 전체적인 제어 구조의 안정도 결과를 확인한 것이다. 근궤적 법으로 확인한 결과 공진 주파수의 지점 및 다른 극점들의 위치가 단위원 내에 존재하여 시스템이 안정하다는 것을 확인할 수 있다.

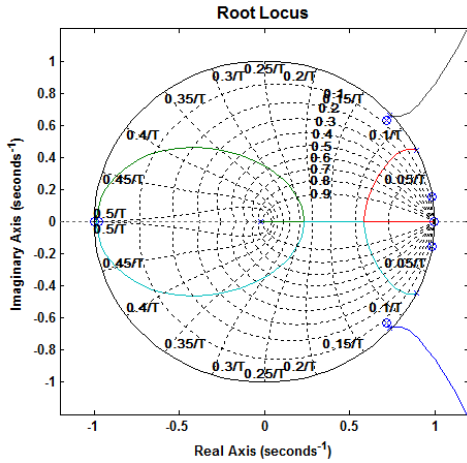


그림 4 근궤적법을 이용한 이산시간 안정도 해석
Fig. 4 Analysis of discrete time stability by root locus

3. 제어 방법 비교

RMS 제어 및 PR 제어기의 성능을 비교하기 위한 파라미터는 표 1과 같다. RMS, PR 제어 모두 동일한 GPU 시스템 구조에서 각 제어에 따라 평형 부하와 불평형 발생 시 상전압의 결과를 비교하였다. 부하의 조건은 평형 부하 시 각각 5kW이며 불평형 조건은 A 상 5kW, B, C 상은 무부하 상태이다. 그림 5는 PR 제어의 평형, 불평형 부하 조건에서 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 평형 부하는 전압의 크기가 115V로 제어되며, THD는 각각 2.8%, 2.8%, 2.3%로 모두 5% 이내로 출력되는 것을 확인하였다. 불평형 부하 조건에서 불평형이 심화된 A 상만 전압의 크기 오차가 3% 내에 있으며 나머지 상은 정상적으로 제어되고, THD는 각각 7%, 3.3%, 3.9%이다. 그림 6은 RMS 제어에서 부하 조건에 따른 상전압 실험 결과를 나타낸다. 평형 부하 조건에서는 크기는 정상적으로 제어되며 THD는 RMS 제어의 경우 각각 2.9%, 2.7%, 2.5%로 확인하였다. 불평형의 경우 크기는 정상적으로 제어가 되지만, THD가 각각 9.4%, 4.9%, 5.8%로 평형 부하에 비하여 상승 하는 것을 확인하였다. 각 부하조건에서의 RMS 제어 및 PR 제어의 상전압 및 선간전압의 제어 결과는 표2에 나타내었다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Parameter values of the simulation

기본주파수	400Hz	샘플링 주기	62.5μsec
상전압 RMS	115V	선간전압 RMS	200V
평형 부하	각 상 5kW	불평형 부하	A상 5kW

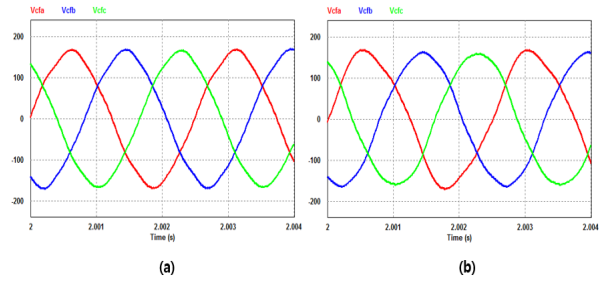


그림 5 부하 조건에 따른 PR 제어 시뮬레이션 결과
(a) 평형 부하 (b) 불평형 부하

Fig 5. PR control PSIM simulation result
(a) balanced load (b) unbalanced load

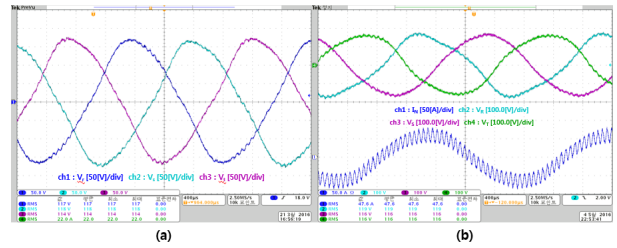


그림 6 부하 조건에 따른 RMS 제어 실험 결과
(a) 평형 부하 (b) 불평형 부하

Fig 6. RMS control experiment simulation result
(a) balanced load (b) unbalanced load

표 2 평형 부하 조건 시뮬레이션 결과
Table 2 Simulation result under load condition

부하 조건	평형 부하		불평형 부하	
	상전압	선간전압	상전압	선간전압
RMS 제어	$V_a = 115V$ $V_b = 115V$ $V_c = 116V$	$V_{ab} = 199V$ $V_{bc} = 199V$ $V_{ca} = 200V$	$V_a = 116V$ $V_b = 116V$ $V_c = 117V$	$V_{ab} = 198V$ $V_{bc} = 202V$ $V_{ca} = 206V$
PR 제어	$V_a = 115V$ $V_b = 115V$ $V_c = 115V$	$V_{ab} = 200V$ $V_{bc} = 200V$ $V_{ca} = 199V$	$V_a = 117V$ $V_b = 115V$ $V_c = 115V$	$V_{ab} = 202V$ $V_{bc} = 200V$ $V_{ca} = 200V$

4. 결론

본 논문에서는 400Hz GPU 시스템의 전압 제어를 연구하였다. GPU를 제어하기 위한 RMS 제어와 PR 제어 방법을 비교하였고, RMS 제어와 PR 제어의 성능을 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과 각 제어 방법 모두 부하 조건에 상관없이 크기의 오차가 3% 이내로 제어되는 것을 확인 하였다. THD는 평형 조건에서는 각각의 제어 방법 모두 5% 이내를 만족하였으며 불평형 조건에서는 PR 제어가 RMS 제어에 비하여 2% 감소하는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Zixin .Li, Yaohua Li, Ping Wang, Haibin Zhu, Congwei Liu, "Single-Loop Digital Control of High-Power 400-Hz Ground Power Unit for Airplanes", IEEE Journals & Magazines, Vol. 57, No. 2, pp. 532-543, 2010, February.