

단위역률 정류기의 병렬운전

이성희*, 김대원*, 박재욱**
 포항공업과학연구원*, (주)크라토프**

Parallel operation of rectifier with unit-power factor

Seung-Heui Lee*, Tae-Won-Kim*, Jae-Wook-Park**
 RIST*, Cratto**

Abstract - PWM(pulse width modulation) rectifier has unit power factor and low harmonic distortion with high power conversion efficiency in entire loading range. These merits of PWM rectifier help the spread of DC distribution system. In addition, if multiple PWM rectifiers can be operated in parallel connection, maintenance process can be simple and reliability of power source can be advanced because of the hot swapping is available. The other way, the load unbalance among rectifiers can force a converter to stop by over current. The surge current by closed circuit composition between rectifiers can force switching devices damage. In this paper, some problems that can occur in case of parallel operation of PWM rectifiers and problem eliminating methods are considered.

1. 서 론

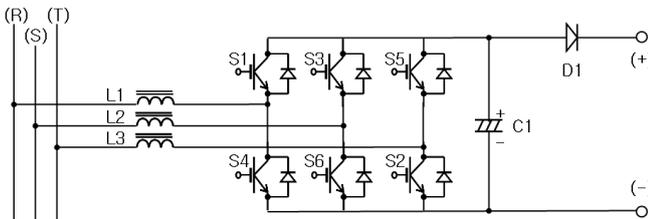
PWM 정류기로 표현되는 단위역률 정류기는 전 부하역역에서 단위역률을 유지하면서 고조파 함유율을 최소화하여, 모선 계통에 미치는 영향을 미치지 않음과 동시에 높은 전력변환 효율을 가지는 장점을 가진다. 이러한 단위역률 PWM 정류기는 직류배전 체계가 보급되는데 중요한 역할을 도모하고 있는데, 단위역률 PWM 정류기가 병렬 운전이 용이하다면 핫스와핑(hot swapping) 유지보수가 가능하여 전원 공급 안정성도 극대화시킬 수 있다.

본 논문에서는 단독 운전 가능 단위역률 정류기의 병렬 구동시 발생 가능한 부하 분배 불균형에 따른 단위모듈의 부하 분배율 편중, 정류기 간 폐회로 형성에 의한 서지 전류 발생 및 출력 전압 불안정화 등의 문제들을 살펴보고, 이들 문제점들에 대한 발생 원인과 문제점 해결 방안을 살펴본다.

2. 본 론

2.1 단위 역률 PWM 정류기의 병렬 운전

일반적으로 정류기는 정류 다이오드와 평활 커패시터를 이용한 고정 전압 정류기와 SCR를 이용하는 출력 가변형 정류기를 말한다. 이들 정류기들은 역률이 나쁘고, 고조파 함유율이 높을 뿐 아니라 효율이 낮은 문제점이 있다. 단위역률 PWM 정류기는 IGBT 또는 FET를 사용하여 구성되며 단위역률을 유지함은 물론이고, 고조파 함유율이 극히 낮고 효율이 높은 장점을 가진다. <그림 1>은 IGBT를 이용한 단독운전 단위역률 정류기의 구조를 나타낸다. <그림 1>에 나타난 PWM 정류기는 승압형으로 분류되는데, 입력 교류 전압의 첨두 값 보다 높은 출력 전압을 가진다.

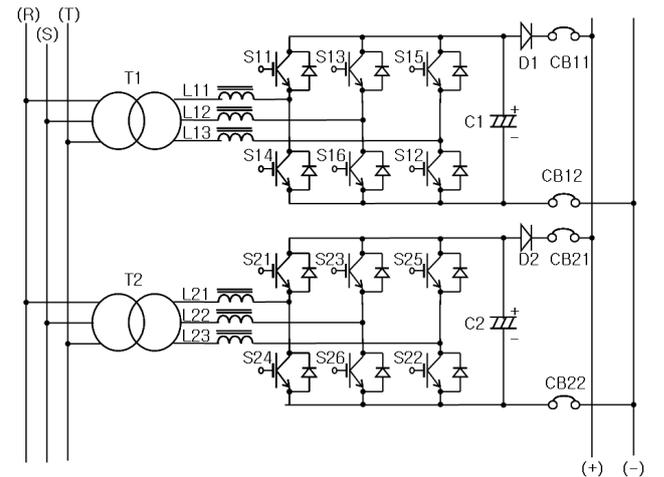


<그림 1> PWM 정류기의 구조

정류기가 병렬 운전되는 방법은 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 각 모듈의 스위칭 소자들이 하나의 제어기에 의해서 관계되어 동기 스위칭되는 방법이고, 두 번째는 각 모듈의 스위칭 소자들이 각각 독립된 제어기에 의해 스위칭 되는 방법이다. 첫 번째 방법은 안정적인 정류기 동작을 확보하기에는 유리하고, 병렬연결 모듈 간 순환되는 서지

전류도 방지할 수 있으나, 병렬연결 정류기 모듈들의 동기화 운용을 위한 결선 구조가 복잡하며, 핫스와핑 구현이 어렵다. 두 번째 방법은 병렬연결 정류기 모듈들의 동기화가 필요 없으므로 결선 구조가 복잡하지 않고, 핫스와핑 구현이 용이한 장점을 가지나, 병렬연결 정류기 모듈 간 순환 서지 전류가 발생할 수 있고, 부하 분배 균등화를 확보하기 힘든 문제점을 가지고 있다.

병렬연결 정류기 간 순환 서지 전류는, <그림 1>과 같은 정류기 모듈이 독립 제어기를 가지고 병렬 운전되는 경우, 평활 커패시터 C1 전압이 입력 전압과 더해져서 부하로 출력됨으로서 발생하는 현상인데, 이러한 서지 전류 발생을 방지하기 위해서는 <그림 2>와 같이 각 정류기의 입력 측에 절연 변압기를 배치하면 해결될 수 있다. 복권 절연 변압기는 병렬연결 모듈간 서지 전류를 방지하는 역할 외에도 승압형 PWM 정류기가 가지는 출력 전압의 하한점 문제를 해결하는 역할을 가진다.



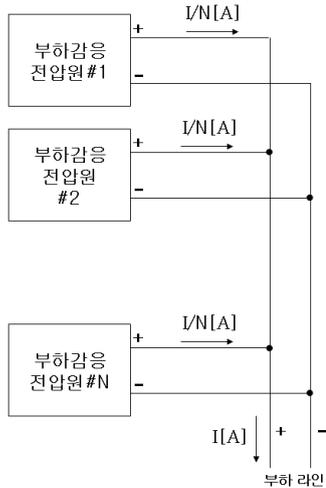
<그림 2> 변압기 이용 PWM 정류기의 병렬운전 구조

2.2 단위역률 정류기의 부하 분배 균등화

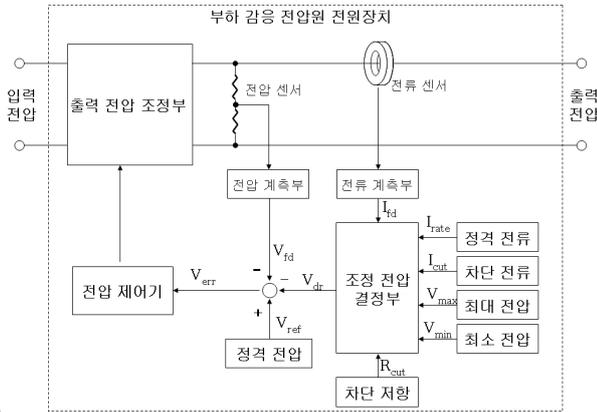
독립 제어기를 가지는 PWM 정류기가 고정 전압 출력을 가지고 병렬 연결되어 운전되는 경우 출력 전압에 오차를 가질 수밖에 없으므로 부하율 불균일은 반드시 발생한다. 개별 PWM 정류기 모듈이, 부하전류에 따라 출력 전압을 변동시키는, 부하감응 전압원 정류기로 동작한다면 부하율 균등화가 쉽게 확보될 수 있다. <그림 3>은 개별 제어기에 의해 독립적으로 동작하는 부하감응 전압원의 병렬연결을 표현하였고, <그림 4>는 각 부하감응 전압원 정류기의 내부 제어 구조를 표현하였다.

각 정류기 모듈은 별도의 제어기를 가지는데, 상수로 정해지는 정격 전류 I_{rate} , 차단 전류 I_{cut} , 최대 전압 V_{max} , 최소 전압 V_{min} , 정격 전압 V_{ref} 등을 가지고, 계측 값으로 출력 전압 V_{fd} , 출력 전류 I_{fd} 를 가지는데, <그림 5>에 나타난 바와 같은 연산에 의해서 출력 강하 조정 전압 V_{dr} 를 결정하여 전압제어기를 운용하는 구조를 가진다. 이상적으로 평가하자면 부하전류가 정격의 50%일 때 정격전압 V_{ref} 의 값으로 출력 전압이 조정되고, 부하율이 정격대비 50% 미만으로 낮아지면 출력 전압을 높이는데, 부하가 완전히 사라지면 최대 전압 V_{max} 만큼 높아진다. 부하율이 정격대비 50% 이상으로 높아지면 출력 전압을 낮추는데, 부하율이 100%에 도달하면 최소 전압 V_{min} 만큼 낮아진다. 이러한 동작은 정류기 출력단에 저항을 삽입한 경우와 동일한 동작 구조를 가진다. 만약 부하율이 100%를 초과하여 출력 전류가 차단 전류 I_{cut} 에 도달하면 출력단 삽입 저항이 하나 더 추가되는 구조의 동작을 가져서, 출력 전압을 급격히 낮추게 된다. 이는 과부하 상황에서 정류기 보호와 동

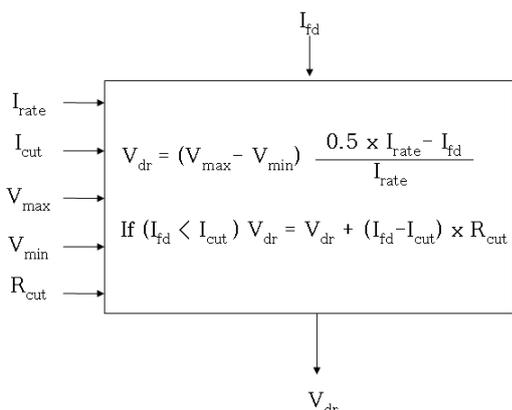
시에 전류 공급이 갑자기 끊어져서 발생할 수 있는 불의의 사고를 방지하기 위함인데, 상수값인 차단저항 R_{cut} 값이 높으면 전압 강하가 크고 과전류 허용율이 낮으며, 차단 저항 R_{cut} 값이 낮으면 전압강하가 작고 과전류 허용율이 높아진다.



〈그림 3〉 부하감응 전압원의 병렬 연결



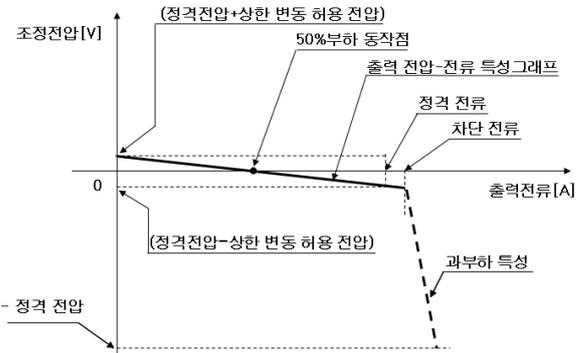
〈그림 4〉 부하감응 전압원 정류기의 제어 구조



〈그림 5〉 부하감응 전압원 정류기의 출력 전압 연산 블록

〈그림 6〉은 부하감응 전압원 정류기의 동작 특성 그래프를 나타낸 것이다. 가로축은 출력 전류이고 세로축은 출력 강하 조정 전압 V_{dr} 의 값이다. 출력 강하 조정 값이 0인 경우는 50% 부하율인 경우이고, 부하율이 낮아지면 강하 조정 전압이 양으로 높아지고, 부하율이 높아지면 출력 강하 조정 전압이 음으로 높아진다. 부하율이 높아져 출력 전류가 차단 전류 I_{cut} 를 초과하면 출력 강하 조정 전압은 음으로 급격히 커져서 결국 정류기의 출력 전압을 급격히 낮추게 되고 강하 전압의 크기가 정류기 출력 전압 정격 값과 같아지게 되면 정류기의 출력 전압이

아주 낮아진다. 설계에 있어서 상한 및 하한 변동 허용 전압 값은 정격 전압의 2-3% 정도로 정하고, 차단 전류 I_{cut} 값은 정격 전류 값의 110-120%로 정하고, 차단 저항 값 R_{cut} 은 부하율이 135%를 초과하지 않도록 설정하는데, 부하 특성 및 스위칭 소자의 정격을 고려하여 정한다.



〈그림 6〉 부하감응 전압원 정류기의 동작 특성 그래프

2.3 실험 및 결과

독립 제어를 가지는 단위역률 PWM 정류기의 병렬운전 실험은, 〈그림 2〉에 도시한 바와 같은 구조로, 입력측에 복권 절연변압기를 사용하였고, 310V 출력에 10kW 정격을 가지는 PWM 정류기 모듈 3개를 사용하고, 0-15kW 부하를 변동시키며 수행되었다.

단일 모듈에서 0-10kW 부하 테스트를 실시하여 출력 전압이 무부하에서 320V가 출력전압을 가지고, 5kW부하에서 정격 전압 310V를 가지고, 10kW부하에서 300V 출력을 가지도록 각각을 튜닝한 다음, 병렬 운전 상태에서 각 모듈의 전류 값을 모니터링하였다.

실험 결과에 따르면, 실험 초기에 최대 18%가량의 부하 분배율 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 제어가 출력 전압 및 전류를 계속하는데 발생하는 오차와 전압제어의 성능에 따른 결과로 분석되었고, 제어기 내부 계측 값의 보정을 통해 부하율 오차 5%이하로 쉽게 낮출 수 있었다. 핫스와핑은 2개의 정류기 모듈이 10kW부하로 동작하는 상황에서 한 모듈을 제거하는 상황과 다른 모듈이 투입되는 상황을 테스트 하였고, 3개의 모듈이 15kW 부하로 동작하는 상황에서 한 모듈이 제거되었다가 투입되는 상황을 테스트 하였다. 이 모든 상황에서 부하 분배율은 5% 미만의 편차를 가지고 동작했으며, 전압 변동율은 설계 값에서 벗어나지 않음을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

직류 배전 시스템은, 전산부하와 같은 무정전 특성이 요구되는 설비에 배터리와 함께 공급된다면, 에너지 절감 및 전원 공급 신뢰성 증대에 유용한 것으로 알려져 있다. 단위역률 PWM 정류기 모듈의 병렬운전은 전원 용량 증대가 자유롭고, 단위 모듈 핫스와핑 가능으로 유지보수가 용이한 특성을 가지는 반면, 병렬 운전되는 단위 모듈 간 부하 분배 균등화 및 순환 서지 전류 발생 가능성에 대한 대비가 필요하다.

본 논문에서는 부하감응 전압원에 의한 부하 분배 균등화 방안과 병렬연결 모듈 간 순환 전류 생성 억제 방안에 대해서 고찰하였다. 부하감응 전압원은 부하율이 높아지면 전압을 낮추는 기능을 가지므로 전압 변동을 동반하는 문제점을 가지고 있다. 하지만 3% 정도의 출력 전압변동이 부하에 미치는 영향이 없으므로 이 방법이 병렬 운전에 유효하리라 판단된다. 향후에는 직류 배전 체계의 확대 보급을 위한 직류 배전 계통의 지락 감지 및 대응 방안에 대해 고찰할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이현원, 장성영, 김연준, 이광주, "IGCT를 이용한 단상 PWM 정류기 병렬운전", 전력전자학회논문지 제5권 제1호, pp.11-18, 2000
- [2] 박병건, 현동식, "고속철도용 단상 PWM 컨버터의 병렬운전을 위한 개선된 전압제어", 전력전자학회논문지 제15권 제3호, pp.226-234, 2010
- [3] 박성우, 박희성, 장진백(Jin-Beak Jang), 장성수, 이종인, "병렬운전 컨버터의 리플 저감을 위한 제어방법에 대한 연구", '06 한국조명전기설비학회 추계학술대회논문집, pp.2299-302, 2006