

고압인버터 병렬운전 시스템 개발

박종제, 윤홍민, 장동제
LS산전 A&D 연구소

Parallel Operation of Medium Voltage Drive System

Jong-Je Park, Hong-Min Yun, Dong-Jae Jang
LSIS A&D R&D Center

ABSTRACT

최근 산업계에 적용되는 인버터의 경우 그 용량이 수MVA에서 수십MVA에 이르기까지 그 시스템이 점차 고압 대용화되어가는 추세이다. 단일 인버터로 용량을 확대하기 위해서는 적용 가능한 Power소자의 한계가 있을 뿐 아니라 제품개발 기간과 제품라인업의 효율성을 증대하기 위해 기존의 인버터를 이용한 병렬운전 방법이 보다 효과적일 수 있다. 고압인버터의 병렬 운전을 위해서는 두 단위 인버터의 출력전압이 그 크기와 위상이 동일해야 하고 그에 따라 동일한 출력전류가 병렬 리액터를 거쳐 모터로 유입되어야 한다. 본 논문에서는 실제 6600V 5MVA 인버터 2Set를 병렬 시스템으로 구성하였으며 인버터 출력전압 동기 알고리즘을 구현하고 그 타당성을 시험을 통해 검증하였다.

1. 서론

유가상승과 그에 따른 전기료의 상승으로 인해 산업용 모터에 인버터를 적용하여 에너지를 절감하고자 하는 사례가 늘어나고 있다. 특히 고압모터의 경우 인버터 적용으로 인한 전기료 절감액이 저압모터에 비해 상대적으로 높기 때문에 고압인버터에 대한 수요가 갈수록 증가하고 있는 추세이다. 하지만 10 MVA이상의 대용량 고압인버터의 경우 Power부 설계 시 전력 반도체 소자의 전압, 전류 용량의 제한과 시스템의 발열문제로 인해 단일 시스템 설계가 쉽지 않다. 이를 해결하기 위해 대용량 고압인버터 단독으로 용량을 확장시키기보다 병렬시스템 구조를 선택하는 것이 개발기간 단축 및 개발비용 절감을 위한 좋은 대안이 될 수 있다. 고압인버터의 병렬운전을 위해서는 기술적으로 출력전압을 동기화시키기 위한 알고리즘과 출력전압의 동기가 맞지 않을 경우 생길 수 있는 순환전류를 제한할 수 있는 출력 리액터가 필요하다^{[1][2]}. 본 논문에서는 Cascaded H-Bridge(CHB) 고압인버터의 병렬시스템 구조와 출력단 결합 리액터의(Coupled Reactor) 선정기준 그리고 동기알고리즘에 대해 설명하고 실제 10MVA 병렬인버터 설계 및 운전 사례를 통해 병렬운전기술의 타당성을 확인하였다.

2. 고압인버터 병렬 시스템

2.1 시스템 구조

그림 1.은 병렬 인버터 시스템의 단상 개념도를 나타낸다. CHB 타입의 고압인버터 2Set가 출력단 리액터를 공유하여 모터에 결선이 되고 결합 리액터는 별도의 판넬에 구성된다.

2.2 결합 리액터

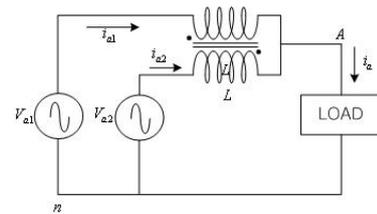


그림 1. 병렬 인버터 시스템 구성(단상)

인버터 병렬운전 시 출력전압의 크기와 위상 오차로 인한 순환전류 크기를 제한하기 위해 리액터 설치가 필수적이다. 하지만 시스템의 출력에 일반 리액터를 설치할 경우 출력전압 강하문제가 발생하여 원하는 출력을 얻기 어렵기 때문에 정상상태 시 리액터 전압강하를 최소화 할 수 있는 결합 리액터를 사용한다. 결합 리액터는 그림 2와 같이 하나의 코어에 두 개의 권선을 감아 구성된다. 결합 리액터 양단에 흐르는 전류 I_a , I_b 의 방향이 서로 반대인 경우 전체 인덕턴스는 자기 인덕턴스 (L_a , L_b)와 상호 인덕턴스(L_m)의 합으로 나타나기 때문에 실제 큰 인덕턴스 성분으로 작용하여 순시적인 전압차에 의한 순환전류를 억제한다. 하지만 전류의 방향이 서로 같을 경우 전체 인덕턴스가 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 차의 형태로 나타나기 때문에 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 값이 유사하다면 결합 리액터 양단에 걸리는 전압은 무시될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 정상상태에서 전류의 방향이 같고 순시적인 전압차가 없다면 인덕턴스에 의한 전압강하는 발생하지 않는다. 식(1)은 각각의 리액터에 걸리는 전압을 기본과 성분과 스위칭에 의한 리플 성분으로 나타낸다. 이 식에서 각 인버터의 기본과 전압은 동일하고 부하측 전류는 두 대의 인버터에서 흐르는 전류의 합과 같으며 극전압의 리플 성분은 부하전압 리플 성분의 절반이라고 가정하면 결합 리액터의 기본과 전압강하는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다. (여기서, 자기 인덕턴스 L_a , L_b 는 $L_a=L_b=L$, 상호 인덕턴스 L_m 은 $L_m=M$)

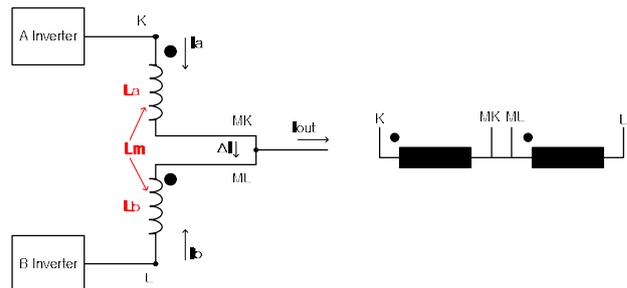


그림 2. 병렬인버터용 결합 리액터

$$\bar{V}_{a1n} + \bar{V}_{a1n} - (\bar{V}_{An} + \bar{V}_{An}) = L \left(\frac{d\bar{i}_{a1}}{dt} + \frac{d\bar{i}_{a1}}{dt} \right) - M \left(\frac{d\bar{i}_{a2}}{dt} + \frac{d\bar{i}_{a2}}{dt} \right) \quad (1)$$

$$\bar{V}_{a2n} + \bar{V}_{a2n} - (\bar{V}_{An} + \bar{V}_{An}) = L \left(\frac{d\bar{i}_{a2}}{dt} + \frac{d\bar{i}_{a2}}{dt} \right) - M \left(\frac{d\bar{i}_{a1}}{dt} + \frac{d\bar{i}_{a1}}{dt} \right)$$

$$\bar{V}_{a1n} - \bar{V}_{An} = \frac{L-M}{2} \frac{d\bar{i}_a}{dt} \quad (2)$$

2.3 병렬운전 알고리즘의 필요성

순환전류는 두 인버터 간 출력전압의 크기오차와 동기오차에 의해 발생한다. 이러한 순환전류는 단위 인버터의 전류 불평형으로 인한 Overcurrent Trip 및 Overvoltage Trip을 유발하여 시스템의 신뢰성을 떨어뜨린다.

2.3.1 동기 보상 알고리즘

두 인버터 간 출력전압의 크기오차는 근본적으로 DC_Link 전압의 오차에서 비롯된다. 따라서 전압오차를 최소화하기 위해서는 각 Power Cell의 DC_Link 전압을 일정하게 유지해야 한다. 개별 Cell 제어기는 각 Cell에서 검출한 DC_Link 전압과 Master 제어기에서 보내는 지령전압 정보를 이용하여 실제 DC_Link 전압이 Reference 전압에 대한 허용오차범위를 벗어나지 않도록 제어한다.

2.3.2 동기보상알고리즘

인버터의 출력전압은 PWM 과정을 거쳐 만들어지기 때문에 시간에 대한 dv/dt 특성을 가지고 있다. 동기오차가 발생하였을 때 출력전압오차는 오차시간 동안 DC_Link 전압의 배수 형태로 나타난다. 따라서 병렬운전의 경우 각 인버터의 출력 전압을 동기화시키는 것은 매우 중요하다. 하나의 Master 제어기는 매 주기마다 복수의 Cell 제어기로 동기 신호를 전송하고 전송 후 다시 Cell 제어기로부터 데이터를 수신한다. Cell 제어기는 내부타이머 인터럽트를 이용하여 PWM 동기를 맞춘다. 현재 PWM 카운터레지스터 값을 체크하고 층별 Reference 값과의 차이를 연산한 다음 연산된 PWM 오차는 Counter Modulo 레지스터 값을 증가 또는 감소하여 동기를 유지하게 된다.

3. 시험결과

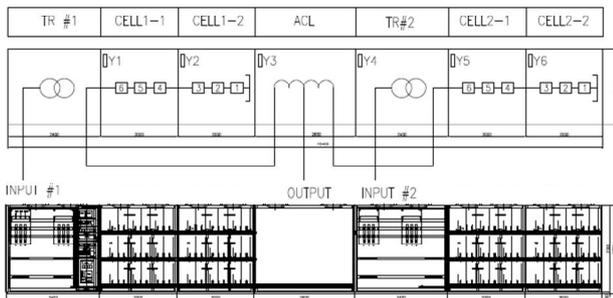


그림 3. 10MVA 고압인버터 병렬시스템 구성도면

Table .1 10MVA 병렬 시스템 시험 조건

병렬 시스템 Spec.	6600V/800A
개별 인버터 Spec.	6600V/437A (CHB Type)
병렬 리액터	6600V (Coupled Reactor)
적용 모터	6600V/600kW

시험은 실제 6600V 800A 병렬 시스템에서 실시 하였다. Test 시료는 Table 1과 같이 5MVA 고압인버터 2Set를 결합 리액터를 이용하여 병렬 시스템으로 구성하였다. 그림3.은 실제 10MVA 병렬 시스템의 구조도를 나타낸다. (좌측부터) 판넬1에서 3까지 인버터A, 판넬4는 결합 리액터, 판넬5에서 7까지 인버터B로 구성된다. 그림4.는 Master Controller와 두 인버터 각각의 Cell Controller사이의 CAN TX/RX 신호를 나타내고 있다. 동기 알고리즘을 적용하여 실제 동기오차가 1usec 이하로 매우 양호한 것을 확인 할 수 있다.

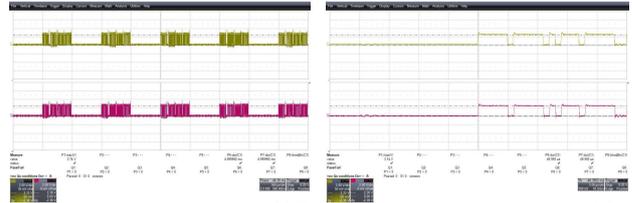


그림 4. CAN 통신 동기파형

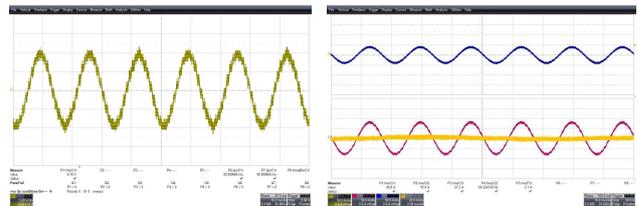


그림 5. 6600V 10MVA 시스템 출력전압 및 전류 파형

그림5.의 왼쪽파형은 병렬 인버터 시스템의 선간 전압 파형을 나타내며(60Hz 6600V) 오른쪽 파형은 출력전압에 대한 병렬인버터 시스템의 출력전류를 나타낸다. Ch1(노랑): Inv1, Ch3(파랑): Inv2. 붉은색의 Ch3파형은 최종 출력전류이다. F1(주황) 파형은 Inv_A전류 - Inv_B 전류로써 두 전류의 오차가 2A이하로 병렬운전이 매우 잘 되고 있음을 보여 준다.

4. 결론

본 논문에서는 고압인버터의 병렬시스템 구성과 관련하여 결합 리액터의 용량산정기준과 출력전압동기를 위한 동기 알고리즘에 대해 기술하였다. 산정된 결합 리액터와 5MVA 단위 인버터 2Set를 이용하여 실제 10MVA 병렬시스템으로 제작 하여 모든 실험을 진행하였다. 정격속도에서의 동기오차는 1usec이하로 매우 양호하였고 실제 전압오차도 5%내로 확인되었다. 따라서 자사 병렬운전에 대한 기술이 실제 제품화 되는데 크게 문제가 없을 것으로 판단하고 있으며 실제 10MVA 제품 또한 현재 출하 후 운전 중에 있다.

참고 문헌

- [1] Rodriguez, J.; Lai, J.-S. & Peng, F. Z. "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications" Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2002, 49, 724-738.
- [2] 조운관(Un-Kwan Cho).; 임정식(Jung-sik Yim).& 설승기(Seung-Ki Sul). "초고속 및 대용량 전동기 구동을 위한 PWM 인버터 병렬운전에 관한 연구" 전력전자학회, 전력전자학회논문지, 제15권 제3호 2010.6, page(s): 244-251