

백투백 컨버터를 이용한 교류전기철도의 전력 불평형 현상 분석

송승리, 우제훈, 조종민, 차한주
 충남대학교 전기공학과

Power imbalance analysis of AC electric railway using back-to-back converter

Shengli Song, Jehun Woo, Jongmin Jo, Hanju Cha
 Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 단상 전기철도 시스템의 불평형 부하 특성으로 인한 3상 계통의 전력 불평형을 보상하기 위해 백투백 컨버터를 적용하였으며, 실험을 통해 전력 불평형 성능 개선 특성을 검증하였다. 3상 전압은 스코트 변압기를 통해 2개의 M-T상 전압으로 출력되며, 전력 불평형 개선을 위해 적용된 백투백 컨버터는 DC 링크를 공유하며 각각 M-T상에 연계된다. 백투백 컨버터는 M-T상에 연계된 부하용량 차이에 따른 불평형 조건에 관계없이 M상과 T상 계통 라인에 동일한 전력이 공급되도록 제어하는 역할을 수행하며, 제어 알고리즘은 동기좌표계에서 구현하였다. 백투백 컨버터의 프로토타입은 3레벨 NPC 컨버터로 설계하였으며, M상 5kW, T상 1kW 부하에서 전력보상장치가 동작하고 있음에도 완전히 해결되지 않은 불평형 현상에 대해 분석한다.

1. 서론

지금 우리의 전기철도 운행은 동력비를 절감시키는 것은 물론 매연 및 소음 발생을 현저히 감소시켜 환경개선에도 큰 몫을 하고 있다. 2012년 말 기준으로 전기철도가 운행하는 구간은 KTX를 포함하여 총 2522.4km에 달하여, 철도의 총운행 거리인 3650.1km의 69.1%를 차지한다.

전기철도는 전기를 동력으로 동작하며, 국내의 교류전기철도 시스템은 급전 안정성을 확보하기 위해서 3상 교류 전원을 수전받아 단상의 교류 전원으로 변환하여 철도차량의 전원으로 공급하고 있다. 철도차량의 단상 동작에 따른 3상 계통에서의 불평형을 최소화하기 위하여 스코트 변압기를 주 변압기로 적용하고 있지만 불평형이 해소되지 못하는 부분이 있어 외국에서는 전력보상장치를 상용화해서 사용하고 있다. 컨버터의 동작상 완전한 불평형 해소가 어려움에 따라 보상장치 동작에도 불구하고 불평형이 발생하는 원인을 분석하고 대안에 대한 연구가 필요하다^[1].

2. 교류전기철도 실험 구성 및 분석

2.1 교류전기철도 실험 구성

그림 1은 교류전기철도에 전력보상장치가 부착된 구성이다. 3상 계통 전압은 스코트 변압기를 통해 2개의 단상 전압(Main

상, Teaser상)으로 출력된다. 단상측과 부하측 사이에 전력보상장치를 구성하여 연결하여 부하측에 흐르는 전력이 다르더라도 단상측에 흐르는 전력은 동일하게 유지시킨다^[2].

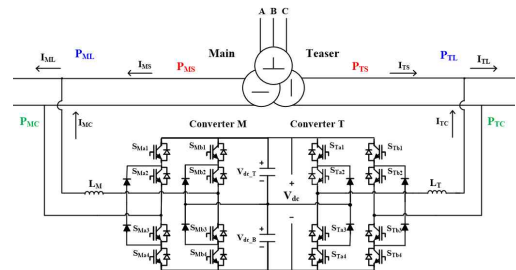


그림 1 교류전기철도 실험 구성
 Fig. 1 Construction of AC electric railway experiment

2.2 DC 링크 전압 제어

전력보상장치는 여러 제어를 통해 동작한다. 그림 2는 백투백 컨버터 구성상 DC 링크 커패시터가 요구되는데 안정적인 제어를 하기 위해서는 전압 유지를 위해 DC 링크 전압 제어가 필요하다.

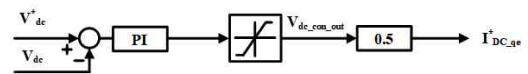


그림 2 전압 제어기 블록도
 Fig. 2 Block diagram of voltage controller

2.3 전력 제어

전력은 동기 좌표계인 d-q축 상에서 PI 제어기를 이용해 제어하게 되며, 단상 시스템이기 때문에 APF (All Pass Filter)를 사용하여 90° 지연된 q축을 만들고 이를 회전좌표 변환을 통해 d-q축 상에서 제어한다.

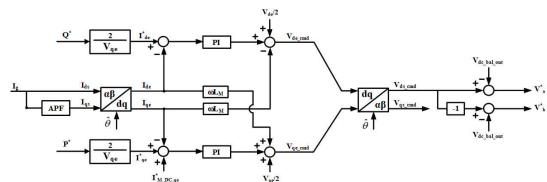


그림 3 전력 제어 블록도
 Fig. 3 Block diagram of power control

3. 불평형 문제에 대해 분석

그림 4처럼 M상 5kW, T상 1kW (M상 부하 9.3Ω, T상 부하 50Ω)의 RPC 모드 상태에서 전력보상장치가 동작하고 있음에도 완전히 해결되지 않은 불평형 결과가 나타난다.

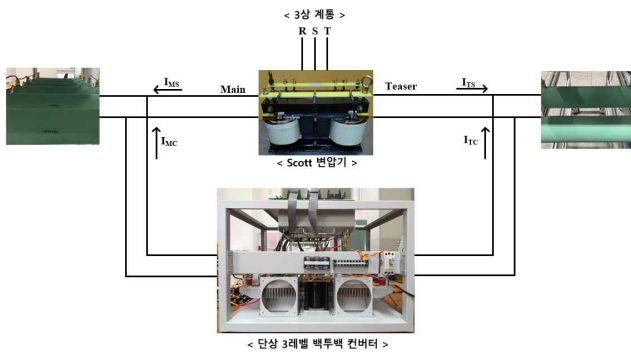


그림 4 시스템 구성
Fig. 4 System configuration

3.1 DC 링크 전압 제어기

본 실험에서 전압 제어는 DC 링크를 500V로 유지해주는 부분으로 M상 전류 지령치 식 (1)과 T상 전류 지령치 식 (2)를 비교하면 두 부분에서 각각 전압 제어기 출력을 절반씩 더해준다. 본 실험에서 M상 출력은 +2kW, T상 출력은 -2kW로 전류 지령치는 M상의 경우 -13.6A, T상의 경우 +13.6A로 양의 값을 갖는 전압 제어기 출력은 M상에 있어 지령치의 감소를 T상에 있어 지령치의 증가를 유발하며, 이는 전류 불평형을 발생시킨다.

$$I_{M.ref} = 2 \times P_M / VM_{peak} \quad (1)$$

$$I_{T.ref} = 2 \times P_T / VT_{peak} \quad (2)$$

표 1 Main상, Teaser상 전압 전류 RMS값
Table 1 Main-phase, Teaser-phaser Voltage and RMS current

VM	VT	IM	IT	PM	PT
207V	208V	-9.46A	10.3A	1958W	2142W

3.2 스코트 변압기

위에 표 1과 같이 M상과 T상의 전류값이 평형 상태가 되지 않기 때문에 1차측에서 또한 전류의 불평형이 발생한다. 이는 M상 전류 식 (3), T상 전류 식 (4)을 통해 나타난다.

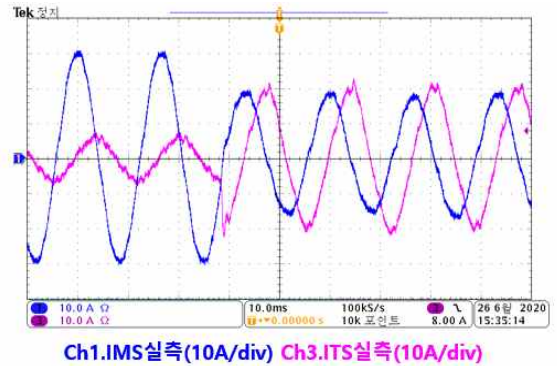
$$I_{1M} = \frac{\left[I_A \times \left(\frac{N}{n} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - I_B \times \left(\frac{N}{n} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right]}{2} \quad (3)$$

$$I_{1T} = I_C \times \left(\frac{N}{n} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (4)$$

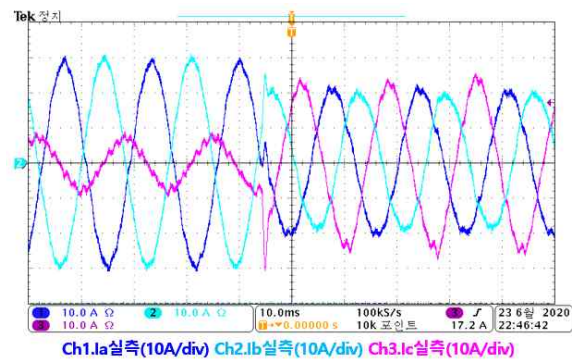
3.3 전류제어

그림 5 (a), (b)는 각각 단상 계통 전류, 3상 전류의 전력보상장치 동작 전·후의 변화를 보여주는 파형이다.

표 2는 3상 전류의 값을 나타내며, 제어를 통해 불평형을 보상하지만, Ia와 Ic의 전류 차이가 있는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 5 전력보상장치 동작 (a) 단상 계통측 전류, (b) 3상 전류

Fig. 5 Power compensation operation (a) Single phase system side current, (b) Three phase current

표 2 3상 전류 RMS값
Table 2 3-phase current RMS current

	Ia	Ib	Ic
제어 전	19.6A	21.9A	5.01A
제어 후	12.3A	14.3	15.6A

4. 결론

본 논문은 교류전기철도의 M, T상의 불평형 부하로 인해 야기되는 3상 계통전류의 불평형 원인에 대해 분석하였으며, 전력보상장치를 적용하였음에도 여전히 남아있는 전력 불평형 현상에 대해 연구하였다. 이는 전력보상장치를 구성하는 스코트변압기와 제어 특성에 따라 발생하며, 스코트 변압기의 %임피던스 차이에 의해 Main상과 Teaser상에 발생하는 전압차, DC링크 밸런스를 위한 제어동작, 센서 측정 오차, 저주파 스위칭에 따른 샘플링 오차에 의한 원인 등이 있으며, 이를 시뮬레이션과 실험으로 확인하였다.

참고 문헌

- [1] J. C. Kim, Feeding System Analysis and Understanding of Korean Railway Electricity, Gidari, 2008.
- [2] K. Shishime, "Practical Application of the Railway Static Power Conditioner (RPC) for Conventional Railways," Meiden Review, Series No. 156, No. 3 pp. 38-41, 2012