

교류전기철도 불평형 전력 개선을 위한 전력보상장치 제어

우제훈, 이정현, 조종민, 차한주
 충남대학교 전기공학과

Power Compensator Control for Improving Unbalanced Power of AC Electric Railway

Jehun Woo, Jeonghyeon Lee, Jongmin Jo, Hanju Cha
 Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 교류전기철도의 불평형 부하로 인해 야기되는 3상 계통 전력의 불평형 특성을 저감하기 위한 제어 알고리즘을 제안하였으며, 전력보상장치 설계 및 이를 적용한 실험을 통해 성능을 검증하였다. 전기철도 시스템과 동일하게 3상 전압을 2개의 단상 전압으로 변환하는 스코트 변압기를 적용하였으며, M상과 T상 출력단에 부하 및 3레벨 백투백 컨버터가 연계되어 구성된다. 백투백 컨버터는 M, T상의 불평형 부하 간 발생하는 유효전력의 차이를 실시간으로 감시하고 양방향 특성을 이용해 전력을 보상하는 역할을 수행한다. 백투백 컨버터의 유효전력은 동기좌표계 PI 제어를 통해 수행되며, DC 링크 전압 및 밸런싱 제어는 시스템의 응답성 향상을 위해 M, T상 컨버터가 공동으로 분담하여 제어한다. 제안된 전력보상장치의 성능 확인을 위해 M상 5kW, T상 1kW 불평형 부하가 연계된 조건에서 시뮬레이션 및 실험을 진행하였으며, 실험 결과 전력보상장치의 동작 후 3상 전류의 불평형률이 65.04%에서 6.38%로 58.66% 저감되는 것을 통해 본 논문에서 제안하는 전력보상장치의 우수한 성능을 검증하였다.

1. 서론

국내 교류 전기철도는 3상의 전력을 수전 받아 스코트 변압기를 이용하여 2개의 단상으로 변환하여 공급하고 상행 및 하행 열차에 급전하여 운행하는 방식이다. 전기철도차량이 운행되면 스코트 변압기의 출력인 두 개의 단상중 한 쪽의 부하가 급격히 증가하여 단상 부하간의 전력 불평형이 발생하며, 그로 인해 3상의 전력공급시스템에서 전력 불평형이 발생하게 된다. 이처럼 불평형이 발생하면 전력계통의 품질이 저하되며 진동기, 변압기 등의 주요 기기들의 성능 저하로 이어지게 된다.

스코트 변압기는 3상 전원측 불평형을 해소하여 전력품질을 유지하기 위해 1970년대에 국내 산업선에 처음 도입되어 철도 급전시스템에 폭넓게 사용되고 있으나 현재의 철도환경에서는 스코트 변압기만으로는 전력 불평형을 해소할 수 없다. 때문에 해외에서는 2000년대 초반부터 이미 전력품질 개선을 위한 연구가 진행되어 전력보상장치를 개발하여 전력품질을 유지하고 있지만 국내에는 관련 연구 실적이 미흡한 상태이다.^[1]

2. 전력보상장치 시스템 구성 및 제어

2.1 전력보상장치 시스템 구성

그림 1은 전기철도 시스템과 동일하게 구성된 전력보상장치의 시스템을 보여주는 것으로 3상 계통 전압은 스코트 변압기를 통해 2개의 단상 전압으로 출력되며, 각각의 단상 출력 전압에 부하측과 컨버터측이 병렬로 연결되어 있다. 전력보상장치인 단상 3레벨 백투백 컨버터는 M, T상의 컨버터와 공통 DC 링크 커패시터, 각각의 L필터로 구성된다.

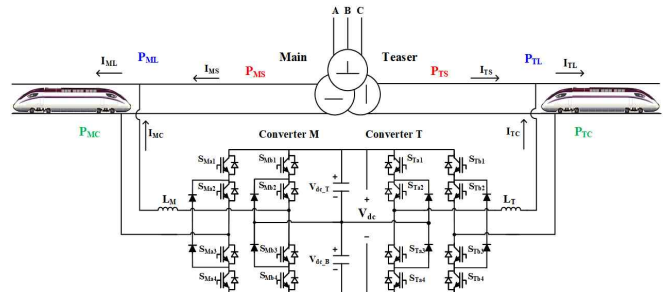


그림 1 전력보상장치 시스템 구성
 Fig. 1 Configuration of power compensator system

2.2 전력보상장치 시스템 제어

전력보상장치의 제어 기법으로는 DC 링크 전압 제어 및 전압 밸런싱 제어, 유효전력 제어 등이 있으며, 유효전력 보상을 통한 불평형 전력보상 제어기법을 제안한다.

2.2.1 DC 링크 전압 제어

본 논문에서 구성한 전력보상장치 시스템은 전압원이 없는 백투백 구조이기 때문에 공통 DC 링크 커패시터의 전압을 유지하기 위해서는 전압 제어가 필요하다. 그림 2는 전압 제어기의 구조를 나타낸다. 전압 제어기는 전압 지령치와 피드백 전압간의 오차를 입력하여 PI 제어를 통해 전압을 유지하기 위한 출력을 얻는다. 전압 제어기의 출력은 이후 유효전력 전류 제어 성분인 q 축 전류 지령치와 더해져 전류 제어기에 의해 DC 링크 전압을 일정하게 유지하며, 시스템의 다이내믹 응답 특성의 향상을 위해 M상과 T상 컨버터가 절반씩 공동으로 분담하여 제어한다.

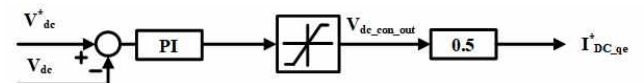


그림 2 전압 제어기 블럭도
 Fig. 2 Block diagram of voltage controller

2.2.2 DC 링크 전압 밸런싱 제어

전력보상장치 시스템은 3레벨 컨버터로 구성되기 때문에 DC 링크 커패시터가 상단부와 하단부로 나누어진 3레벨의 특성상 DC 링크의 상단부와 하단부 전압의 평형을 유지하여 주는 전압 밸런싱 제어가 필요하다. 그림 3은 전압 밸런싱 제어기의 구조를 나타내며 전압 제어와 마찬가지로 M상과 T상 컨버터가 절반씩 공동으로 분담하여 제어한다.

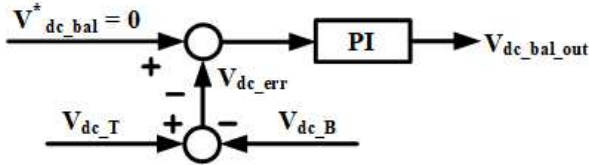


그림 3 전압 밸런싱 제어기 블록도
Fig. 3 Block diagram of voltage balancing controller

2.2.3 전력 제어

그림 4는 전력 제어의 전체적인 제어 블록도를 나타내고 있다. 전력은 동기 좌표계인 d-q축 상에서 PI 제어를 이용해 제어하게 되며, 단상 시스템이기 때문에 APF(All Pass Filter)를 사용하여 90° 지연된 q축을 만들고 이를 회전좌표변환을 통해 d-q축 상에서 제어한다.

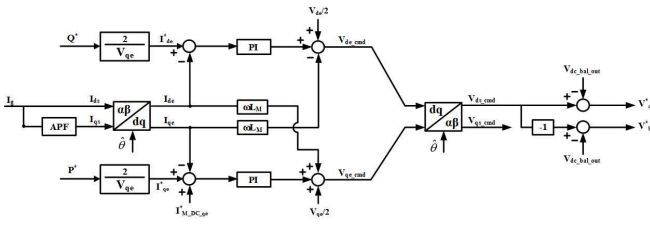


그림 4 전력 제어 블록도
Fig. 4 Block diagram of power control

2.2.4 불평형 전력 보상 제어 기법

M, T상 부하측에서 부하용량이 다른 전력이 요구될 경우 스코트 변압기의 2차측에서는 서로 다른 전력이 흐르게 되며, 이는 1차측인 3상에서의 불평형 문제를 야기한다. M, T상의 불평형 부하간 발생하는 유효전력의 차이를 보상하여 단상 및 3상 계통의 불평형을 해결하기 위한 방법으로 불평형 전력보상 제어기법을 사용하였다. 그림 5는 불평형 전력보상 제어기법의 개념을 보여주는 것으로 M, T상의 부하측 유효전력 P_{ML}, P_{TL} 차이의 절반을 백투백 컨버터의 양방향 특성을 이용해 보상하며, 전력 보상의 방향성은 각 상의 부하측 유효전력의 크기에 의해 결정된다. 상대적으로 부하가 작은 측의 계통 소스에서 전력보상장치를 거쳐 부하가 큰 측으로 전력을 보상하는 방식이다. 이처럼 동작할 경우 부하측에서 불평형 전력이 요구됨에도 불구하고 단상 계통 소스단에서 공급하는 전력의 크기는 양측 부하가 요구하는 총 유효 전력의 절반으로 같아지며, 따라서 3상 계통 소스단의 불평형도 해소된다.

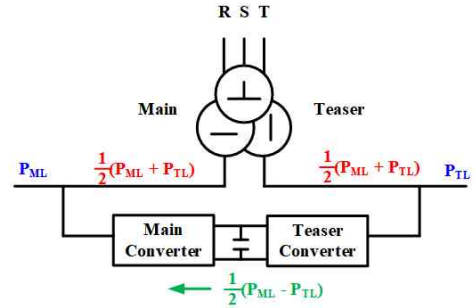


그림 5 불평형 전력보상 제어기법 개념도
Fig. 5 Conceptual diagram of unbalanced power compensation control method

2.3 시뮬레이션 결과

그림 6은 PSIM 시뮬레이션의 구성을 보여주는 것으로 스코트 변압기 1차측에 3상 계통이 공급되어 2차측으로 2개의 단상 계통이 출력되며, M, T상 각각에 부하측과 컨버터측이 병렬로 연결되어 있는 구조이다. 부하는 M상 5kW, T상 1kW의 저항 부하이다.

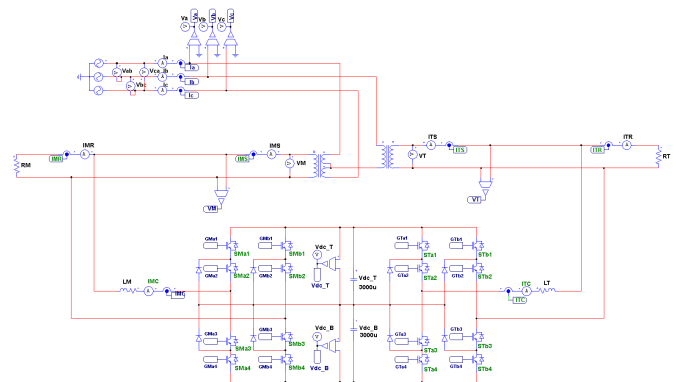
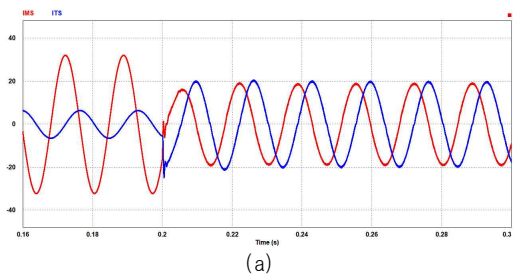


그림 6 전력보상장치 시스템 시뮬레이션 회로
Fig. 6 Simulation circuit of power compensator system

그림 7 (a), (b), (c)는 각각 단상 소스단 전류, 컨버터 출력 전류, 3상 전류의 전력보상장치 동작 전·후의 변화를 보여주는 시뮬레이션 파형이다. 0.2초 이전까지는 부하의 요구 전력이 불평형이며, 전력보상장치인 단상 3레벨 백투백 컨버터가 동작하지 않기 때문에 (a)의 소스단 전류가 불평형이고 그에 따라 (c)의 3상 전류 또한 불평형 상태이다. 그러나 0.2초를 기준으로 전력보상장치가 동작하여 M, T상 유효전력 차이의 절반만큼 (b)의 컨버터 출력 전류가 흐르고 (a)의 소스단의 전류가 평형 상태가 되며, 그에 따라 (c)의 3상 전류가 불평형에서 평형으로 변화하는 것을 볼 수 있다.



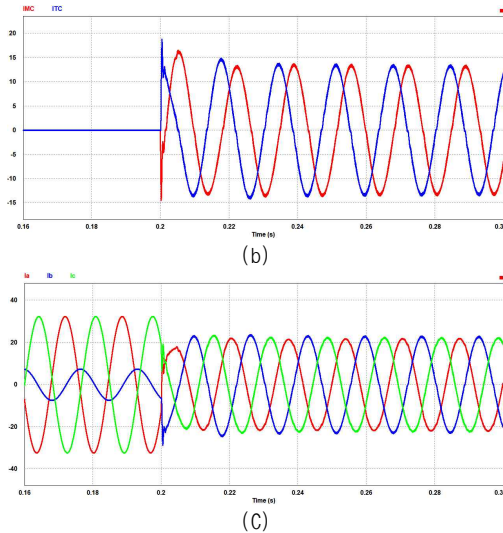


그림 7 시뮬레이션 결과 (a) 단상 소스단 전류 (b) 컨버터 출력 전류 (c) 3상 전류
 Fig. 7 Simulation results (a) Single-phase source current (b) Converter output current (c) Three-phase current

2.4 실험 결과

그림 8은 전체적인 하드웨어의 구성을 나타내는 것으로 시뮬레이션을 바탕으로 하드웨어를 구성하였다. 부하는 시뮬레이션과 동일하게 M상 5kW, T상 1kW로 설정하였고, 전력보상장치는 직접 설계한 단상 3레벨 백투백 컨버터 스택을 사용하여 실험하였다.

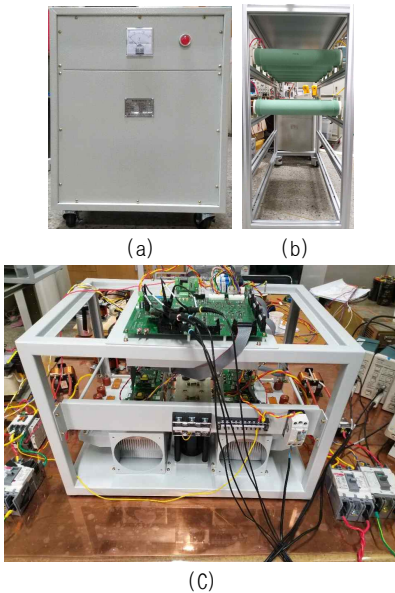


그림 8 실험 시스템 구성 (a) 스코트 변압기 (b) 부하 장치 (c) 단상 3레벨 백투백 컨버터 스택
 Fig. 8 Configuration of experimental system (a) Scott transformer (b) Load bank (c) Single-phase 3-level back-to-back converter

그림 9 (a), (b), (c)는 실험 결과 파형으로 각각 단상 소스단 전류, 컨버터 출력 전류, 3상 전류의 전력보상장치 동작 전-후의 변화를 보여준다. 불평형 전력보상 제어기법을 적용하여 M, T상 유효전력 차이의 절반에 해당하는 전력이 전력보상장치에 의해 T상의 소스단에서 M상의 부하단으로 보내지고 단상 소

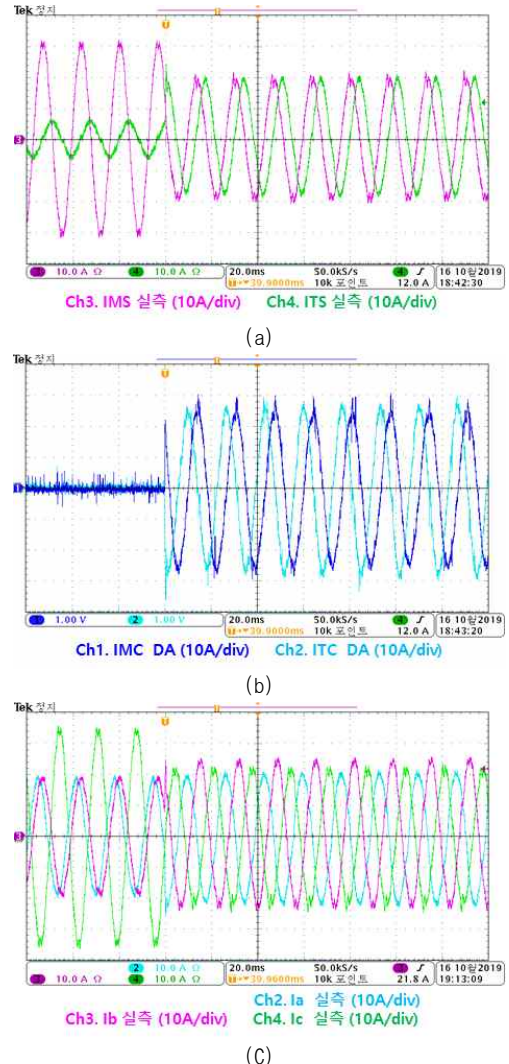


그림 9 실험 결과 (a) 단상 소스단 전류 (b) 컨버터 출력 전류 (c) 3상 전류
 Fig. 9 Experimental results (a) Single-phase source current (b) Converter output current (c) Three-phase current

스단의 전류가 평형이 되며, 3상 전류의 불평형률도 65.04%에서 6.38%로 58.66%가 저감되는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문은 교류전기철도의 불평형 부하로 인해 야기되는 3상 계통 전류의 불평형 특성을 저감하기 위한 불평형 전력보상 제어기법을 제안하였으며, 전력보상장치 설계 및 이를 적용한 실험을 통해 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 범인철, 최성수, 백송이, 교류철도 전력품질 개선기술. 한국철도학회 학술발표대회논문집, (), 248-249.
- [2] Koichi Shishime, Practical Application of the Railway Static Power Conditioner (RPC) for Conventional Railways, Meden Review(Series No.516), pp. 38-41.