

# 교류 전기철도 전원의 불평형을 향상을 위한 모델예측기법 연구

이정현, 조종민, 신창훈, 차한주  
충남대학교 전기공학과

## A Study on a Model Predictive Control to Improve the Imbalance of AC Electric Railway Power

Junghyun Lee, Jongmin Jo, Changhoon Shin, Hanju Cha  
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

### ABSTRACT

본 논문은 부하의 유동성이 큰 철도 시스템의 특성으로 발생하는 전력 불평형을 개선하기 위해 전력보상장치의 전력품질 및 안정도 향상을 위한 기법을 제안하였다. 철도 부하의 경우 3상의 전력을 공급받아 스코트 변압기를 통해 2개의 단상 선로 M, T상에 공급해주는 형식으로 이때 2개의 단상 측에서 서로 다른 부하가 발생할 경우 3상측에서 불평형이 발생한다. 스위칭 과정에서 발생하는 전력손실 감소를 위해 600Hz의 낮은 스위칭 주파수를 이용하며, 전력품질 및 안정도 향상을 위해 12kHz의 샘플링 주파수를 이용하여 샘플링과 제어간의 오차를 감소시켰으며, 빠른 응답성을 갖는 모델예측제어를 제안하였다. 위와 같은 내용을 실험을 통해 전력보상장치의 전류 불평형률을 4.46%까지 감소시켰으며, 불평형을 60Hz 한주기 내에 해결하는 빠른 응답성을 검증하였다.

### 1. 서 론

국내 전기철도는 154kV 교류전압을 급전받아 스코트 변압기를 통해 55kV 단상 전압을 생성하여 철도에 적용하고 있으며, 단상에서 철도가 소모하는 부하는 기동 시 전력을 소모하고, 제동 시 전력을 회생하는 방식을 취하고 있다. 이는 스코트 변압기의 2차측인 Main상과 Teaser상에 있어 전력의 급증 또는 급감을 유발하고 이러한 현상은 스코트 변압기의 1차측인 3상 전력공급시스템에서 불평형을 발생시킨다.

3상 불평형은 전력공급시스템의 품질 저하로 이어지며 이는 표 1과 같이 전원 측 발전기의 출력 저하와 기계적 진동의 원인이 되고 전동기의 출력감소, 회전기 등의 과열을 유발한다<sup>[1]</sup>.

국내 송배전용 전기설비 이용규정의 송전용 전기설비 성능기준에 의거하면 전압불평형률은 3% 이내로 제한하고 있다<sup>[2]</sup>.

표 1 3상 전압 불평형으로 인한 유도 전동기의 영향  
Table 1 Negative effects of 3-phase voltage unbalance on induction motors

Voltage Asymmetry	I <sup>2</sup> R Losses (% total)	Reduction of Motor Efficiency	Motor Lifetime
0%	30%	-	20years
1%	33%	0.5%	10years
5%	45%	5% or More	1yeaser

또한 전기설비기술기준의 판단기준인 제 267조(전압 불평형에 의한 장애방지)에 따르면 교류식 전기철도는 그 단상 부하에 의한 전압 불평형의 허용한도는 교류식 전기철도 변전소의 변압기 결선방식에 따라 식 (1)에 의거하여 계산하며 그 변전소의 수전점에서 3% 이하로 규정하고 있다<sup>[3]</sup>.

$$K = Z(P_A - P_B) \times 10^{-4} \quad (1)$$

*K*: 백분율로 표시한 전압불평형률  
*Z*: 변전소의 수전점에서의 3상 전원계통의 10,000kVA를 기준으로 하는 퍼센트 임피던스 또는 퍼센트 리액턴스  
*P<sub>A</sub>, P<sub>B</sub>*: 각각의 전기철도용 급전구역에서의 연속 2시간 평균부하(kVA를 단위로 한다)

대용량 시스템의 경우 전력 손실로 인한 발열 문제를 무시할 수 없다. IGBT 모듈의 전력손실은 도통손실과 스위칭 손실로 나타낼 수 있는데 도통손실의 경우 사용 환경에 따라 정해지는 부분이라 감소가 어렵지만 스위칭 손실의 경우 식 (2)와 같이 IGBT내에서 발생하는 손실과 식 (3)과 같이 FWD(Free Wheeling Diode)에 의해서 발생하는 손실이 있다. 위 식을 보면  $f_{sw}$ 에 해당하는 인버터의 스위칭 주파수에 비례하는 것을 알 수 있으며, 대용량 시스템인 철도 내에서 발생하는 손실을 저감하기 위해서  $f_{sw}$ 에 해당하는 스위칭 주파수를 감소시키며 인티리브하는 방법이 있다.

$$P_{IGBT_{sw}} = \frac{1}{\pi} f_{sw} \cdot (E_{on} + E_{off}) \quad (2)$$

$$P_{Diode_{sw}} = \frac{1}{\pi} f_{sw} E_{rec} \cdot (0.45 \frac{\hat{i}}{I_{nom}} + 0.55) \cdot \frac{V_{dc}}{V_{nom}} \quad (3)$$

$f_{sw}$ : 인버터의 스위칭주파수  
 $E_{on}, E_{off}$ : 스위칭시 발생하는 에너지손실  
 $E_{rec}$ : 다이오드가 회복될 때 발생하는 에너지손실  
 $V_{dc}$ : 입력전압  
 $V_{nom}, I_{nom}$ : 정격전압, 정격 전류

전력보상장치는 5MVA의 대용량에서의 적용을 목표로 하며, 전력품질 및 안정도 향상을 위해 Optimal Switching Sequence - Model Predictive Control (MPC)를 적용하는 연구를 수행하였다<sup>[4]</sup>.

## 2. 전력보상장치의 구성 및 제어

### 2.1 전력보상장치의 구성

그림 1은 Back To Back 컨버터를 활용하여 전기철도용 전력보상장치의 구성도를 나타낸다. 전력보상장치의 동작의 경우 Main상과 Teaser상에서 소모하는 전력을 측정하며, 각상 부하가 소모하는 전력을 식 (4)와 식 (5)를 이용, 컨버터 측에서 보상하는 전력을 계산한다. 식 (6)을 통해 두 개의 단상에 동일한 전력을 맞추므로 3상 계통측의 불평형을 해소한다<sup>[5]</sup>.

$$P_{MC} = \frac{1}{2}(P_{ML} - P_{TL}) \quad (4)$$

$$P_{TC} = -\frac{1}{2}(P_{ML} - P_{TL}) \quad (5)$$

$$P_{MS} = P_{TS} = \frac{1}{2}(P_{ML} + P_{TL}) \quad (6)$$

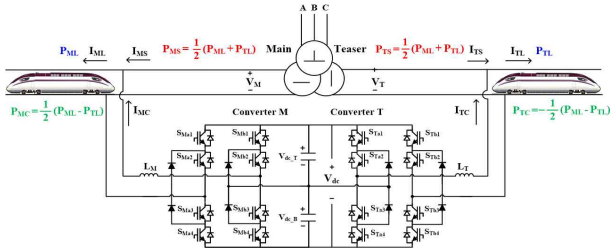


그림 1 Back to back 컨버터를 이용한 전력보상장치  
Fig. 1 Power compensation system using back to back converter

### 2.2 낮은 스위칭 주파수 보상

낮은 스위칭 주파수에 있어 부하가 급변하는 철도 시스템에 빠른 응답성이 필요하다. 따라서 그림 2와 같이 스위칭 주파수 600Hz보다 20배 빠른 12kHz에 해당하는 샘플링 주파수를 이용한다. 이는 PLL(Phase Locked Loop)에 있어 강인한 특성을 보이며, 제어기 동작에 있어 1-step delay를 보상한다. 스위칭 한주기 동안 제어기가 2번 동작함에 따라 낮은 스위칭에서 도 스위칭 파형의 보정이 가능하다.

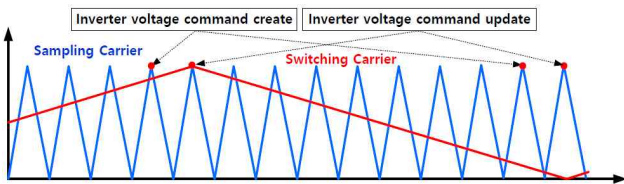


그림 2 낮은 스위칭 주파수 보상 기법  
Fig. 2 Method for Low Switching frequency compensation

### 2.3 최적화된 스위칭 시퀀스 모델 예측 제어

그림 3은 모델 예측제어의 기본 개념을 보여준다. 모델 예측 제어는 현재 전류  $i_s$ 에서 전류 지령치  $i_s^*$ 를 추종하기 위해 인버터의 출력 전압  $v_{ab}$ 를 통해 전류 기울기  $f_i$ 를 전압 방정식은 식 (7)에 나타나있다.

$$f_i = \frac{di_s}{dt} = -\frac{1}{L}(v_s + ri_s - v_{ab}) \quad (7)$$

전류의 기울기를 이용해서  $t_1$ 과  $t_2$ 는 각각 식 (8), 식(9)에 나타나 있다. 이는  $t_3 = t_1$ 과 동일하다고 가정한다.

$$t_1 = \frac{(i_s^* - i_s) - f_{i,2} T_s}{(f_{i,1} - 2f_{i,2} + f_{i,3})} \quad (8)$$

$$t_2 = T_s - 2t_1 \quad (9)$$

식 (7) ~ 식 (9)와 오차 계산식 (10)을 이용해  $v_{ab}$ 에 따른 오차를 추종, 이를 통해 오차가 적은 스위칭을 결정한다.<sup>[6]</sup>

$$(i_s^* - i_s) - (f_{i,1} - f_{i,3})t_1 - (f_{i,2} - f_{i,3})t_2 - f_{i,3}T_s = 0 \quad (10)$$

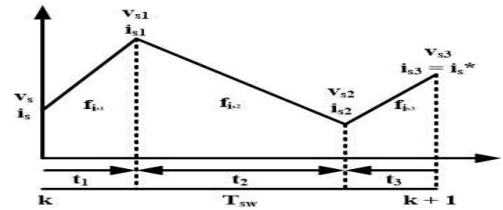


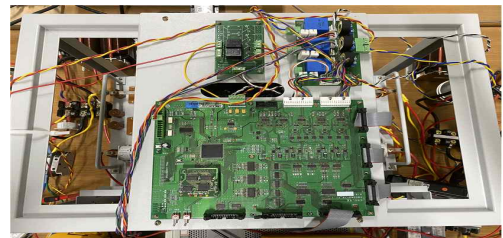
그림 3 인버터 출력 전압에 따른 전류의 예측  
Fig. 3 Current prediction according to inverter output voltage

## 3. 실험 결과

그림 4는 전체적인 하드웨어 구성을 나타낸 것이다. 하드웨어 구성은 5kW와 1kW에 해당하는 부하 बैं크와 3상 220V를 2개의 단상 220V로 만들어주는 스코트 변압기, 단상 3-Level Back To Back 컨버터로 구성되어 있다.



(a) (b)



(c)

그림 4 실험 시스템 구성 (a) 스코트 변압기 (b) 부하 बैं크 (c) 단상 3레벨 Back To Back 컨버터

Fig. 4 Configuration of experimental system (a) Scott transformer (b) Load bank (c) Single-phase 3-level back-to-back converter

그림 5는 MPC 제어기를 이용한 RPC 동작에 따른 전체적인 전류 파형이다. 그림 5(a)의 경우 부하 단에 5kW와 1kW에 해

당하는 전력을 공급하는 내용이다. 그림 5(b)의 경우 RPC 모드의 동작 전후에 대한 컨버터의 출력 전류이며, RPC 모드의 동작 전 파형의 경우 DC-Link의 전압을 300V에서 500V까지 충전 전류 파형이다. 그림 5(c)의 경우 RPC 모드의 동작 전의 경우 각 부하단 전류와 컨버터의 전류가 합쳐져서 전류가 흐르며 Main측 소스의 전류와 Teaser측 소스의 전류가 큰 차이를 보이거나 RPC 모드의 동작 후에는 Main측과 Teaser측에 흐르는 전류의 크기에 있어 평형을 맞추는 것을 확인할 수 있다.

표 2 시스템 파라미터  
Table 2 System Parameters

구분	크기
M상, T상 부하 전력	5000[W], 1000[W]
계통전압	220[V], 60[Hz]
Switching 주파수	600Hz
Sampling 주파수	12kHz
Filter L	7.50[mH]

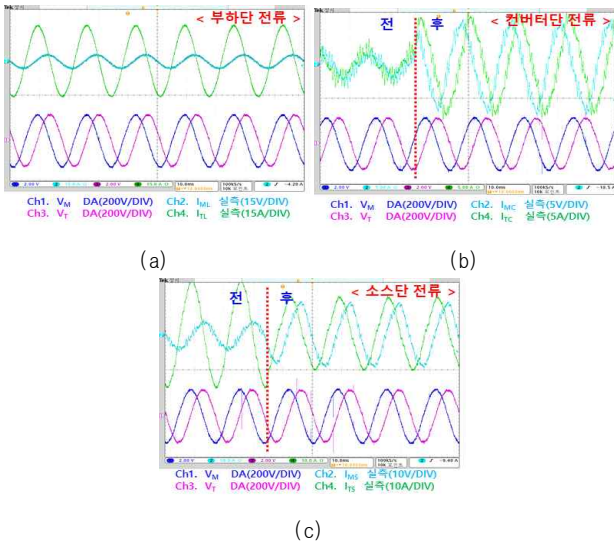


그림 5 전력보상장치 동작 (a) 부하단 전류 (b) 컨버터단 전류 (c) 소스단 전류

Fig. 5 Power compensation device operation (a) Load Current (b) Converter Current (c) Source Current

그림 6은 MPC 제어의 동기 좌표계 제어 및 3상 전류 파형이다. 그림 6(a)은 전류의 지령치와 전류를 동기좌표계에서 비교한 결과로서 부하를 스텝 형식으로 인가하였으며, 그 결과 지령치를 추종하는데 있어 빠른 응답성을 확인할 수 있다. 또한 그림 (b)는 제어기 동작 전후에 따른 3상 계통 전류를 써, 3상 계통 전류 또한 빠른 속도로 평형상태에 도달함을 알 수 있다.

전체적인 3상 측 전류 불평형률을 식 (11)과 같이 구한 결과는 표 3에 있으며, 제어기를 통해 전류 불평형률 개선에 있어 효과가 있음을 확인할 수 있다.

$$CUF = \frac{3[\max(|I_a|, |I_b|, |I_c|) - \min(|I_a|, |I_b|, |I_c|)]}{(|I_a| + |I_b| + |I_c|)} * 100 \quad (11)$$

표 3 전류 불평형률 비교

Table 3 Current unbalance rate comparison

제어기	전류 불평형률
전력보상장치 동작 전	108.94%
MPC 제어기	4.46%

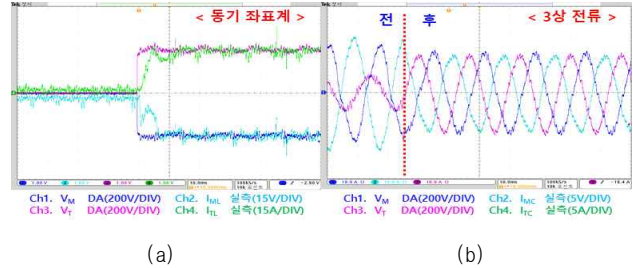


그림 6 제어기 성능 비교 (a) 동기 좌표계 MPC 제어기 (b) 3상 전류 MPC 제어기

Fig. 6 Controller performance comparison (a) Synchronous coordinate MPC-Control (b) 3-Phase current MPC-Control

## 4. 결론

본 논문은 교류 전기철도에서 발생하는 불평형 부하로 인해 3상 계통 전류의 불평형이 발생하는 부분을 개선하기 위해 대용량 전력보상장치의 600Hz 스위칭 주파수를 갖는 모델예측제어기를 설계하였다. 5kW와 1kW 부하를 인가하여 실험을 통해 3상 전류가 60Hz 한주기 내 평형 상태에 도달함으로써 모델예측제어의 응답성을 검증하였고, 제어기가 정상상태에 도달했을 때, 3상 측 전류 불평형률이 108.94%에서 4.46%로 감소하는 성능을 검증하였다.

## 참고 문헌

- [1] M. H. Albadi, A. S. Al Hinai, A. H. Al-Badi, M. S. Al Riyami, S. M. Al Hinai, and R. S. Al Abri, "Unbalance in power system: Case study," in 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), p. 1409, Mar. 2015
- [2] KEPCO, "송·배전용전기설비 이용규정", pp. 49, 2016
- [3] 국가법령정보센터, "전기설비기술기준의 판단기준", pp. 255, 2019
- [4] 범인철, 최성수, 백송이, 교류철도 전력품질 개선기술. 한국철도학회 학술발표대회논문집, 248-249.
- [5] Koichi Shishime, Practical Application of the Railway Static Power Conditioner (RPC) for Conventional Railways, Meden Review(Series No.516), pp. 38-41.
- [6] Yang Xingwu, Ji Hongchao, Gan Wei, "Model predictive control of single phase grid-connected inverter", 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2014