

진보된 단상 PLL 제어방법을 이용한 8200호대 전기기관차 보조전원장치용 컨버터 제어

Converter Control for APU of 8200 Series Electric Locomotive using Advanced Single Phase PLL Control Method

정 노 건* · 이 을 재** · 김 재 문*
(No-Geon Jung · Eul-Jae Lee · Jae-Moon Kim)

Abstract - The APF (All Pass Filter) method that utilizes the computational power of the controller is most commonly used. However, since the calculation of the filter coefficient is complicated, the calculation is carried out in advance. It is difficult to apply it to the frequency fluctuation environment because the coefficient value is fixed.

In this paper, a new control method of single phase PLL that can be usefully used in PWM converter device for electric railway was explained. Comparison and examination of similarities and differences between the conventional APF method PLL controller method and the newly proposed modified MA filter method PLL technique were performed. The possibility of implementation of the modified MA filter method through computer simulation was analyzed. In conclusion, the method proposed as the conclusion was applied to the APU(Auxiliary Power System) of 8200 Series Electric Locomotive and its usefulness was confirmed.

Key Words : PWM converter, APF, PLL, MA filter

1. 서 론

해외에서 도입되어 운행 중인 철도차량은 기술의 발달과 부품에 대한 단종 등으로 인해 유지보수 비용은 증가하는 추세이다. 따라서 철도차량의 노후화에 따른 철도차량의 주요 전력변환장치인 추진제어장치 및 보조전원장치에 대해 최신 기술을 적용한 시스템 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 특히 승객 및 화물을 수송하고 있는 8200호대 전기기관차인 경우 유지보수 비용 증가로 신뢰성 및 가용성 등을 기반으로 핵심기술을 확보하기 위해 전력용 반도체 소자 및 진보된 제어기술을 적용한 국산화 개발을 추진하고 있다.

8200호대 전기기관차에 설치되어 운영 중인 보조전원장치인 경우 단상 PWM 컨버터가 적용되고 있다. 단상 교류전원을 이용한 전기철도 PWM 컨버터 장치는 입력전원의 주파수, 전압 및 위상을 연속적으로 추적하기 위한 PLL (Phase Locked Loop) 장치가 필수적으로 필요하다.

교류컨버터는 입력전원의 주파수 및 위상 정보가 필요 하며 정

상상태는 물론 왜란의 영향에서도 정확한 정보의 추출이 매우 중요하다. 이에 따라 대부분의 교류컨버터에서 PLL (Phase Locked Loop) 방식을 이용하여 교류 정보 획득하여 입력 전압과 전류를 동상으로 만들기 위한 제어를 수행한다. PLL을 구현하는 방식은 Zero 검출, 필터 이용 등 여러 가지 방법이 있는데 3상에서는 축 변환기법(DQ 변환) 및 보상기를 이용하여 비교적 쉽게 구현 가능하다. 하지만 단상에서는 축 변환기법의 적용이 쉽지 않다. 이를 위해 단상 축 변환기법을 위한 LPF(Low Pass Filter), APF(All Pass Filter) 등 다양한 방법이 적용되고 있다. 제어기의 연산 능력을 활용한 APF 방식이 가장 일반적으로 사용 중에 있다. 하지만 필터 계수의 연산이 복잡하여 대부분 연산에 의해 미리 계산을 진행하지만, 계수값이 고정되어 주파수 변동 환경 등에서는 적용이 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 새로운 DQ 변환 방식의 PLL 제어방법 제안하고 분석하였다. 또한 이에 대한 타당성을 분석하기 위하여 8200대 전기기관차 보조전원장치의 컨버터를 모델링하였으며 새로운 방식의 PLL 제어방법을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 8200호대 전기기관차 보조전원장치

8200대 전기기관차의 전력변환장치는 크게 컨버터와 인버터로 이루어진 전력변환장치와 견인전동기인 유도전동기, 제어시스

† Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea

E-mail: goldmoon@ut.ac.kr

* Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

** E-Kyoung Systems Co., Ltd.

Received : December 14, 2016; Accepted : December 23, 2016

템 등으로 이루어진 추진시스템과 송풍기, 공기압축기, 기타 부하에 전원을 공급하는 보조전원장치 등으로 구분할 수 있다. 추진시스템의 컨버터 출력은 인버터 입력뿐만 아니라 HEP(Head Electric Power) 장치에도 공급한다. 전기기관차에는 2개의 대차(Bogie)가 있어 1개의 대차에 전력변환장치 1 유니트가 소요된다. 1개의 대차 내에 2개 견인전동기 제어 전원을 공급하는 1C1M 구조이다. 그림 1은 8200호대 전기기관차의 주회로도를 나타내었다[1,2].

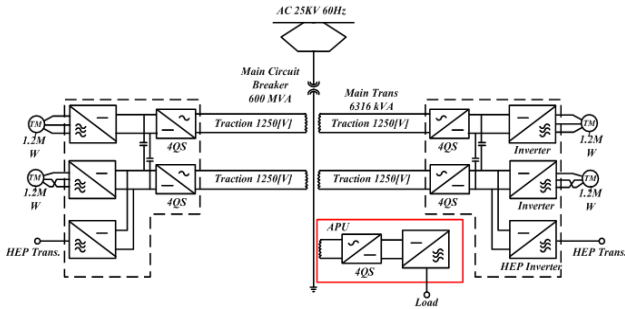


그림 1 8200호대 전기기관차 주회로도
 Fig. 1 The Main Circuit for the 8200 Electric Locomotives

보조전원장치는 주변압기 2차측 권선으로부터 교류전압을 직류전압으로 바꾸는 4상 컨버터(4QS)와 컨버터 출력 전압을 3상 교류 전압으로 변환하여 송풍기, 공기압축기, 기타 부하에 전원을 공급하는 유니트장치로 구성된다. 이때 컨버터는 스위치제어를 수행하면서 입력 전압과 전류의 상이 다르게 되는데 이를 다시 동상으로 만들어주는 것이 PLL제어이다.

본 논문에서는 보조전원장치의 컨버터의 새로운 방식의 PLL 제어방법을 제안하고 분석하였으며 이에 대한 시뮬레이션을 수행하였다[3,4].

2.2 APF 방식의 PLL 기법

일반적으로 많이 사용되는 단상 교류전원의 동기화를 위한 PLL 기법은 크게 무적용 방식, 제로위치 검출방식(Zero Cross Detection, ZCD), 저역통과필터(LPF)에 의한 지연방식, 전역필터(APF) 방식 등이 알려져 있다. 무적용 방식은 입력전압 자체의 정보를 이용하여 전류파형을 제어하는 방식으로 구현이 매우 간단하여 저용량 SMPS(Switch Mode Power Supply) 등에서 흔히 사용되는 방식이지만 입력전압의 왜곡이 고스란히 전달되므로 노이즈 환경에서는 사용하기 힘든 단점이 있다. ZCD 방식은 오래전부터 구현된 방식으로 교류전압의 제로지점을 추적하고 적절한 피드백을 통해 동기화된 신호를 얻을 수 있으나 제로지점 내의 변화에 대해서는 반응이 되지 않는 약점이 있다. 이에 반하여 APF 방식은 프로세서의 향상된 연산능력을 이용하여 왜곡이 최소화된 비교적 정확한 지연파형을 얻을 수 있으므로 최근의 컨버터에서 많이 채택되고 있다. APF에 의한 PLL을 아날로그 전달함수를 통하여 살펴보면 식 (1)~식 (3)과 같다[5,6].

$$V_i = E_i \angle -\theta, \quad \theta = 2 \tan^{-1} \omega RC \tag{1}$$

$$H(s) = \frac{s - \alpha}{s + \alpha}, \quad \alpha = \frac{1}{2\pi RC} \tag{2}$$

$$V_o = V_i H(s) \tag{3}$$

이를 Z-Transform을 사용하여 이산식으로 변환하면 식 (4)와 같다.

$$y[n] = \beta y[n-1] + \beta x[n] - x[n-1] \tag{4}$$

$$\text{단, } \beta = \frac{1 - \frac{\alpha T}{2}}{1 + \frac{\alpha T}{2}}, \alpha = \frac{1}{RC}, T = \frac{1}{f_s}$$

이 된다. 여기서 V_i 와 V_o 는 각각 APF의 입력과 출력값이고, RC 와 f_s 는 각각 위상지연을 위한 아날로그 상수값 및 샘플링 주파수이다. 지연각(θ)을 위한 아날로그 RC 상수값이 결정되면 샘플링 주파수가 적용된 β 를 계산한 후 프로세서에서 식 (4)를 사용하여 실시간 연산으로 지연된 \cos 값을 얻어낸다. 이렇게 얻어진 \cos 값과 원래 파형에 대해 dq 연산을 수행함으로써 3상전원에서와 동일하게 정확한 위상과 주파수 정보를 얻을 수 있게 된다. 그림 2는 APF PLL의 구조를 나타내었다.

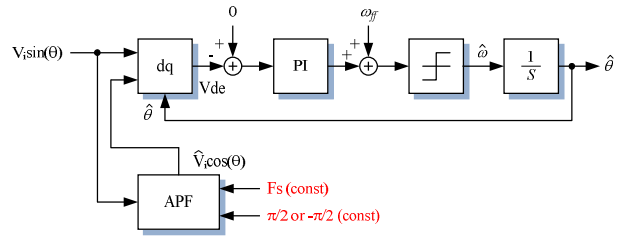


그림 2 APF PLL의 구조
 Fig. 2 Configuration Diagram of APF

그림 3은 그림 2의 APU PLL 구조를 TMS320F2808 DSP를 사용하여 디지털 제어로 구현하였다. 60[Hz]인 기본파 외에 가산 전압과 유사한 11차 고조파(15%)가 포함된 입력전압을 모의하였다. 그림 3의 출력파형을 보면 고조파가 포함된 입력전압을 점점 추종하는 것을 확인할 수 있으며 필터를 거쳐 고조파가 포함되지 않은 파형을 출력하는 것을 확인할 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 APF 방식을 이용한 PLL 기법에서는 지연하고자 하는 위상각(θ)를 미리 지정하여야 하는데 이 과정에서 식 (1)에 나타난 바와 같이 입력주파수가 고정되는 한계가 있다. 또한 다소 복잡한 삼각함수와 나눗셈을 사용하여야 하고 이를 다시 Z-Transform을 적용하여 이산식으로 변환해야 한다. 실용적으로는 통상 오프라인으로 각각의 변수를 계산한 후 제어프로세서에서는 단순화된 이산식 연산을 수행하는 방식이 사용된다. 이에 따라 입력주파수의 범위가 넓거나 노이즈가 많이 입력되는 환경에서의 적용이 쉽지 않다.

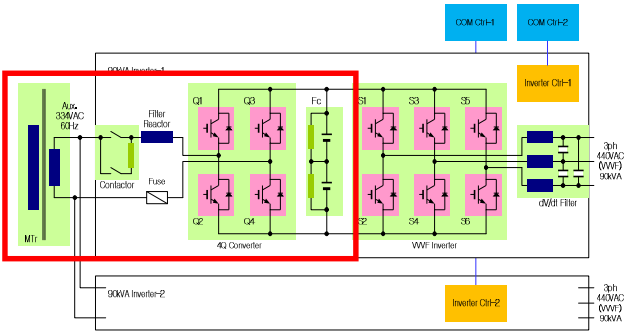
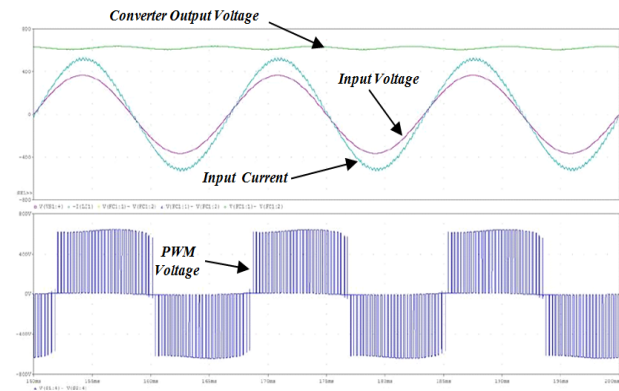


그림 6 8200호대 보조전원장치의 시뮬레이션 구성
Fig. 6 Configuration Diagram of 8200 locomotive Auxiliary power system

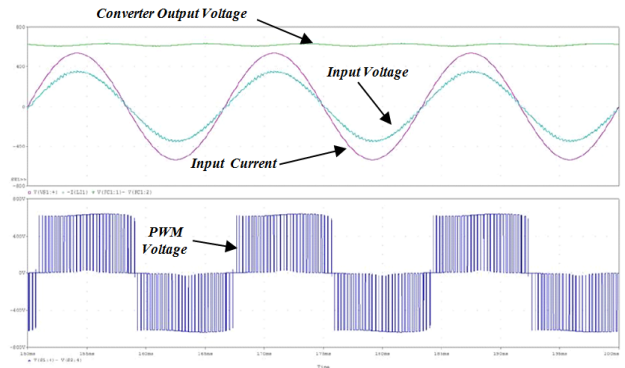
시뮬레이션은 입력전압의 범위인 250~400[Vac]임을 고려하여 254[Vac]와 380[Vac]에서 수행하였다. 입력전압 254[Vac] 실험의 결과파형은 그림 7과 같다. 컨버터의 입력전압은 254[Vac]로 승압 토폴로지를 통하여 620[Vdc]를 출력으로 내보내는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 PWM이 정상적인 동작을 하는 것으로 볼 수 있다. 또한 MA 방식필터를 이용한 PLL이 잘 적용되어 입력전류는 입력전압을 잘 추종하여 역률 1에 근접하고 있음을 확인할 수 있다.



(X축 : 10[ms]/div., Y축 : 400[V], 400[A]/div.)

그림 7 시뮬레이션 입출력 파형 (입력전압 254[Vac])
Fig. 7 Input & output waveform of simulation (254[Vac])

입력전압 380[Vdc] 실험의 결과파형은 그림 8과 같다. 컨버터의 입력전압은 380[Vac]로 승압 토폴로지를 통하여 620[Vdc]를 출력으로 내보내는 것을 확인할 수 있다. 입력전압 254[Vac]와 같이 PWM이 정상적인 동작을 하는 것으로 볼 수 있다. 또한 저압과 마찬가지로 MA 방식필터를 이용한 PLL이 잘 적용되어 입력전류는 입력전압을 잘 추종하여 역률 1에 근접하고 있음을 확인할 수 있었고 입력전압 254[Vac]에 비해 입력전류가 적어진 것을 확인할 수 있다.



(X축 : 10[ms]/div., Y축 : 400[V], 400[A]/div.)

그림 8 시뮬레이션 입출력 파형 (입력전압 380[Vac])
Fig. 8 Input & output waveform of simulation (380[Vac])

4. 결 론

본 논문에서는 MA 필터 방식의 단상 PLL 제어방법에 대하여 제안하였다. 제안된 MA 방식은 APF 방식에서처럼 복잡한 오프라인 연산이 필요치 않으며 입력주파수의 변화나 노이즈환경 하에서도 강인한 동기화가 가능한 장점이 있다. 제안된 PLL 방식은 8200호대 전기기관차의 보조전원장치에 사용되는 PWM 컨버터에서 구현되었으며 시뮬레이션에서와 마찬가지로 좋은 동특성이 관측되었다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) MA 필터방식은 입력전압의 실시간 평균값으로부터 Cosine 정보를 획득하는 일종의 적응제어 방식이므로 APF 방식과는 달리 주파수가 변동하는 경우나 노이즈 환경하에서도 강인한 입력동기화 특성을 갖는 장점이 있다.
- (2) 60[Hz]인 기본파 외에 가선전압과 유사한 11차 고조파(15%)가 포함된 입력전압을 모의하였을때 APF와 마찬가지로 PLL을 잘 수행하는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 시뮬레이션은 입력전압의 범위인 250~400[Vac]임을 고려하여 254[Vac]와 380[Vac]에서 수행하였으며 두 조건 모두 승압 토폴로지를 통하여 620[Vdc]를 출력으로 내보내는 것을 확인할 수 있다. 또한 이에 따라 PWM이 정상적인 동작을 하는 것으로 볼 수 있다.
- (3) 또한 MA 방식필터를 이용한 PLL이 잘 적용되어 입력전류는 입력전압을 잘 추종하여 역률 1에 근접하고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술 연구사업 중 '전기기관차(8200호대) 보조전원장치 실용화 기술개발' 과제의 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] B. Y. Park, "Structure and Function of Electric Locomotive", Korail Human Resources Development Center, pp. 430-439, 2006
- [2] Byoung-Gun Park et al., "An Improved Feed-Forward Controller for the Parallel Operation of a Single-Phase PWM Converter in High-Speed Trains", Journal of KIPE, Vol. 15, No. 3, pp. 226-234, 2010
- [3] MUHAMMAD H. RASHID, POWER ELECTRONICS HANDBOOK, Academic Press, USA, 2007
- [4] Rubens M. Santos Filho et al., "Comparison of Three Single-Phase PLL Algorithms for UPS Applications", IEEE Transactions on industrial electronics, Vol.55, No.8, pp. 2923-2932, 2008
- [5] Timothy Thacker et al., "Phase-Locked Loops using State Variable Feedback for Single-Phase Converter Systems", APEC 2009, pp. 864-870, 2009
- [6] Yong-seok Lee et al., "Performance Comparison of Single-Phase PLL Algorithms Using Virtual 2-Phase Strategy", Journal of KAICS, Vol.8, No.2, pp.219-225, 2007
- [7] Sang-Hun Kim, DC, AC, BLDC motor control, Bogdo, 3th edition, 2012
- [8] Moon-Taek Cho et al., "Utility Interactive Photovoltaic Generation System using a Space Vector Modulation", Trans. KIEE, Vol. 59P, No. 4, pp. 345-350, 2010
- [9] Eul-Jae Lee et al., "A New Development of Auxiliary Power System for 8200 Series Electric Locomotives", KIEE, pp. 591-596, 2014

저 자 소 개



정 노 건 (No-Geon Jung)

2012년 한국철도대 철도차량전기과 졸업.
2015년 한국교통대 교통대학원 교통시스템 공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 교통시스템 공학과 박사과정



이 을 재 (Eul-Jae Lee)

1989년 호서대 전자공학과 졸업. 2001년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1997년~현재 이경산전 주식회사 대표이사



김 재 문 (Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학박사). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전기전자공학과 교수
E-mail : goldmoon@ut.ac.kr