

전동차 조합시험을 위한 부하 시뮬레이터에 관한 연구

김길동, 이한민, 오세찬, 박성혁, 김종대

한국철도기술연구원

A Study on Load Simulator for Traction system combined testing

Gil-Dong Kim, Han-Min Lee, Seh-Chan Oh, Sung-Hyuk Pak, Jong-Dae Kim

Korea Railroad Research Institute(KRRI)

Abstract - A newly-built inverter has to undergo a series of stress tests in the final stage of production line. This can be achieved by connecting it to a dynamometer consisting of a three-phase machine joined by a rigid shaft to a DC load machine. The latter is controlled to create some specific load characteristic needed for the test. In this paper a test method is proposed, in which no mechanical equipment is needed. The suggested test stand consists only of a inverter to be tested and a simulator converter. Both devices are connected back-to-back on the AC-side via smoothing reactors. The simulator operates in real-time as an equivalent load circuit, so that the device under test will only notice the behaviour of a three-phase machine under consideration of the load. In oder to prove rightness of the suggested test method, the simulation and actual experiment carried out emulation for a 2.2kW induction motor.

1. 서 론

전력 변환기는 개발과 생산에서 판매에 이르기까지 짧은 생산기간에 보다 저 비용 촉구가 지속적으로 요구되었다. 그럼에도 불구하고 성능, 품질, 안전에 관한 부분에 있어서는 보다 높은 신뢰를 요구하여, 보다 효과적이고 유연한 시험 장비가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 위와 같이 인버터 시험 시 발생되는 유연성 부족과 많은 공간 차지 그리고 시험 시 소음발생이라는 단점을 보완할 수 있는 인버터 성능시험용 부하 시뮬레이터 컨버터를 제시하였다. 제시된 부하 시험용 부하 시뮬레이터의 시험방법은 피시험체 인버터의 3상 AC 출력 단에 평활용 리액터를 경유하여 부하 시뮬레이터와 back-to-back으로 접속하고 DC 링크는 두 디바이스가 서로 공유하여 에너지가 순환할 수 있도록 하였다. 시험장치의 특성을 만족시키기 위하여 부하 시뮬레이터는 속도 전류 제어가 가능한 전류벡터제어를 수행하여 AC 부하도 원활히 제어할 수 있도록 하였으며, 이러한 특성을 확인하기 위해서 2.2kW 유도전동기 모델을 HILS(Hardware In-the -Loop Simulation) 시뮬레이터로 구성하였다.

2. 부하 시뮬레이터 컨버터 구조

2.1 기준 시뮬레이터 시스템 구성

전력 변환기를 시험하기 위한 종래의 시험방법은 3상 전동기와 직류발전기로 이루어진 M-G세트를 이용하는 방법으로 부하시험방법이 대표적이다. 그 구성은 시험내

상 전력 변환기와 입력 전류 평활용 리액터, 인버터에 직류 전원을 공급하기 위한 정류부, 부하용 직류 발전기 및 전력용 컨버터로 구성되어있다. 피시험체 인버터는 그 자체 용량에 맞는 3상 전동기에 접속하게 된다.

2.2 제시된 부하 시뮬레이터 컨버터의 구조

본 논문에서는 3상 유도전동기의 기계적 모델을 기반으로 고정자 전류와 같은 드라이브의 상태 변수를 데이터 검출장치의 값을 통하여 계산하였다. 그럼 1.은 제시된 부하 시뮬레이터 컨버터의 구조이다.

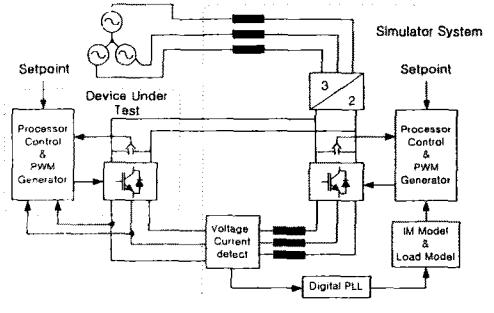


그림 1. 제시된 시험방법

제시된 시험 방법은 피시험체 인버터와 부하 시뮬레이터 컨버터가 전류 평활용 리액터를 경유하여 back-to-back으로 접속되어져 있고, 두 장치의 DC 링크는 서로 공유되어 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 구성함으로써 기계적인 장치 및 컨버터 장치를 제거시킬 수 있어, 그 구성을 간결하게 할 수 있었다.

2.3 제안된 시스템 각부의 제어 블럭도

전기적 시뮬레이터는 피시험체 장치의 V/F 제어 특성 시험과 같이 주파수가 변화하는 피시험체의 시험에도 적용할 수 있어야 한다. 따라서, 전기적 시뮬레이터는 피시험체의 출력 전압의 위상을 추적할 수 있도록 PLL(Phase Locked Loop)을 적용하여야 한다.

그림 2는 3상 PLL 구조를 나타낸 것이다. 이러한 구조의 PLL에서, 피시험체 출력전압의 위상각은 PLL 회전 좌표계 축과 놓기 시켜서 검출 받는다.[1-3] 또한, d축 저령 신호(V_d)을 0으로 설정하면, 피시험체 인버터의 출력전압에 대하여 PLL의 출력이 잠기게되어 출력 전압의 순시작 주파수와 그기도 검출 가능하게 된다. 그리고, 피드포워드 주파수 저령(ω_f)은 PLL의 전체적인 추종 특성을 향상시키기 위하여 도입하였다.

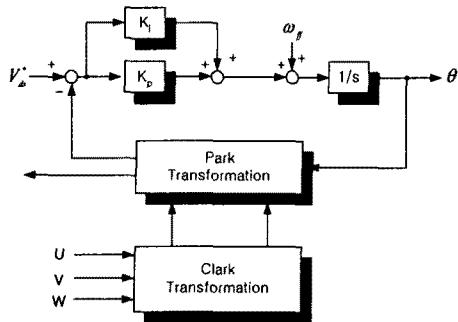


그림 2. 3상 PLL 구조

그림 3은 전기적 부하 시뮬레이터의 동적 모델의 전류 제어가 원활하게 제어될 수 있도록 도입된 피시험체 인버터의 피드포워드 전류제어회로를 나타내고 있다.

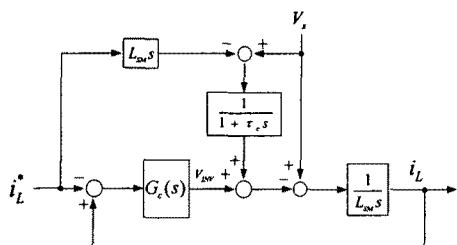


그림 3. 피드포워드 제어 블록도

3. 시뮬레이션

시뮬레이션에 이용된 전체적인 제어구조는 그림 1에 나타나 있는 것 같이 피시험체 인버터와 평활용 리액터, 그리고 인버터를 시험하기 위한 시뮬레이터로 구성되어 있으며, 제어 블럭도는 그림 4와 같이 피드 포워드 전류 제어기와 인버터의 오프셋 보정 회로로 구성되었다.

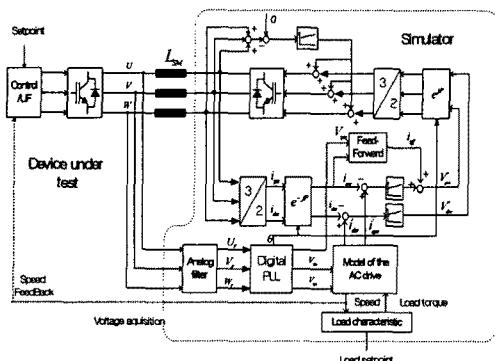


그림 4. 제안된 전기적 부하 시뮬레이터의 전체적인 제어 블록도

그림 5는 부하 시뮬레이터의 정적 전류 제어특성을 알아보기 위해서, 다음과 같이 저령치 전류를 0[A]→3[A]→6[A]→3[A]→0[A]로 가변 하였으며 이때 피시험체 인버터의 출력 전압 주파수는 60[Hz]이다.

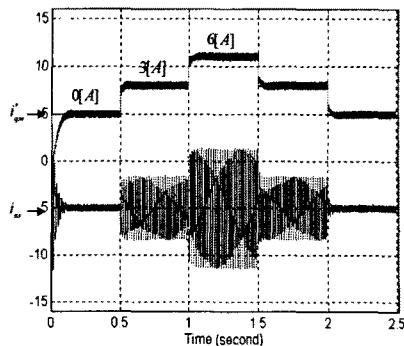


그림 5. 전류지령에 대한 응답특성

그림 5의 두 번째 그림은 평활용 리액터에 흐르는 응답 전류 파형을 나타내고 있다. 기동시 전류의 진동은 디지털 PLL의 위상 검출이 완료되기까지의 과도 전류를 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 과도현상이거나 정상상태가 되면 전류 응답이 원활하게 됨을 볼 수 있다.

그림 6은 주파수 및 위상 변화에 대한 추종 특성을 확인하기 위한 것으로써, 피시험체 인버터의 출력 주파수를 30[Hz]→60[Hz]→30[Hz]로 가변 하였을 경우의 출력 주파수와 출력 전류에 관한 시뮬레이션 파형을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 피시험체의 주파수 변화에 대하여 시뮬레이터 시스템의 주파수 추종은 비교적 적은 시간에 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 따라서, HILS 시스템을 위한 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

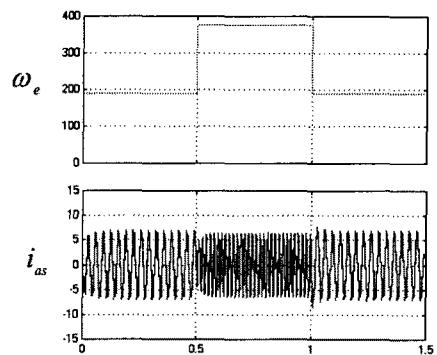


그림 6. 주파수 변화에 따른 전류제어 파형

그림 7은 피시험체의 인버터가 V/F 운전을 하였을 경우에 부하 시뮬레이터 인버터의 3상 유도 전동기 모델 특성을 구현한 것으로 피시험체의 가속구간은 0[s]에서 10[s]이고, 15[s]에 정격 부하를 인가하는 시뮬레이션 파형이다. 그림 7의 (a),(b)는 각각 부하 시뮬레이터에서 제공되는 모의 전동기의 속도와 토크 파형이며, 그림 (c)는 피시험체에 흐르는 전류이다. 그림에서 볼 수 있듯이 시뮬레이터 인버터의 각각의 출력 파형은 전형적인 유도 전동기의 특성을 나타내고 있다.

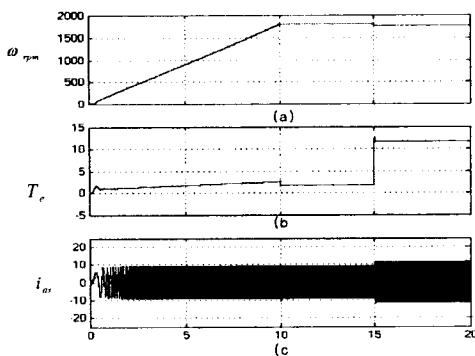


그림 7. 모의 유도전동기에 의한
피시험체의 출력 전류 파형

4. 실험 및 고찰

제안된 전기적 부하 시뮬레이터는 위와 같은 특성시험을 구현하기 위해 7.5[kW]의 인버터를 사용하였고, 스위칭 주파수는 10[kHz]로 하였다. 그리고 피시험체는 7.5[kW]의 인버터를 사용하였고, 제어부의 프로세서는 TMS320F240으로 구성되어져 있다. 그리고, 시험장치가 갖춰야 할 조건인 시험시 안정성을 충족시키고자 과전류, 과전압 보호회로를 구성하였으며, 케이트 드라이브회로는 Analog Device 사의 316j를 이용하여, 암 단락전류 및 과 전류로부터 부하시뮬레이터를 보호할 수 있도록 하였다.

그림 8은 제어특성을 기반으로 3상 유도전동기를 모의한 시험 파형이다. 시험조건은 피시험체 인버터의 제어를 가속구간은 0[s]에서 10[s]이고 20[s]에는 정상 운전하는 것으로 하였으며 이때 시뮬레이터의 가상 전동기에 조건은 0[s]~15[s]에는 무 부하로 운전되며, 15[s]인 A점에서는 가상 유도전동기에 10[Nm]의 부하를 인가하는 시험을 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 출력시험 파형은 시뮬레이션에서 고찰한 결과와 같이 전형적인 유도전동기 구동 파형을 나타내고 있다.

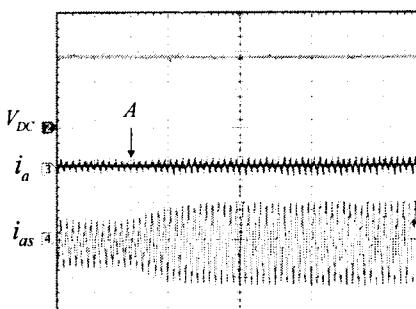


그림 8. 부하 시뮬레이터의 각부 파형

(1. 150[V/div] : 2, 3 10[A/div], TimeDiv: 100[ms])

그림 9는 부하 시험시 소비되는 에너지를 살펴보기 위한 부하 시뮬레이터의 각부 파형이며, 시험 조건은 q축 전류 지령 전류를 5[A]로 유지하다가 A점에서 10[A]로 변화시켰을 경우이다. 각각의 시험 파형은 부하시뮬레이터의 DC 링크전압, 정류다이오드에 공급되는 3상 전원의 a상 전류, 및 평활용 리액터에 흐르는 전류 파형이다. 그림으로부터 부하 시험시 평활용 리액터에 흐르는 전류의 변화에도 DC 링크전압은 일정하게 유지되었고, 입력 전류 i_a 는 미소량 상승하는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 부하 시뮬레이터에서 소비되는 에너지는 실제 공급되는 에너지의 1/10 이하인 것을 알 수 있다.

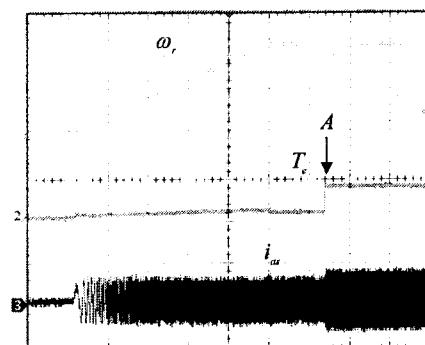


그림 9. 시뮬레이터의 모의 전동기 구현 시험파형
(700rpm/div, 10Nm/div, 5A/div, TimeDiv: 2[s])

이상으로부터 본 논문에서 추구하고자 하는 HILS 시뮬레이터 특성이 원활하게 구현되고 있으며, 그 소비 전력도 경감시킬 수 있어, 소규모 생산공장에서도 시험이 가능함을 알 수 있다.

5. 결 과

본 논문에서는 전력 변환기의 시험을 위한 부하 시뮬레이터를 제안하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 인버터 시험을 위한 기준의 M-G세트를 이용한 방식에 비하여 인버터 시험이 용이해졌다.
- (2) 인버터 시험시 기계적 부하에 의한 소음이 저감되었다.
- (3) 시험시 필요한 에너지를 줄일 수 있어 수전 설비 및 부하설비가 미흡한 중소업체에서도 부하시험이 가능해 졌다.
- (4) HILS 시뮬레이터이기 때문에, 부하 시험장치의 가격이 저렴하다.

향후 과제로서, 피시험체 및 부하 시뮬레이터의 스위칭 동작에 의해 발생되는 EMI/EMC에 대한 대책이 필요하며, 역률 조절되는 부하장치를 얻기 위해서는 전기적 부하 시뮬레이터의 전압을 피시험체 장치의 전압보다 높은 전압 레벨을 공급하도록 DC링크에 승압 Chopper 회로가 필요할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] L.N. Arruda, B.J. Cardoso Filho, S.M.Silva, and A.S.A.C. Diniz, "Wide bandwidth single and three-phase PLL structures for grid-tied PV systems", in Proceedings of 228th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage (AK), pp. 1660-1663, September, 2000
- [2] V.Kaura, and V.Blasco, "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions", IEEE trans. on Industry Applications, vol. 33, no.1, pp.58-63, 1997
- [3] S.M Silva, L.N. Arruda, and B.J. Cardoso Filho, "Wide bandwidth single and three-phase PLL structures for utility connected systems", in Proceedings of EPE, 2001, in press.