

인버터 구동 유도 전동기 고주파 모델링

홍 선기  
호서대학교 전기정보통신공학부

High Frequency Model of Inverter-fed Induction Motor

Sun-Ki Hong

School of Electrical Engineering, Hoseo University

**Abstract** - Voltage varying rate  $dv/dt$  which is applied to induction motor usually makes unnegligible leakage current and it flows through stator winding and motor frame. This kind of harmonic leakage current makes effect on power source and causes electromagnetic trouble because the motor frame has earth. Therefore in this study, a high frequency induction motor model is developed and analyze the motor performance to explain the phenomena. Inverter model is also developed and is combined with the motor model to prepare the basis of the high frequency effects on inverter fed induction motor.

1. 서 론

최근에는 펄스 폭 변조(PWM)을 이용한 인버터를 이용하여 유도 전동기를 운전하는 구동 장치가 비교적 우수한 동작 특성, 저비용 및 넓은 응용분야로 인해 산업계에서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 PWM에 의해 만들어진 고주파 전압의 영향은 모터 특성을 해석하는데 있어서는 그 해석의 어려움 때문에 보통 무시되고 있다. 그러나 전동기에 인가되는 전압 변화율  $dv/dt$ 는 무시할 수 없는 양의 고주파 누설 전류를 야기하고 이것은 고정자 권선과 모터 프레임간의 커패시터 성분을 통해 흐르게 된다. 또한 전동기 프레임은 보통 접지가 되어 있으므로 이러한 고주파 누설 전류는 전원부에 영향을 줄 수 있고, 전자파 장애를 일으킬 수도 있게 된다. 따라서 이러한 영향을 해석하기 위해 최근 많은 노력들을 기울이고 있으며 [1-4], 부분적으로 현상을 모사할 수 있게 되고 있다. 그러나 기존의 연구들은 우선 인버터와의 결합 모델의 개발 필요성을 느끼고 있으면서도 인버터 모델링의 어려움 뿐만 아니라 결합 어려움 때문에 거의 시도를 하지 못하고 있다. 따라서, 고정된 전원을 가정하고, 유도기 모델을 단순화시켜서 모사를 하고 있는 실정이다. Boglietti[1]나 Consoli[2]는 유도기를 단순화시켜 저항-인덕터 또는 단순히 인덕터로 가정하고, 여기에 커패시터를 직렬 또는 병렬 연결하고, 대지간 커패시터를 연결하여 단상에서의 효과나 공통 모드(common mode)에서의 현상을 모사하였다. 즉, 전원은 일정 주파수, 일정 크기의 전압이 입력될 때, 저항, 인덕터, 커패시터의 조합 모델을 통해 전류의 파형을 계산하였으나, 인버터를 적용하지는 못하였다. 경우에 따라서는 EMTP(Electromagnetic transient program)을 이용하여 인버터와 유도 전동기가 연결된 경우를 시뮬레이션하기도 했지만 [5], 유도 전동기의 고주파 모델을 적용하지 못하고 기본 등가회로를 이용함으로써 인버터의 효과에 의한 누설 전류를 정확히 모사했다고 할 수는 없다. 모터에 입력을 정확히 하기 위해 인버터 출력 파형을 디지털 오실로스코프로 기억하고, 이를 입력으로 전동기의 모델에 적용하여 모터 전류를 계산한 경우[6]

도 있지만, 이러한 경우는 실제 전동기를 운전하여 입력 전압 데이터를 기록해야 할 뿐만 아니라, 누설 전류의 개념이 회로상 존재하지 않고, 또한 부하 변동에 따라 입력 전압이 변화할 수 있는 점은 전혀 고려하지 않고 있어, 부하 변동시의 시뮬레이션은 불가능하다. 결국, 인버터와 고주파를 고려한 유도 전동기의 통합 모델은 아직 개발되어 있지 않으며, PWM 구동에 따른 고주파의 영향, 고주파 누설 전류 등은 정확한 해석을 못하고 있는 실정이다.

궁극적으로 전동기와 인버터를 결합하여 상호 영향을 고려한 현상을 해석할 수 있는 모델의 개발이 요구되며, 이러한 모델의 완성엔 전동기, 구동 장치 간에서 발생하는 노이즈나 전자파 장애의 경감, 또는 제어를 위한 기 반될 수 있다. 나아가, 유도 전동기의 벡터 제어 등 정밀 제어에 필요한 dq 모델의 개발과 인버터와의 결합 모델의 개발을 통해 더욱 안정성 있는 제어가 가능하도록 통합 모델의 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 인버터 모델을 개발하여 3상 평형부하에 대한 시뮬레이션을 통해 개발된 인버터 모델의 특성을 확인하였다. 또한, Boglietti 모델을 확장하여 유도전동기의 dq 모델에 대지간 커패시터 성분을 고려한 유도전동기 dq 모델을 개발하고 이에 대한 특성을 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 유도 전동기 모델

유도 전동기의 일반적인 등가 회로는 고정자측, 회전자측 및 여자 회로로 구성된다. 여기에서는 와전류나 프레임과 대지간의 누설은 무시된다. 그러나, 높은 주파수를 갖는 PWM 구동과 같은 경우는 무시되는 두 값이 크게 증가한다. 다음 그림 1은 유도기에 이러한 회로를 첨가한 경우이다. 그림 1은 한 상의 회로를 나타내며, 그림 2(a)는 삼각파 전원 전압이 가해졌을 때, 유도기 3상이 공통모드로 연결된 경우 전류값을 시뮬레이션한 것이다. 이 결과는 실험 결과[1]와도 비교적 잘 일치하고 있다.

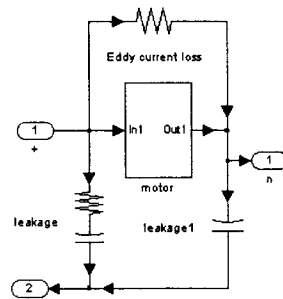
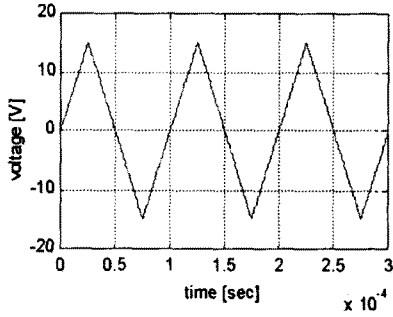
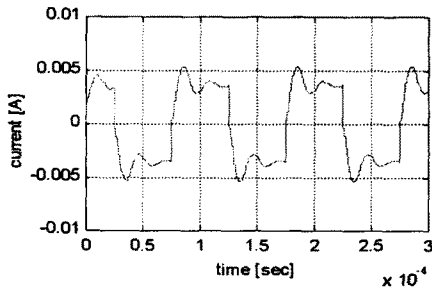


그림 1. 3상 유도기에 한 상의 고주파 모델



(a) 입력 전압



(b) 출력 전류

그림 2. 공통 모드에서 입력 전압과 출력 전류

그림 2의 결과는 전체적인 입력 전압에 그림(a)와 같은 고조파가 실리고, 한 상의 등가회로가 그림 1과 같을 때, 이공 공통 모드회로에 대하여 시뮬레이션했을 때의 출력 전류의 영향을 나타낸 것이다. 입력 전압에서 실린 작은 노이즈는 출력 전류에는 커다란 영향을 주게 된다. 이러한 시뮬레이션 결과는 그림 1과 같은 누설 커패시터로 흐르는 전류가 크게 작용하여 나타나게 된다.

## 2.2 유도전동기용 인버터 모델

그림 3은 일반적인 인버터 모델에 3상 부하를 연결한 것이다. 이상적인 인버터에서는 스위칭 온 오프에 걸리는 시간은 0으로 놓고 처리한다. 그러나, 실제로 그러한 경우는 단락 사고를 발생하게 된다. 따라서, 회로 설계 시 데드 타임 등을 설정하게 된다. 이러한 등의 처리를 고려할 수 있는 회로를 실제 시뮬레이션에서도 고려할 수 있어야 한다.

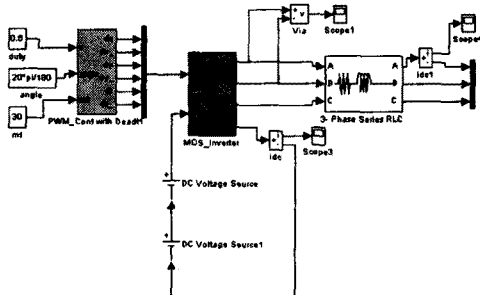


그림 3. 인버터, 부하 회로

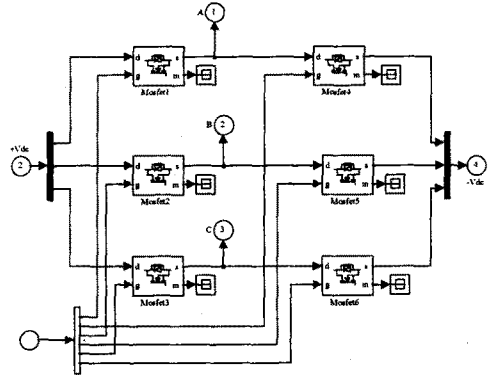


그림 4. 인버터 회로 구성

여기서, 인버터는 저항-인덕턴스로 구성되는 부하가 인가되었으며, 그림 4는 이러한 회로의 구성을 나타내고 있다.

그림 5는 그림 3의 인버터 회로와 3상 부하가 연결된 경우의 출력 전류 파형이다. 이 때 한 상의 부하는 저항 1.5 [ $\Omega$ ], 5 [mH]의 인덕턴스를 갖고 있으며, 캐리어 주파수는 1.8 [kHz]인 경우의 시뮬레이션 결과이다. 이로부터 캐리어 주파수에 따른 출력 전류의 파형은 약간의 진동이 있음을 볼 수 있으며, 캐리어주파수를 증가시킬수록 감소하게 된다.

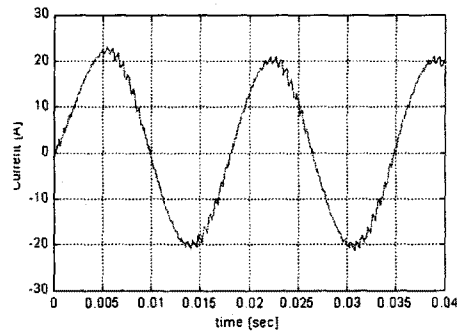


그림 5. 그림 3에 의한 부하 전류

## 2.2 유도전동기용 dq 모델

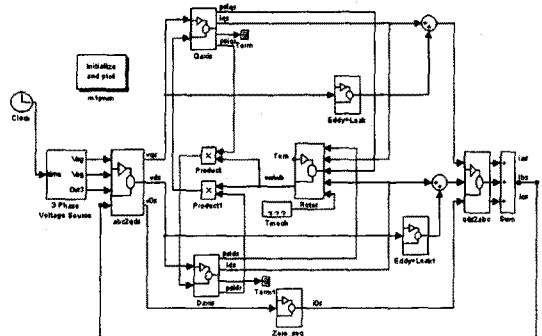


그림 6. 유도 전동기 dq 모델

그림 6은 유도 전동기의 dq 모델이다. 일반적으로 고정밀을 요하지 않은 유도 전동기 속도 제어 등에서는 보통 전압/주파수 일정 제어 기법을 많이 사용한다. 그러나, 정밀 제어에서는 벡터 제어 등을 많이 사용하며, dq 모델링은 필수적이다. 3상 유도전동기에서 중성선은 물론 만들어져 있지 않지만, 2.1절에서의 가정에서와 같이 여기서는 영상 전류에 기인하는 누설 전류를 고려하였고, 이에 기인하는 dq축 전류, 전압 등을 고려할 수 있도록 하였다.

그림 7과 8은 각각 그림 6에 의하여 구해진 영상 전압과 영상 전류 파형을 나타내고 있다. 3상이 완전히 평형이라면 영상 전압이나 전류는 존재하지 않는다. 그러나, 인버터로 구동되는 경우 영상 전압이 존재하게 된다. 회로가 구성되지 않는다면 역시 전류는 없겠지만, 프레임-대지간의 커패시터 성분은 이러한 전류를 흐르게 한다[1]. 그림에서 예측할 수 있는 바와 같이, 프레임-대지간 누설 커패시터 성분은 다른 상전압, 전류에 큰 영향을 주며, 전체 시스템에도 영향을 줄 수 있다. 따라서 이러한 성분의 고려는 누설에 따른 기기의 특성 해석에 중요한 요소로 작용할 수 있다.

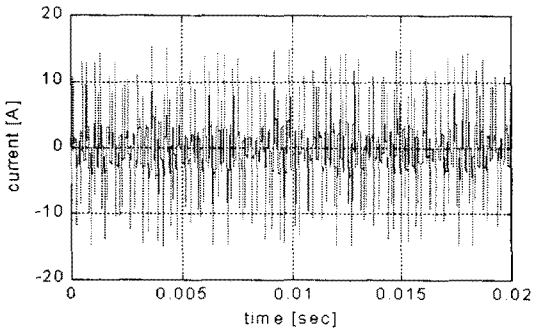


그림 7. 그림 5 모델에 의한 영상 전압

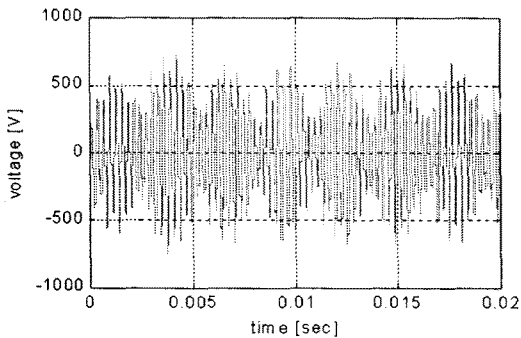


그림 8. 그림 5 모델에 의한 영상 전류

### 3. 결 론

PWM에 의해 만들어진 고주파 전압의 영향은 모터 특성을 해석하는데 있어서는 그 해석의 어려움 때문에 보통 무시되나 전동기에 인가되는 전압 변화율  $dv/dt$ 는 무시할 수 없는 양의 고주파 누설 전류를 야기하고 이것은 고정자 권선과 모터 프레임간의 커패시터 성분을 통해 홀러 전원부에 영향을 줄 수 있고, 전자파 장애를 일으킬 수도 있게 된다. 그러나 인버터와 고조파를 고려한 유도 전동기의 통합 모델은 아직 개발되어 있지 않으며, PWM 구동에 따른 고조파의 영향, 고조파 누설 전

류 등은 정확한 해석을 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 유도전동기 등가회로에 대지간 누설 커패시터를 추가한 모델로 고조파 전압에 대한 특성 시뮬레이션 등을 통해 기존 실험에 의한 결과와 비교하여 상호한 일치점을 확인하였으며, 이를 dq 모델로 확장하여 임의의 인가전압에 대한 특성 해석이 가능하도록 하였다. 또한, 인버터 모델을 제시하여 임의의 3상 부하에 대한 특성 해석을 수행하였다.

앞으로의 연구과제는 인버터와 유도전동기의 모델을 결합하여, 유도 전동기와 전원간의 상호 영향을 고려한 해석을 가능하게 하여, 임의의 전원에 대한 특성 해석을 통해 누설의 영향과 전자파 장애 해석에 기여할 수 있도록 하고자 한다.

### (참 고 문 헌)

- [1] A. Boglietti and E. Carpaneto, "Induction motor high frequency model", IEEE-IAS Annual Meeting, October 00, pp.1551-1558.
- [2] A. Consoli, G. Oriti, A. Testa, A.I. Julian, "Induction motor modeling for coomon mode and differential mode emission evaluation", IEEE-IAS Annual Meeting, 6-10 October 96, S. Diego, USA, pp.595-599.
- [3] A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari, F. Profumo, "About the design of very high frequency induction motors for spindle applications", IEEE-IAS Annual Meeting 92, Houston, USA, pp.25-32.
- [4] S. Ogasawara, h. Akagi, "Modeling and damping of high frequency leakage currents in PWM Inverter fed AC motor drive system", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 32, No. 5, Sep./Oct. 1996, pp.1105-1113.
- [5] C.J. Melhorn, L. Tang, "Transient effects of PWM drives on induction motors", IEEE Transactions on Industry Application, Vol.33, No.4, July/August 1997, pp.1065-1072.
- [6] Z. Papazacharopoulos, K. Tatis, A. Kladas and S. Manias, "Dynamic model for PWM Inverter-fed induction motor representation determined by finite elements including switching frequency iron losses", IEEE Record of the 9th CEFC, pp.404, June 2000, Milwaukee, USA.
- [7] Sun-Ki Hong, Thomas A. Lipo, "High frequency modeling of induction motor combined with inverter", WEMPEC Annual Review Meeting, paper #56, March 29-30, 2000.