

## 누설 전류를 고려한 인버터 구동 유도 전동기 모델 시뮬레이션

(Simulations of the Inverter-Fed Induction Motor Model Considering Leakage Current)

홍선기\*

(Sun-Ki Hong)

### 요 약

유도 전동기의 인버터 사용이 증가하면서, 인버터의 고주파 스위칭에 대한 유도전동기의 특성 해석 연구가 요구되고 있다. 그러나 기존의 연구들은 인버터와의 결합 모델의 개발 필요성을 느끼고 있으면서도 인버터 모델링의 어려움뿐만 아니라 결합 어려움 때문에 고정된 전원을 가정하고, 유도기 모델을 단순화 시켜서 모사를 하고 있는 경우가 대부분이다. 이에 인버터로 구동되는 유도 전동기의 고주파 해석 모델과 고주파 고려 유도 전동기 해석 모델 및 인버터 동작을 시뮬레이션할 수 있는 모델을 개발하여, 위와 같은 경우의 시뮬레이션을 가능하게 하고자 한다. 이로부터, 인버터에 의한 유도전동기 구동에서의 고주파에 의한 영향을 해석할 수 있다.

### Abstract

It is required to analyze the characteristics of inverter-fed induction motor according to the increase of inverter uses. However the previous simulation researches usually uses simplified induction motor model and fixed power source because the difficulties of their modeling and analysis. In this study, high frequency induction motor is simulated and the induction motor model considering high frequency characteristics is developed and it is combined with inverter model. With these, from the sinusoidal commercial frequency to PWM high frequency, induction motor characteristics can be simulated and analyzed.

Key Words : Inverter-Fed, Capacitance, Induction Motor, High Frequency, PWM

### 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 PWM

\* 주저자 : 호서대학교 시스템제어공학과 교수  
Tel : 041-540-5674, Fax : 041-540-5587  
E-mail : skhong@hoseo.edu  
접수일자 : 2010년 1월 13일  
1차심사 : 2010년 1월 14일, 2차심사 : 2010년 2월 18일  
심사완료 : 2010년 3월 3일

에 의해 만들어진 고주파 전압의 영향은 모터 특성을 해석하는데 있어서는 그 해석의 어려움 때문에 보통 무시되거나 근사화하여 해석하고 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[1-3], 부분적으로 현상을 모사할 수 있게 되고 있다. 그러나 궁극적으로 누설을 고려할 수 있는 전동기 모델과 인버터 모델을 결합하여 현상을 해석할 수 있는 모델의 개발이 요구되며, 이러한 모델의 완성에는 전동기, 구동 장치 간에서 발생하는 노이즈나 전자파 장애의 경감, 또는 제거를 위한 도구로 이용될 수 있다. 그러나 아직 이러한 통합 모델은 개발되어 있지 않다. 인버터의 영향을 고려한 유도 전동기의 특성 해석을 시도한 경우[4-5]도 있지만, 실제로 서로의 영향을 무시하고 전원이 독립적으로 운전됨을 가정한 경우는 전동기 파라미터 변화에 따른 전원의 변화를 모사할 수 없다. 경우에 따라 EMTP(Electromagnetic transients program)을 이용하여 인버터와 유도 전동기가 연결된 경우를 시뮬레이션하기도 했지만[4], 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[5]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 고조파를 고려한 유도 전동기의 통합 모델은 아직 개발되어 있지 않으며, PWM 구동에 따른 고조파의 영향, 고조파 누설 전류 등은 정확한 해석을 못하고 있어, 더욱이 이러한 원인에 기인하는 전자파 유도의

영향은 고려하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 전동기와 인버터는 상호 영향을 고려한 모델의 개발이 요구되고 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. 기존의 연구들은 우선 인버터와의 결합 모델의 개발 필요성을 느끼고 있으면서도 인버터 모델링의 어려움뿐만 아니라 결합 어려움 때문에 고정된 전원을 가정하고, 유도기 모델을 단순화시켜서 모사를 하고 있는 실정이다. 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 모사하는데 그치고 인버터를 적용하지는 못하였다. 이에 인버터로 구동되는 유도 전동기 모델과 고주파 전원, 상용 정현파 전원뿐 아니라, 인버터 전원에 의한 구동의 경우에서 해석이 가능하게 하고자 한다. 이들을 위하여 대지간 용량성 성분에 의한 누설을 고려할 수 있는 유도 전동기 모델과 각종 파라미터를 제어할 수 있는 인버터 모델을 개발하고, 결합하여 유도전동기의 특성을 해석한다.

## 2. 유도기 고주파 모델

기존의 연구들은 우선 인버터와의 결합 모델의 개발 필요성을 느끼고 있으면서도 인버터 모델링의 어려움뿐만 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]은 그림 1과 같이 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.

그림 2는 그림 1의 모델에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 단상 전원 모드에서 위상관계를 보기 위해 전류 파형을 전압 파형과 같이 나타내고 있으며, 전원은 그림에서 알 수 있듯이 주기가  $200[\mu\text{sec}]$ 이고,

크기는  $15[V_{pp}]$ 이다. 파라미터 값은 표 1과 같다. 모터 인덕턴스는 표 1에서 고정자 및 회전자 인덕턴스의 합이다.

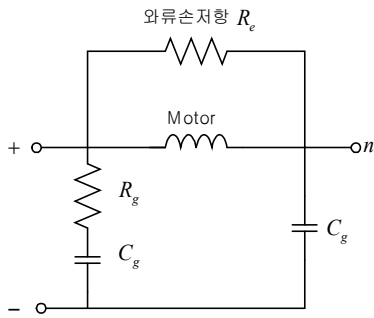


그림 1. Boglietti 모델  
Fig. 1. Boglietti model

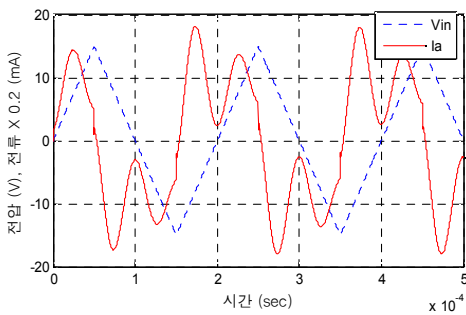


그림 2. 단상 전압 인가시 전류 파형  
Fig. 2. Current waveform in the single phase supply

이 결과는 유도 전동기에 그림 2와 같은 고주파 전압원이 가해졌을 때 전원으로부터 흘러 나가게 되는 전류의 파형을 계산할 수 있고, 뿐만 아니라 누설 전류, 모터 자체에 흐르는 전류, 와전류 성분 등을 계산할 수 있으며, 실험 결과에 거의 부합한다[1]. 하지만, 이 모델은 유도 전동기 운전 시의 시스템에 대한 해석이 아니고, 일정 주파수, 일정 크기의 고주파 전압이 입력될 때의 결과이다. 따라서 이 모델에 의한 해석은 유도 전동기의 해석이 아니라 특정 파형의 고주파가 인가되었을 때의 특성을 계산할 수 있는 모델로부터 누설이나 EMI의 영향을 해석해 보고자 하는 목적을 갖고 있다고 볼 수 있다.

### 3. 고주파 고려 유도전동기 모델

그림 1의 모델은 모델에 실제의 3상 전원을 인가한 다거나, 인버터 전원을 인가하지 않고, 단순히 고주파의 단상 전원을 인가하고, 부하도 단상 모드 또는 3상을 공통 모드로 구성하고 이 때 흐르게 되는 부하 전류 또는 누설 전류를 계산할 수 있게 하였다. 그러나, 인버터 구동 유도전동기를 모사하기 위하여는 인버터 뿐 아니라, 이에 대응할 수 있는 유도전동기 모델이 개발되어야 한다. 이를 위해서는 그림 1에서 단순화 처리된 유도전동기 모델을 상용 주파수 전원이거나 인버터에 의한 전원에도 해석 가능한 모델을 사용하여야 한다. 그림 3은 이를 위해 그림 2에서 단순화된 모터 모델 대신 유도전동기의 d-q 모델 [6]을 고려한 것이다. 단순화된 모델이 아니기 때문에, 고주파의 경우 뿐 아니라 상용전원, 인버터 전원에 의한 구동시도 해석 가능하게 된다.

그림 4는 그림 3에서 설명한 모델에 대한 상세 모델이다. 3상 유도 전동기는 d-q로 모델링 되어 있으며, 여기에 그림 3에서처럼 와전류를 고려한 저항과 대지 간 누설을 고려한 커패시터를 연결한 것을 보여주고 있다. 여기서 유도전동기 d-q 모델은 매트랩 시뮬링 크에서 제공하는 모델을 이용하였다. 이 모델을 이용하면, 고주파, 정현파 전원뿐 아니라 인버터에 의한 운전 특성 해석이 가능하며, 매트랩의 시뮬링 모델을 이용하므로, 전동기 제반 특성 해석이 용이해진다. 모델의 타당성은 다음절의 시뮬레이션 결과에서 보인다.

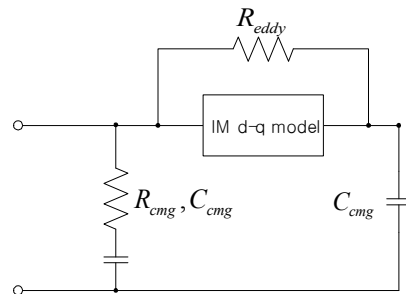


그림 3. 제안된 블록도  
Fig. 3. Proposed block diagram

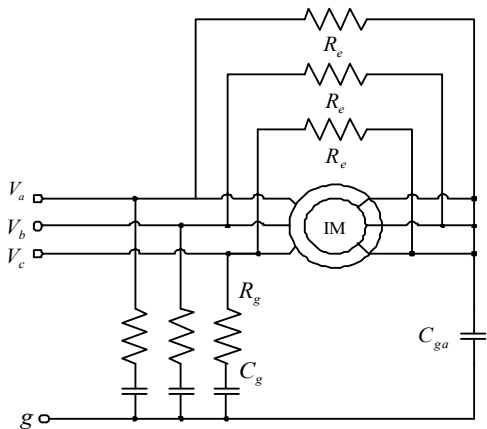


그림 4. 복합 유도기 모델  
Fig. 4. Composed induction motor model

### 4. 인버터 모델링

인버터에 의한 유도전동기를 해석하기 위해서는 적절한 인버터 모델이 필요하다. 인버터는 6개의 스위치와 스위치의 특성, 사용자의 명령에 따른 동작이 가능하여야 한다. 그림 5는 주파수, 전원 크기 뿐 아니라 데드타임, 캐리어(carrier) 주파수 등 필요한 변수를 지정할 수 있도록 개발된 인버터 모델이다.

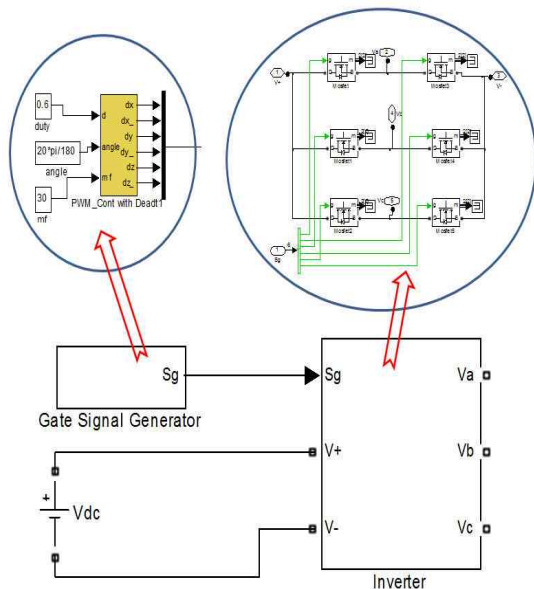
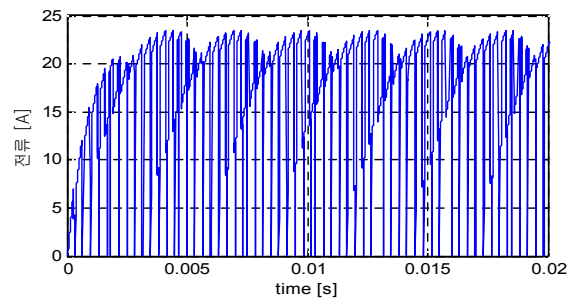
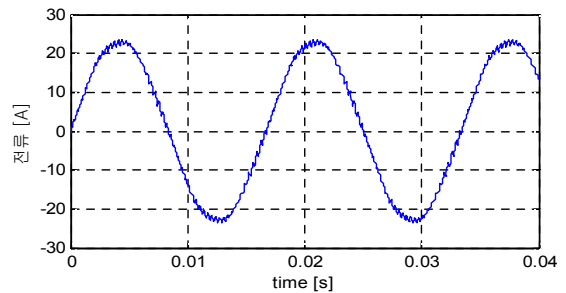


그림 5. 인버터 블럭도  
Fig. 5. Inverter block diagram

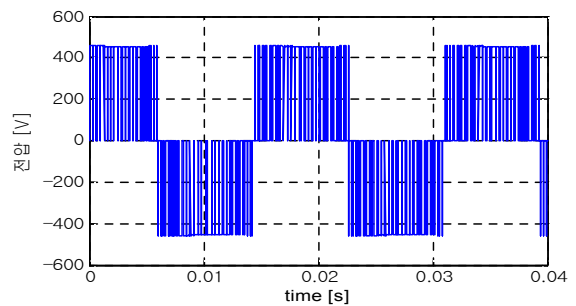
여기서, 게이트 신호 발생기 블록은 듀티(duty), 발생 주파수, 캐리어 주파수뿐 아니라, 데드밴드를 줄 수 있도록 구성하였다. 인버터는 6개의 FET 모델로 구성되어, 게이트 신호 발생기에서 오는 6개의 신호를 받아 PWM을 수행할 수 있도록 하였다. 이 인버터의 출력단은 3상 유도 전동기에 연결되어 전력을 공급한다.



(a) DC 링크 전류 파형  
(a) DC link current waveform



(b) 상 전류  
(b) Phase current



(c) 부하 선간전압  
(c) Load line to line voltage

그림 6. 3상 R-L 부하에 대한 인버터 출력  
Fig. 6. Inverter output for 3 phase R-L load

그림 6은 인버터의 특성을 파악하기 위해 3상 부하를 걸어 시뮬레이션한 결과이다. 출력 단자에 3상 부하를 연결하여 시뮬레이션 할 수 있으며, 그림 6 (a)는 직류링크에서 흘러 나가는 전류의 파형이며, 그림 6 (b)는 부하에서 흐르는 상전류 파형, 그림 6 (c)는 부하에 인가되는 선간전압 파형을 보여주고 있다. 여기서, 게이트 신호는 듀티 60[%], 기본 주파수 60[Hz], 캐리어 주파수 1.8[kHz]로 각 게이트에 인가되며, 직류링크 전압 460[V]이며, 부하의 상당 저항과 인덕턴스는 각각 10[Ω]과 10[mH]이다. 예상한 바와 같이 PWM에 의한 전원이 인가되어 상전압, 선전류 등의 파형을 볼 수 있다.

### 5. 시뮬레이션 및 결과

대상 전동기는 7.5[kW]이며, 파라미터는 표 1과 같다. 저항, 인덕턴스 및 커패시턴스 단위는 각 [Ω], [H] 및 [F]이다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters

고정자저항 $R_s$	0.68	자화인덕턴스 $L_m$	0.14
회전자저항 $R_r$	0.45	와전류저항 $R_c$	7320
고정자인덕턴스 $L_s$	0.0548	전방대지저항 $R_f$	11
회전자인덕턴스 $L_r$	0.0548	대지커패시턴스 $C_g$	$10^{-9}$

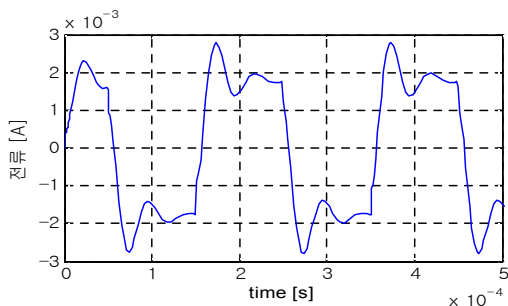


그림 7. CIM 모델 단상 전압 인가시 전류 파형  
Fig. 7. Current waveform in the single phase supply for CIM model

그림 7은 그림 2에서와 같은 조건으로 전압을 인가했을 때의 전류 파형이다. 인가 삼각파 전압은  $15[V_{pp}]$

이고, 주파수는 5[kHz]이다. 전류의 파형, 피크값, 진동 주파수가 거의 일치함을 볼 수 있으며, 고주파 특성 해석으로도 적용 가능함을 알 수 있다.

그림 8은 제안 모델에 3상 정현파 전원을 인가한 경우 블록도이다. 전원이 정현파이기 때문에 고주파 요소는 전동기 특성에 큰 영향을 미치지 않게 된다. 그림 9는 제안 모델에 인버터 전원을 인가한 경우이다.

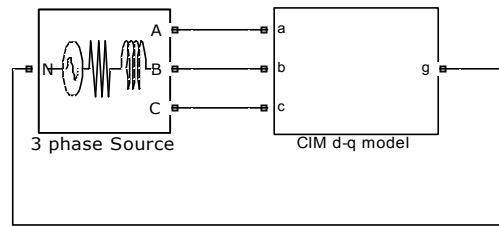


그림 8. 3상 전원이 인가된 복합 유도기 모델  
Fig. 8. Combined IM model supplied 3 phase source

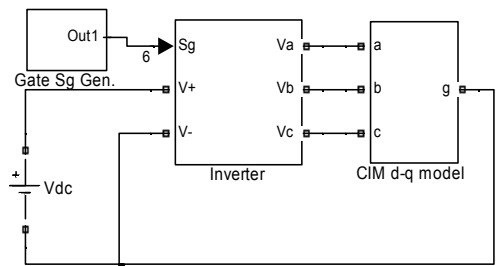
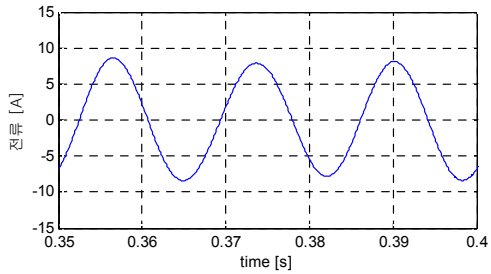
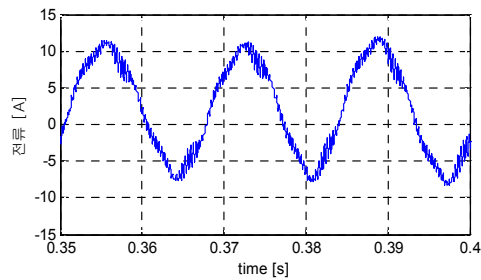


그림 9. 인버터 구동 복합 유도기 모델  
Fig. 9. Inverter-fed combined IM Model

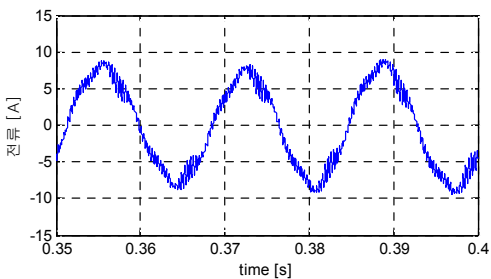
이 경우는 인버터의 기본 주파수뿐 아니라, 스위칭에 따른 고주파가 같이 인가되기 때문에 고주파 성분 에 의한 영향을 평가할 수 있다. 기존의 일반 모델은 대지간 누설을 고려하지 않았기 때문에 그림 에서의 대지 간에 흐르는 전류를 계산할 수 없다. 이들에 대한 계산 결과가 다음과 같다. 그림 10 (a)는 그림 8과 같이 3상 정현파 전원이 인가된 경우의 정상 상태에서의 전류파형이다. 전원이 정현파이므로, 흐르는 전류도 거의 정현파이다. 그림 10 (b)는 CIM 모델, 그림 10 (c)는 일반 IM 모델의 전류파형으로 대체적으로 유사한 파형을 보이고 있다.



(a) 정현파 전원시 상전류 파형  
(a) Phase current waveform for sinusoidal voltage



(b) 인버터 전원에 의한 IM 상전류파형  
(b) IM phase current waveform for inverter source



(c) 인버터 전원에 의한 CIM 상전류파형  
(c) CIM phase current waveform for inverter source

그림 10. 유도전동기 상전류 파형  
Fig. 10. Phase current waveform for induction motor

그림 11은 대지간 전류 파형이다. 고조파 모델의 타당성을 확인한 바탕으로 그림과 같은 누설전류가 흐르게 됨을 시뮬레이션 결과로부터 예측할 수 있다. 피크치는 매우 크지만, 폭이 0에 가까운 임펄스 형태이기 때문에 에너지는 매우 작다. 그림 12는 대지 누설을 고려한 경우의 인버터 운전에 대한 DC 링크 전류 파형이다. 대지간 용량성 성분 때문에 그림 11과 같은

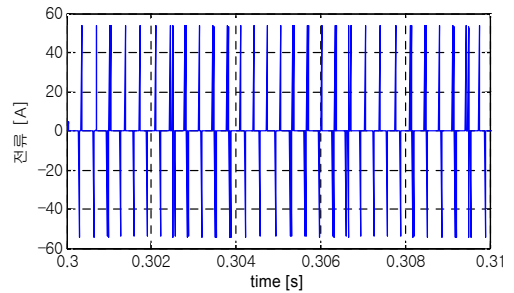


그림 11. 대지 누설 전류 파형  
그림 11. Leakage current to ground waveform

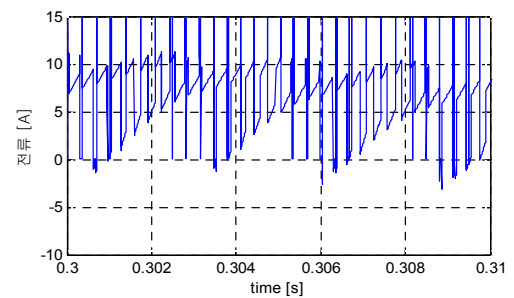


그림 12. CIM 모델에서 직류 링크 전류 파형  
Fig. 12. DC link current waveform of CIM model

대지 누설 전류가 더해지고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 유도 전동기와 대지간 커패시터 성분을 고려하여 이를 고려할 수 있는 통합 유도전동기 모델을 개발하였다. 또한, 각종 파라미터를 고려할 수 있는 인버터 모델도 개발하였다. 개발된 모델은 단순히 고조파 인가에 따른 특성 해석으로부터 유도기의 인버터 운전에 이르기 까지 유도 전동기에 관련된 제반 특성을 해석할 수 있게 되었다. 이의 타당성을 위하여 고조파 특성에 대하여는 기존 실험 결과들과 비교하였으며, 이로부터 제반 특성을 시뮬레이션하였다. 추후 연구로는 본 연구에서의 연구 결과를 실험을 통하여 확인하는 것이 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임.(2008-0100)

[5] 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 CEFC '2000, p.404, June 2000, Milwaukee, USA.

[6] Chee-Mun Ong, Dynamic simulation of electric machinery, Prentice Hall PTR, 1998.

References

[1] A. Boglietti and E. Carpaneto, "Induction motor high frequency model", IEEE-IAS Annual Meeting, pp.1551-1558, October 2000.

[2] A. Consoli, G. Oriti, A. Testa, A.I. Julian, "induction motor modeling for common mode and differential mode emission evaluation", IEEE-IAS Annual Meeting, pp.595-599, 6-10 October 1996, S. Diego, USA.

[3] 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, pp.1105-1113, Sep./Oct. 1996.

[4] C.J. Melhorn, L. Tang, "Transient effects of PWM drives on induction motors", IEEE Transactions on Industry Application, Vol.33, No.4, pp.1065-1072, July/August 1997.

◇ 저자소개 ◇



홍선기(洪瑄基)

1965년 1월 24일생. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1995년 렉스산전 선임연구원. 1995년~현재 호서대학교 시스템 제어

공학과 교수.