

# 유도전동기 드라이브 시스템의 효율성능을 예측하기 위한 손실 모델링

정동화<sup>†</sup> · 박기태 · 이정철

순천대학교 공과대학 전기제어공학과  
(2000. 8. 7. 접수 / 2000. 12. 20. 채택)

## Loss Modeling in order to Predict the Efficiency Performance of Induction Motor Drive System

Dong-Hwa Chung<sup>†</sup> · Gi-Tae Park · Jung-Chul Lee

Department of Electrical Control Engineering, Sunchon National University  
(Received August 7, 2000 / Accepted December 20, 2000)

**Abstract :** The precise and reliable loss model for induction motor and converter system is very important in order to predict the efficiency performance of variable speed drives. This paper proposes an accurate loss model of induction motor and converter system. The motor losses, such as stator and rotor copper loss, core loss and stray loss, are considered for fundamental and harmonic frequencies. Also considered are the skin effect on rotor resistance, temperature effect on both stator and rotor resistance, magnetizing inductance saturation, and friction and windage loss. All the above features are incorporated in a synchronous frame dynamic d-q equivalent circuit. The converter system, consisting of a diode rectifier and PWM transistor inverter, is modeled accurately for conduction and switching losses. Validity of the models, in both steady state and transient conditions, is verified by simulations.

**Key Words :** loss modeling, induction motor, efficiency performance, harmonic circuit

### 1. 서 론

정확하고 신뢰성있는 유도전동기와 변환기 시스템의 손실 모델은 가변속 드라이브의 성능을 예측하는데 매우 중요하다. 특히 퍼지제어에 기초한 효율 최적화제어의 성능을 예측하기 위하여 유도전동기의 과도동작 및 손실 특성, 변환기의 손실 모델이 반드시 필요하다. 전력용 반도체로 구성된 스위칭소자는 고속으로 동작하고 매우 민감하며 스위칭손실이 많이 나타난다. 또한 펄스신호에는 고조파가 많이 포함되어 있으며 드라이브 시스템과 유도전동기에 다양한 손실을 유발시킨다. 펄스신호의 오동작으로 단락사고, 점호실패 및 전력불균형 등을 초래하여 산업계의 전력전자 기기에 안전을 위협하고 있다. 따라서 이러한 사고를 미연에 방

지할 수 있는 시스템의 제어성능 및 효율 향상이 매우 중요하다. 효율은 손실의 식으로 표현되므로 손실의 최소화는 효율의 최대화를 얻을 수 있다. 따라서 효율성능을 예측하기 위하여 정확한 손실 모델에 대한 연구가 필요하다.

유도전동기의 손실현상이 매우 복잡하므로 종래의 연구는 드라이브 시스템의 전체의 손실보다 관심있는 특정 부분에 대하여 손실모델링을 하였다. Jordan<sup>1)</sup>은 고조파전류와 등가회로에 의한 손실을 계산하는 중첩의 원리를 적용하였으며 Kawagishi<sup>2)</sup>는 고 주파수 전력원을 사용하여 파라미터에 의존하는 주파수를 실험적으로 입증하였다. 또한 McMurray<sup>3)</sup>은 턴온과 턴오프 서너버의 영향을 고려하여 스위칭손실을 해석하였으며 Jovanovich<sup>4)</sup>는 여러 베이스 드라이브 및 부하조건에 의한 전력소자의 스위칭 특성과 손실을 실험적으로 평가하였다. Ikeda<sup>5)</sup>는 PWM 인버터의 손실 모델링 및 인버터 손실에서 나타나는 캐리어 주파수의 영향을 제시하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
hwa777@sunchon.ac.kr

최근에는 Jimo<sup>6)</sup>는 유도기에서 표류부하손의 열적 영향을 분석하였으며 Bousbaine<sup>7)</sup>는 유도전동기에서 나타나는 철손과 표류부하손을 측정하는 새로운 연구를 하였다. 그러나 이러한 대부분의 기존 연구들은 부분적인 손실을 구하는데 관심을 가졌으며 드라이브 시스템의 전체적인 손실은 언급하지 않고 있다.

이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 고정자와 회전자 동손, 철손 및 표류부하손과 같은 유도전동기의 전기적인 손실을 기본파 및 고조파에서 고려한다. 또한 회전자저항의 포피효과, 고정자와 회전자의 온도의 영향, 자화 인덕턴스의 포화현상 및 마찰과 풍손도 구한다. 다이오드 정류기와 PWM 트랜지스터 인버터로 구성된 컨버터 시스템은 도통과 스위칭손실을 위하여 정확하게 모델링 한다. 효율성을 예측하기 위하여 DC 링크 전류와 전력도 분석한다. 그리고 부하 및 속도의 변화에 대한 유도전동기와 컨버터의 손실도 구하며 이 때 나타나는 효율도 분석한다. 따라서 본 연구에서 효율성을 예측하며 제시한 모델의 타당성을 입증한다.

## 2. 유도전동기의 과도 손실모델

### 2.1. 유도전동기의 손실

고정자 및 회전자 권선의 동손은 저항손으로 나타난다. 철손은 전동기의 철심에서 시변 자속에 의하여 발생하는 히스테리시스 및 와류손으로 구성된다. 전기철손은 다음 식으로 표시되며  $k_h$ ,  $k_e$ 는 히스테리 손실 및 와류 손실의 계수이다.

$$P_c = P_{cs} + P_{cr} = \left[ k_h \left( \frac{1+s}{f} \right) + k_e (1+s^2) \right] f^2 \psi_m^2 \quad (1)$$

여기서  $\psi_m$ 는 최대 상호 자속쇄교수,  $f$ 는 공급 주파수이며  $s$ 는 슬립이다.

기본파 등가 철손 저항은 다음과 같다.

$$R_m = \frac{1}{k_c \left[ k_h \left( \frac{1+s}{f} \right) + k_e (1+s^2) \right]} \quad (2)$$

표류부하손은 본질적으로 히스테리시스 및 와류손에 기인하며 성층 철심에서 누설 자속 및 전동기의 구조부분 등에서 유도된다. 고정자 표류부하

손은 고조파 주파수에서 다음과 같다.

$$P_{sln} = k_{sln} \left[ \frac{k_h}{f_n} + k_e \right] V_{sln}^2 \quad (3)$$

여기서  $V_{sln}$ 는 고정자 누설인덕턴스를 통과하는 전압이며  $k_{sln}$ 은 표류부하손의 상수이다.

기본파 표류부하손 저항은 고정자 누설 리액턴스와 직렬로 된 저항으로 표현하면 다음과 같다.

$$R_{s11} = k_{s11} [k_n f + k_e f^2] \quad (4)$$

여기서  $R_{s11}$ 은 등가 직렬저항이다.

마찰 및 풍손은 전동기속도의 함수이며 공급전력의 형태와 무관하다. 고정자와 회전자의 저항은 온도의 영향에 의해 변화하며 정확하게 수정할 수 있다. 정확한 온도저항은 기본파와 고조파 동손을 계산하는데 사용된다. 포화는 누설 및 자기 인덕턴스에서 나타나며 자화전류의 미소 선형함수에 의해 자기 인덕턴스를 표현한다.

$$L_m = L_{m0} \quad \text{if } I_m \leq I_{m0} \\ = L_{m0} - m(I_m - I_{m0}) \quad \text{if } I_m > I_{m0} \quad (5)$$

여기서  $L_{m0}$ 는 불포화 인덕턴스이고  $I_m$ 은 포화 초기의 자화전류이다.  $m$ 은 포화계수이다.

실제적인 고조파 표류부하손 저항은 고정자에서는  $R_{ssn}$ 이고 회전자에서는  $R_{rsn}$ 으로 표현한다.

### 2.2. 유도전동기의 고조파손실 모델

고조파영향을 고려하여 등가회로를 설계한다. 각 고조파분에 대하여 회로를 구성하며 모든 고조파영향을 얻기 위하여 중첩의 원리를 적용한다. Fig. 1로 회전하는 기준축에서 손실  $d-q$  축의 등가 회로이다.

Fig. 1에서 전압과 전류방정식을 구하고 이를 미분 상태방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{qs1} \\ P_{qs2} \\ P_{qs3} \\ P_{qs4} \\ P_{qs5} \\ P_{ds1} \\ P_{ds2} \\ P_{ds3} \\ P_{ds4} \\ P_{ds5} \\ P_{is} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & 0 & a_{18} & a_{19} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & 0 & a_{28} & a_{29} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & 0 & a_{38} & a_{39} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & 0 & a_{48} & a_{49} & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 & a_{58} & a_{59} & 0 \\ -a_{16} & 0 & -a_{18} & -a_{19} & 0 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ -a_{26} & 0 & -a_{28} & -a_{29} & 0 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ -a_{36} & 0 & -a_{38} & -a_{39} & 0 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ -a_{46} & 0 & -a_{48} & -a_{49} & 0 & a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ -a_{56} & 0 & -a_{58} & -a_{59} & 0 & a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qs3} \\ i_{qs4} \\ i_{qs5} \\ i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{ds3} \\ i_{ds4} \\ i_{ds5} \\ i_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & 0 \\ b_{31} & 0 \\ b_{41} & 0 \\ b_{51} & 0 \\ b_{11} & 0 \\ b_{21} & 0 \\ b_{31} & 0 \\ b_{41} & 0 \\ b_{51} & 0 \\ b_{11} & 0 \\ b_{21} & 0 \\ b_{31} & 0 \\ b_{41} & 0 \\ b_{51} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs1} \\ v_{qs2} \\ v_{qs3} \\ v_{qs4} \\ v_{qs5} \\ v_{ds1} \\ v_{ds2} \\ v_{ds3} \\ v_{ds4} \\ v_{ds5} \\ v_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

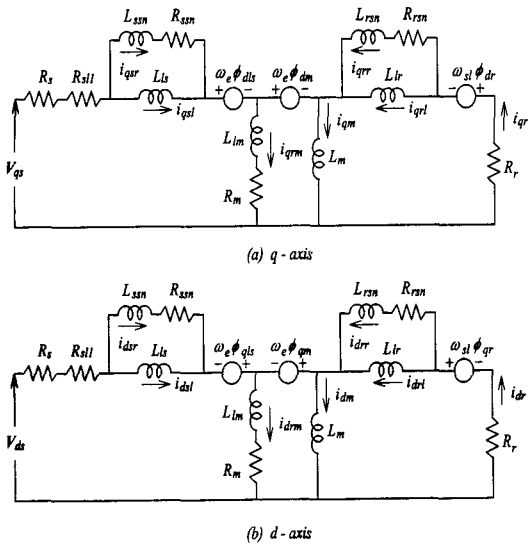


Fig. 1. Lossy *d-q* axis equivalent circuits in synchronously rotating reference frame

### 3. 컨버터 시스템의 손실모델

#### 3.1. 다이오드 정류기의 손실 모델링

Fig. 2(a)는 정류기회로를 테브난 등가회로를 나타낸다. 여기서  $V_r$ 는 이상적인 정류기 전압,  $L_d$ 는  $2L_b$ ,  $L_b$ 은 상당 전원 누설 인덕턴스이다. 일반적인 DC 링크전압과 전류 파형은 Fig. 2(b)과 같다. 다이오드의 도통 전압강하는 다음 식으로 표시된다.

$$V_{dd} = V_{d0} + K i_d^m \quad (7)$$

여기서  $V_{d0}$ 는 옴셋 전압이며  $m$ 은 저항강하지수이다.

다이오드 브리지에 대한 순시 도통손실은 다음과 같다.

$$P_{dd} = 2 V_{dd} i_d \quad (8)$$

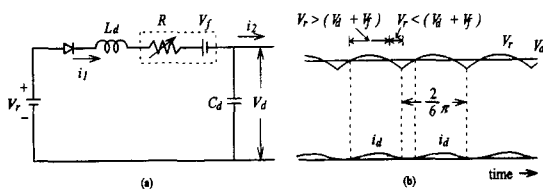


Fig. 2. Diode rectifier equivalent circuit and voltage and current waves

순시 정류기의 입출력은 다음과 같다.

$$P_{irr} = V_r i_d \quad (9)$$

$$P_{ior} = V_d i_d \quad (10)$$

#### 3.2. PWM 인버터의 손실 모델링

일반적인 피드백 다이오드와 서너버로 구성된 상A의 인버터는 Fig. 3(a)이고 도통손실의 등가회로는 Fig. 3(b)와 같다.

트랜지스터 도통 전압강하는 다음 식으로 표시된다.

$$v_{td} = v_{t0} + R_t i_c \quad (11)$$

상A의 PWM 논리신호가 ON( $G_A=1$ )되고 상전류  $i_a$ 가 양의 반주기 동안에는 트랜지스터  $Q_1$ 이 도통되므로 상A의 상전압은 다음 식으로 표시된다.

$$v_{ag} = V_d - v_{tda} \quad (12)$$

상A의 PWM 논리신호가 ON( $G_A=1$ )되고 상전류  $i_a$ 가 음의 반주기 동안에는 피드백 다이오드  $D_1$ 이 도통되므로 상A의 상전압은 다음 식으로 표시된다.

$$v_{ag} = V_d + v_{dda} \quad (13)$$

상 A에서 트랜지스터의 도통손실은 다음과 같다.

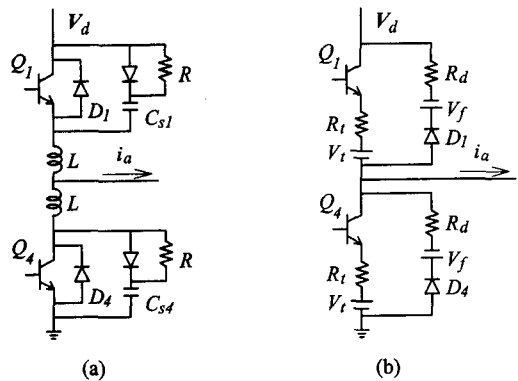


Fig. 3. Inverter of A phase (a) Transistor inverter A phase (b) Conduction loss equivalent circuit

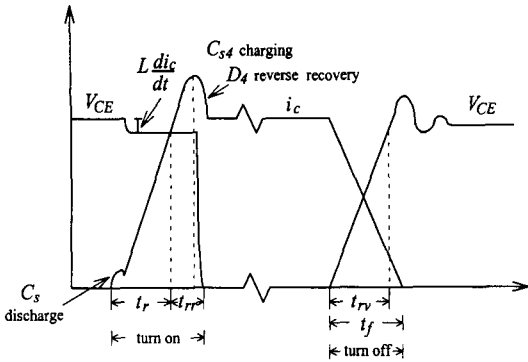


Fig. 4. Typical turn-on and turn-off switching waves for transistor  $Q_1$ .

$$P_{cta} = (V_d - v_{og}) i_a \quad \text{if } G_A = 1$$

$$= -v_{og} i_a \quad \text{if } G_A = 0 \quad (14)$$

이와 같이 다른 두상에 대하여도 유사한 결과를 얻을 수 있으며 전 순서 도통손실은 3개의 성분의 합으로 구한다.

일반적인 턴온과 턴오프 스위칭 파형은 Fig. 4과 같다. 스위칭동안 에너지 손실은 곡선  $V_{ce}$ 와  $i_c$  곱의 영역에 관계된다. 캐리어파의 매 주기에서 스위칭 손실은 캐패시터 서너버의 두번 방전과 한번의 턴온 손실 및 턴오프 손실에 의해 나타난다.

3상에 대한 평균 트랜지스터의 턴오프 전력손은 다음과 같다.

$$P_{loff} = 3K_{off} V_d (N_s / 2) I_{av} f \quad (15)$$

여기서  $N_s / 2$ 는 기본 주파수의 한 주기에서 컨버터단 손실 턴오프의 수이다. 턴오프 파라미터  $K_{off}$ 는 다음과 같다.

$$K_{off} = \frac{t_f}{2} \left( 1 - \frac{4t_{rv}}{3t_f} + \frac{1}{2} \left( \frac{t_{rv}}{t_f} \right)^2 \right) \quad (16)$$

턴오프 손실의 계산과 유사한 방법으로 턴온 전력손실을 구하면 다음과 같다.

$$P_{lon} = 3K_{on} V_d (N_s / 2) I_{av} f \quad (17)$$

턴온 상수  $K_{on}$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$K_{on} = \frac{t_{rv}}{2} \left( 1 - \frac{4t_r}{3t_{rv}} + \frac{1}{2} \left( \frac{t_r}{t_{rv}} \right)^2 \right) \quad (18)$$

여기서  $t_r$ 는 콜렉터 전류의 상승시간이며  $t_{rv} = t_r + t_{rr}$ 는 전압  $V_{ce}$ 의 강하시간이다.

#### 4. 해석결과

Fig. 5는 정지상태의 속도를 0.25초에서 1800 (rpm) 속도로 상승시키고 무부하에서 PI 제어기에 대한 시스템의 응답을 나타낸다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도, (b)는 DC 링크전압, (c)는 DC 링크 전류 및 (d)는 DC 링크전력을 나타낸다. 실제속도와 전류는 지령속도와 전류에 양호하게 추종되고 있으며 DC 링크전압과 전류는 정류기의 손실에 의해 맥동이 나타나고 있다. 기본적으로 DC 링크전압  $v_d$ 가 일정하므로  $P_d$ 의 최소화는 DC 링크전류  $i_d$ 의 최소화로 대체하여 사용 가능하다. 정류기의

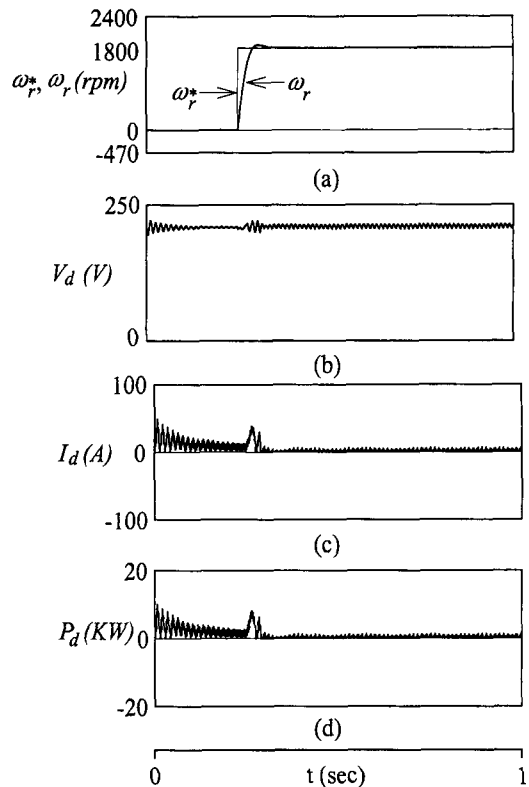


Fig. 5. Response of system with step of command speed

손실은  $i_d$ 에 비례하기 때문에 최소  $i_d$ 는 정류기 손실을 최소화하고 결과적으로 입력을 최소화한다. 전 손실이 최소가 되는 점이 효율이 최대가 되며 또한 이 점에서  $P_d$ 가 최소가 된다. 따라서 효율성능을 예측하기 위해서는 손실을 파악해야 하며  $P_d$ 와  $i_d$ 의 분석도 필요하다.

Fig. 6은 부하토크와 속도의 조건의 변화에 대한 정상상태의 시스템 응답을 나타낸다. 그림(a)는 유도전동기의 전 손실을 나타내며 일정속도에서 부하토크가 증가하면 손실이 증가한다. 이는 기본파 동손과 표류부하손이 증가하기 때문에 나타나는 결과이다. 일정 부하토크에서 속도가 증가하면 손실도 증가한다. 이는 철손, 마찰과 풍손이 증가하기 때문에 나타나는 결과이다. 그림(b)는 그림(a)와 같은 부하토크와 속도의 조건에서 전 컨버터 손실을 나타낸다. 일정 부하조건에서 속도를 증가했을 경우 컨버터의 손실은 일정속도에서 토크를 증가했을 경우의 손실보다 더욱 많은 영향을 받는다. 정격

자속에서 전동기의 전류는 부하토크의 함수이며 실질적으로 속도와 무관하다. 그러므로 인버터 손실은 대부분 전동기전류에 의해 나타나며 주로 부하토크에 영향을 받는다. 그러나 다이오드 손실은 DC 링크전류의 함수이므로 전동기의 속도와 토크에 의해 영향을 받는다. 그림(c)는 다양한 속도와 토크 조건에서 전 시스템의 효율을 나타낸다: 전동기는 정격 토크와 속도에서 최적효율이 나타나도록 설계되어 있기 때문에 최적효율 점은 정격 토크의 방향으로 이동할 수 있는 결과를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 속도는 대부분 1800[rpm]보다 저속이기 때문에 기준속도 근방에서 DC 링크전압은 PWM 동작을 강제화시킬 수 있을 만큼 충분히 높지 않다.

Fig. 7은 과도상태일 경우 자속의 응답특성을 나타낸다. 그림(a)는 d축 스텝 지령전류이며 그림(b)와 (c)는 자속의 응답특성을 나타낸다. 그림(b)는 종래 d-q모델의 결과이며 그림(c)는 본 논문에서 제시한 손실 d-q모델이다. 제시모델이 종래모델보다 상승시간이 짧고 고속으로 추종한다. 이는 제시모델에서는 온도영향에 기인한 회전자저항이 증가하지만 종래모델은 이를 무시하였다. 그리고 철손과 회전자 표류부하손은 회전자 누설 인덕턴스가 감소하면 회전자저항이 증가하는 과도상태의 영향을 받는다. 회전자 시정수의 감소는 전동기 파라미

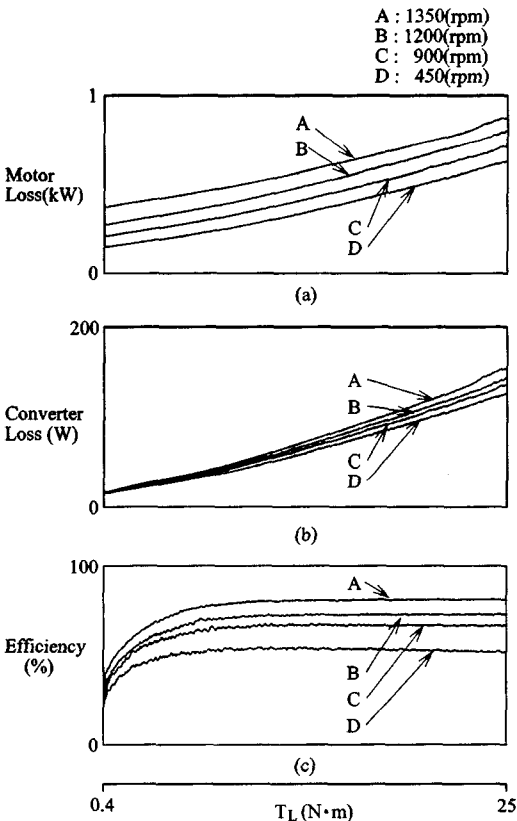


Fig. 6. Steady state performance

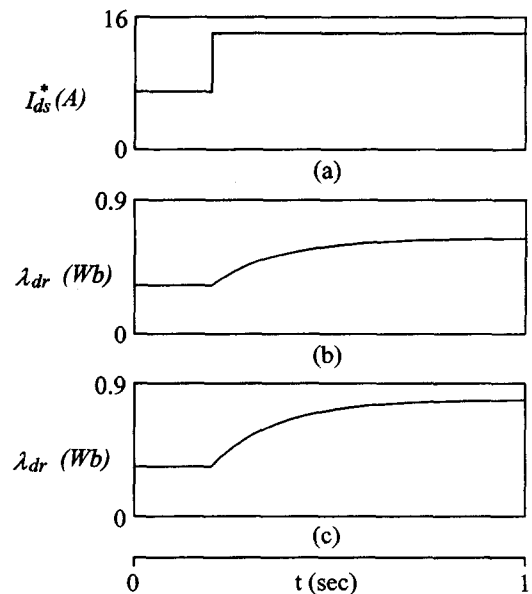


Fig. 7. Rotor flux responses at constant speed

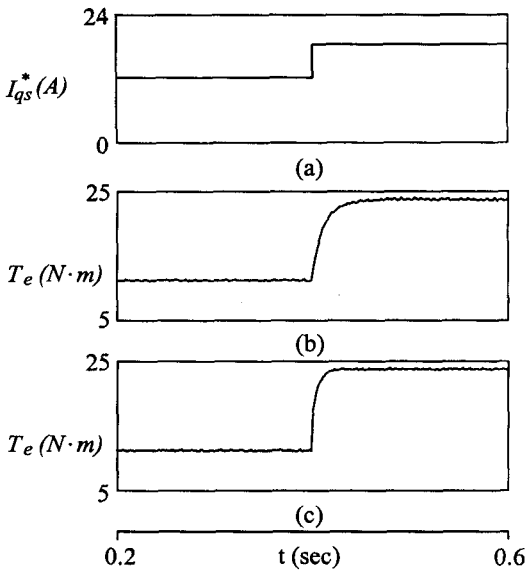


Fig. 8. Torque responses at constant speed

터의 적절한 추정을 할 수 있다. 정상상태에서 회전자속은 제시모델에서 크게 나타난다. 이는 종래모델에서는 자화 인덕턴스에 기인한 포화의 영향을 무시하였기 때문이다.

Fig. 8은 과도상태일 경우 발생토크의 응답특성을 나타낸다. 그림(a)는 q축 스텝 지령전류이며 그림(b)와 (c)는 토크의 응답특성을 나타낸다. 그림(b)는 종래 d-q모델의 결과이며 그림(c)는 본 논문에서 제시한 손실 d-q모델이다. 토크의 응답특성에서도 제시모델이 종래모델보다 상승시간이 짧고 고속으로 추종한다.

### 5. 결론

유도전동기 드라이브의 제어방법을 명확하게 하고 시스템의 효율성을 예측하기 위하여 상세하게 손실을 모델링하였다. PWM 인버터로 제어되는 유도전동기의 동손, 철손 및 표류부하손의 해석과 모델링을 하였다. 회전자저항의 표피효과, 권선저항의 온도영향 및 자화 인덕턴스의 포화현상을 모델링하였다. 유도전동기의 새로운 동기축 d-q축 손실 등가회로를 설계하고 손실 현상과 동작특성을 분석하였다. 다이오드 브리지 정류기와 PWM

트랜지스터 인버터로 구성된 도통 및 스위칭 손실을 모델링하였다.

효율성을 예측하기 위하여 DC 링크 전류와 전력도 분석하였다. 그리고 부하 및 속도의 변화에 대한 유도전동기와 컨버터의 손실도 구하였으며 이때 나타나는 효율도 분석하였다. 과도상태에서 d축 전류를 스텝지령을 인가하여 제시한 손실 d-q모델을 종래 d-q모델과 비교하였다. 제시모델의 자속이 종래모델보다 추종성능에서 상승시간이 짧고 고속으로 추종하였다. 토크의 응답특성도 제시모델이 양호한 결과로 나타났다. 따라서 본 연구의 결과로 효율성을 예측할 수 있었으며 제시한 모델의 타당성을 입증할 수 있었다.

**감사의 글 :** 본 논문은 기초전력연구소 주관으로 한국전력공사의 지원을 받아 수행한 전력기술 기초 연구 과제임.

### 참고문헌

- 1) H. E. Jordan and E. A. Klingshirn, "Polyphase induction motor performance and losses on nonsinusoidal voltage sources," IEEE Summer PMCR, pp. 624 ~ 631, 1967.
- 2) K. Kawagishi, M. Udaka and M. Akamatsu, "Frequency dependency of induction motor parameters and their measuring method", Int'l PECC, Tokyo, pp. 202 ~ 213, 1983.
- 3) W. McMurray, "Selection of snubbers and clamps to optimize the design of transistor switching converters," IEEE Trans. on IA, vol. 16, pp. 513 ~ 523, July/Aug. 1980.
- 4) M. M. Jovanovic, F. C. Lee and D. Y. Chen, "Characterization of high power BJT's for motor drive application," IEEE IAS, pp. 440 ~ 447, 1986.
- 5) Y. Ikeda, J. Itsumi and H. Funato, "The Power loss of a PWM voltage fed inverter," PESC Conf. Rec. pp. 277 ~ 283, 1988.
- 6) A. A. Jimoh, "Thermal effect of stray load losses in induction machines," IEEE IAS pp. 481 ~ 488, 1999.
- 7) A. Bousbaine, et al., "Novel approach to the measurement of iron and stray load losses in induction motor," Proc. IEE, vol. 4, pp. 143 ~ 147, 1996.