

인버터 파형 변화에 따른 유도전동기의 손실 특성 고찰

백수현* 윤신용* 김성철** 김필수**
 *동국대 전기공학과 **충청전문대학

The Consideration for the Loss Characteristics accompanied by Variation of Inverter waveform in Induction Motor

Soo-Hyun Baek* Shin-Yong Youn* Seong-Cheol Kim** Pill-Soo Kim**
 *Dept. of Electrical Engineering, Dongguk Univ. **Chung-Cheong College

Abstract - An additional consideration for using general Induction Motor are about copper loss by harmonic component of source, and increase of iron loss due to switching frequency in semiconductor devices, so that these losses come to be significant elements on design for motors used for variable V/F.

In this paper, therefore, the effects of the losses are discussed, in the case the source is generated by square wave and PWM Inverter.

1. 서론

유도전동기는 소형, 경량이며 가격이 저렴하고 고속회전 특성이 우수하고 유지 및 보수가 간편하다는 등 직류전동기에 비해 우수한 특성을 지니고 있어 일반 산업체 및 공장 등의 산업용으로 간단한 개루프(open loop) 시스템에서 벡터 제어(vector control) 시스템에 이르기까지 폭넓게 이용되고 있다.

일반적으로 유도전동기의 가변속제어 시스템에 있어서 제어장치로는 전력용 반도체 소자를 이용한 인버터가 주로 사용되고 있는데, 이때 고려해야 할 문제 중의 하나는 전원의 고조파 성분에 의한 동손과 반도체 소자의 스위칭에 기인한 철손의 증가이며, 이와같은 손실은 가변속 구동 유도전동기의 특성에 큰 영향을 미치게 된다.

따라서 본 논문에서는 구형파 전압원 및 PWM 인버터에 의해 구동되는 유도전동기에 대해 동손 및 철손을 구하여 비교함으로써 유도전동기에서 발생하는 실질적인 손실에 대해 고찰하고자 한다.

2. 유도전동기의 수학적 모델링

유도전동기의 전압방정식은 식(2-1)의 행렬식의 형태로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + SL_s & w_e L_s \\ -w_e L_s & R_s + SL_s \\ SL_m & (w_e - w_r) L_m \\ -(w_e - w_r) L_m & SL_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

여기서, S는 라플라스 연산자(Laplace operator)이다. 농형 유도전동기는 회전자 권선이 단락되어 있으므로 v_{qr} , v_{dr} 은 0 이며, 회전자의 속도 w_r 이 일정하고 입력변수 v_{qs} , v_{ds} , w_e 을 알고 있다면, 전류 i_{qs} , i_{ds} , i_{qr} , i_{dr} 을 구할 수 있다.

3. 인버터-유도전동기 시스템

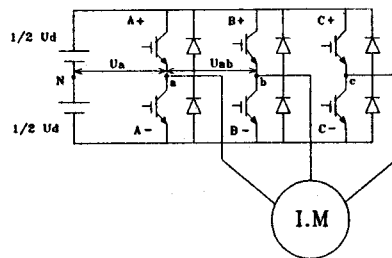


그림3.1 IGBT를 사용한 3상 전압형 인버터의 회로도

그림 3.1은 3상 인버터의 구성을 나타낸다. 그림 3.1에서 N 은 DC공급전압 U_d 의 이론적인 중성점을 나타낸다. 스위칭 소자 A+, B+, C+ 는 PWM파형에서 정전압일 때 동작하며, A-, B-, C-는 부전압일 때 동작한다. 전압 U_a , U_b 는 인버터의 상전압, 전압 U_{ab} 는 인버터의 선간 전압을 나타낸다.

이때 각 유도전동기의 상전압 V_a , V_b , V_c 와 인버터의 출력전압 V_{a0} , V_{b0} , V_{c0} 사이에는 식(3-1)의 관계가 성립된다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

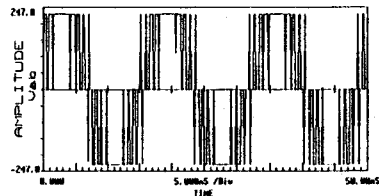


그림 3.2 인버터의 PWM파형

유도전동기의 상전압 v_{as} , v_{bs} , v_{cs} 를 동기 회전좌표계

의 d-q축 성분으로 나타내면 식(3-4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos w_e t & -\sin w_e t \\ \sin w_e t & \cos w_e t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

위 식(3-4)을 이용하여 인버터의 출력전압을 d-q 축으로 변환하여 전압방정식에 대입함에 따라 인버터-유도전동기 시스템을 나타낼 수 있게 된다.[3]

4. 유도전동기의 손실특성

유도전동기의 무부하손실($P_{no-load}$)은 식(4-1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{no-load} = P_{jcu,s} + P_{iron} + P_{jcu,r} + P_{mech} \quad (4-1)$$

여기서, $P_{jcu,s}$ 는 무부하시 고정자 동손, $P_{jcu,r}$ 은 무부하시 회전자 동손, P_{iron} 은 철손, P_{mech} 은 기계손을 나타낸다. 무부하시 고정자 동손 $P_{jcu,s}$ 는 식(4-2)로 표현되며,

$$P_{jcu,s} = 3 R_s I_0^2 \quad (4-2)$$

식(4-2)로부터 $P_{jcu,s}$ 는 서로 다른 전압원(구형파, PWM)으로 구동되는 경우와 하여도 동일하게 된다. 따라서 식(4-1)에서 $P_{jcu,s}$ 의 항은 상수항으로 볼 수 있으며[1], 또한 기계손 P_{mech} 역시 일정한 상수로 볼 수 있으므로, 손실의 비교에서 무시할 수 있다.

따라서 철손과 전류의 고조파성분에 기인한 회전자 동손만이 전압원의 종류에 따라 크게 영향을 받게 되며, 이 두 가지 성분을 해석함으로써 전압원에 따른 유도전동기의 손실을 파악할 수 있다.

4. 1 동손의 영향

유도전동기를 정현 전압원으로 무부하 운전하는 경우, 2차 전류는 무시할 수 있으나 구형파 전압원이나 PWM인버터로 구동하는 경우, 2차측에는 고조파 전류가 유도된다.

그림 4.1과 4.2는 구형파 전압원과 PWM인버터로 구동되는 경우 2차측에 유도되는 전류의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 특히, 그림 4.1로부터 구형파인 경우, 고정자 전류에는 저차 고조파분이 많이 포함되어 있으며, 그림 4.2의 PWM인버터의 경우에는 고조파분이 대부분 제거되어 있음을 볼 수 있다.

무부하시 고정자 전류를 I_0 , 고정자 전류의 기본파분을 I_{01} 이라 할 때, 회전자 전류 I_{harm} 은 식(4-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{harm} = \sqrt{I_0^2 - I_{01}^2} \quad (4-3)$$

따라서 무부하시 회전자 동손은 식(4-4)로 표현된다.

$$P_{jcu,r} = 3 R_r I_{harm}^2 \quad (4-4)$$

식(4-3)에 의해 PWM인버터 구동시의 전류 I_{harm} 은 구형파 구동시에 비해 작게 되며, 그 결과 PWM인버터 구동시 회전자 무부하 동손은 구형파 구동시에 비해 크게 감소된다.

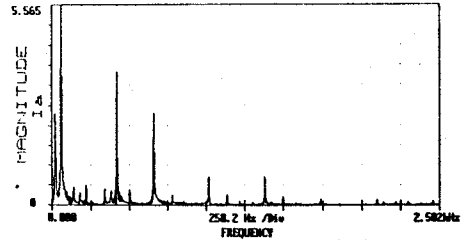


그림 4.1 구형파 구동 시 유도전동기의 고정자측 전류 스펙트럼

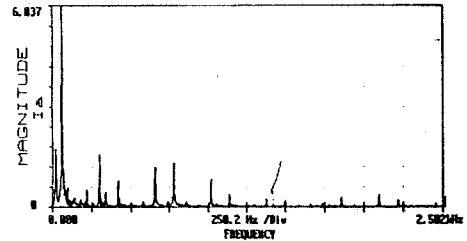


그림 4.2 PWM인버터 구동 시 유도전동기의 고정자측 전류 스펙트럼

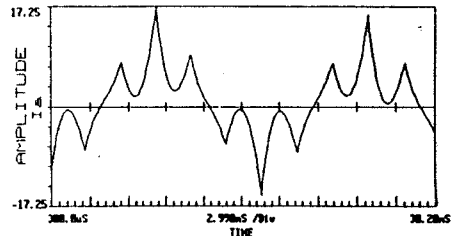
4. 2 철손의 영향

유도전동기에서 철손은 식(4-5)의 와류손(P_e)과 식(4-6)의 히스테리시스손(P_h)의 합으로 표현된다.

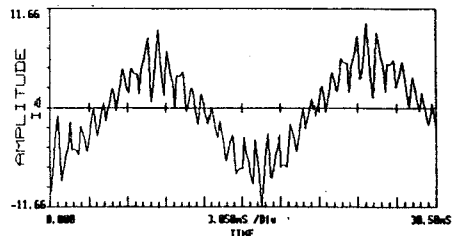
$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \quad (4-5)$$

$$P_h = K_h f B_m^2 \quad (4-6)$$

식(4-5), (4-6)으로부터 철손은 일정전압, 일정주파수의 정현전압원인 경우에는 일정하지만, 구형파 전압원이나 특히 PWM인버터의 경우 스위칭에 따른 고조파로 인하여 유도전동기의 철손이 증가된다. 이런 철손의 증가 원인으로는 그림 4-3의 전류파형에 포함된 리플성분에 의해 발생하는 와류전류(eddy current)에 기인한 것으로 사료된다.[2]



(a) 구형파



(b) PWM

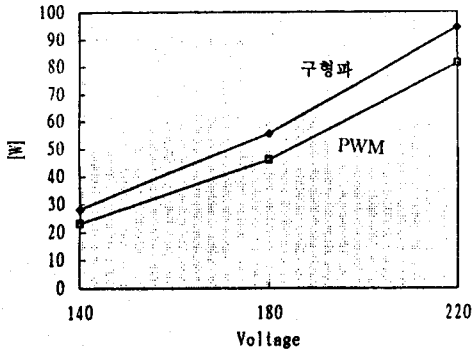
그림 4-3 유도전동기 고정자 전류파형

5. 시뮬레이션 결과

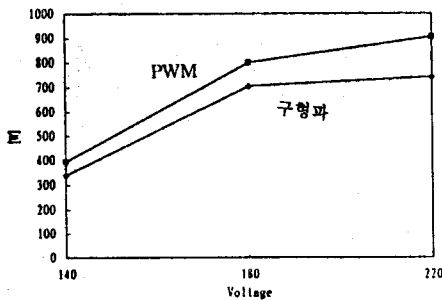
동손에 대한 시뮬레이션 결과로부터, 고정자측의 전류는 입력파형의 종류에 관계없이 6.2 [A]였으며, 또한 식 (4-2)에 의해 고정자측의 동손은 76.67 [W]가 발생하였다.

구형파 전압원의 경우 I_{harm} 은 2.7 [A], $P_{jcu,r}$ 은 17.8 [W]이며, PWM인버터의 경우 I_{harm} = 1.4 [A], $P_{jcu,r}$ 은 4.79 [W]가 된다.

그림 4-4(a)는 동손에 대한 시뮬레이션결과를 나타내며 구형파 전압원의 경우 PWM인버터에 비해 동손의 영향을 더 크게 받는다는 것을 알 수 있으며, 또한 그림 4-4(b)는 철손에 대한 결과로서 PWM인버터의 경우 구형파 전압원에 비해 철손의 영향을 더 받는다는 것을 알 수 있다.



(a) 동 손



(b) 철 손

그림 4-4 전압원에 따른 동손 및 철손의 비교

6. 결 론

본 논문에서는 시뮬레이션 결과로부터, 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- 구형파 전압원으로 구동되는 경우, 손실의 대부분은 동손에 의한 것으로, 그 원인은 전류의 고조파성분에 기인함을 알 수 있었다.
- PWM인버터로 구동되는 경우, 손실의 대부분은 철손에 기인함을 알 수 있었다.
- 구형파 전압원의 경우 PWM인버터에 비해 많은 저차 고조파성분을 포함하지만, 철손의 경우 PWM인버터에 비해 구형파 전압원 에서 작게 발생되므로, 전체 손실의 경우 PWM인버터로 구동될 때 더 크게 됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] A.Boglietti, P.Ferraris, M.Lazzari, F.Profumo, "Energetic Behaviour of Induction Motors Fed by Inverter Supply", IEEE-IAS Annual Meeting 2-8 October 1993, Toronto, CANADA, pp. 331-335
- [2] A.Boglietti, P.Ferraris, M.Lazzari, F.Profumo, "Energetic Behaviour of Soft Magnetic Materials Fed by Inverter Supply", Conf. Rec. IEEE-IAS Annual Meeting'92 4-9 October, 1992, Houston, USA, pp. 54-59
- [3] B. K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, 1986