

7상 BLDC 전동기의 고속 운전시 개선된 진상각 보상 연구

論 文
56-11-9

A Study On the Phase Advance Angle of High Speed Operation for 7 Phase BLDC Motor Drives

金 現 哲[†] · 吳 亨 植^{*} · 金 長 睦^{**} · 金 喆 遇^{***}
(Hyun-Cheol Kim · Hyung-Sik Oh · Jang-Mok Kim · Cheul-U Kim)

Abstract - According to previously published paper the phase advance angle is adopted to the BLDC motor drive with high speed. The report proposed describes the optimum algorithm that phase current is in phase with the initial flat region of back EMF. This report studies the need of more leading phase advance angle compared with in phase concept between phase current and back EMF. In case of high reactance this report proposes the more phase advance angle than in phase. The test results more rms value of phase current and output power due to more phase advance angle than in phase. It will be helped the high power operation of BLDC motor at high speed.

Key Words : high power, 7 phase BLDCM, phase advance angle, high speed

1. 서 론

일반적으로 3상 BLDC 전동기는 산업분야에서 고효율, 고효율, 고정밀 제어분야에 널리 사용되고 있다. BLDC 전동기는 사다리형 역기전력에 사각파 상전류의 곱에 의해 토크를 만들며, 이상적인 경우 전류 파형이 시간 및 공간적으로 120° 위상차에 의해 역기전력과 합성하여 균일한 토크를 만들 수 있어 다른 전동기에 비해 토크 특성에 큰 장점을 갖고 있다. 3상 BLDC 전동기는 고정자 권선의 이용율은 3상 권선 중 항상 2상이 On 되어 있기 때문에 2/3의 권선 이용율을 갖는다. 그러나 7상 BLDC 전동기는 7상 권선 중 항상 6상이 On 되어 있기 때문에 6/7의 권선 이용율을 갖는다. 7상 이상의 상 수로 증가 되는 것은 고정자 권선의 이용율 측면에서는 100%에 가깝게 가져 갈 수 있지만 반면에 스위칭 소자 및 게이트 드라이브의 사용 수량의 증가로 경제성이 낮아져 7상 BLDC 전동기가 가장 적절한 대안으로 채택되고 있다. 세계적으로 개발된 7상 BLDC 전동기의 출력은 100~300[kW] 범위에 사용되고 있다[1]. BLDC 전동기의 고효율화를 위해 고정자 7상 권선외에 전동기 회전수를 고속으로 회전시켜 출력 대 중량 값을 증가시킨다. 국내 및 세계적으로 개발된 7상 BLDC 전동기의 회전수는 25,000[rpm] 범위에 사용되고 있다. 개발된 7상 BLDC 전동기의 설계의 특징은 25,000[rpm] 회전시 약계자 제어를 적용하지 않고 저속도로 설계가 되어 있다.

고출력 BLDC 전동기를 고속으로 회전하면 상권선의 상전류가 교번되는 회전 주파수의 증가로 인해 상권선의 리액턴스가 증가하게 된다. 이 증가된 리액턴스에 의해 역기전력에 대한 상전류의 지연과 함께 상전류를 완만히 상승하게 한다. 기존의 발표된 논문에서는 역기전력에 대한 상전류의 지연된 각만큼을 보상하는 기법을 증가된 회전수만큼 리액턴스에 곱한 비례관계를 적용하여 최적화시키고 있다[2][3]. 이는 지연된 진상각에 의해 보상된 상전류는 역기전력에 대해 동상을 이루는 각(α_1)을 적용한 브리시리스 전동기의 제어 원리와는 일치하는 기법이지만 실제 상권선에 증가된 리액턴스로 인해 완만한 전류 상승에 대해서는 완벽한 보상이 이루어 지지 않는다. 이에 본 논문은 기 제안된 역기전력에 상전류를 동상으로 만드는 기법에 의해 만들어지는 토크보다 더 큰 토크를 만드는 각(α_2)에 대한 기법을 제시하였다. 제안한 방법은 Matlab Simulink를 이용한 7상 BLDC 전동기 드라이브의 시뮬레이션 모델에 근거하여 분석하였고[4], 실험을 통해 검증을 수행하였다. 제안한 모델은 기 논문에서 제안된 시뮬레이션 모델 중 그 효과가 입증된 3상 BLDC 전동기의 시뮬레이션 모델을 근거하여 제시하였다.

2. 7상 BLDC 전동기의 고속 운전시 고효율 운전 연구

2.1 고속 7상 BLDC 전동기 드라이브

BLDC 전동기를 고속으로 운전할 경우, 상권선에 나타나는 리액턴스는 속도가 증가할수록 스위칭 소자의 스위칭 시간이 짧아져 di/dt 에 의한 주파수 상승에 의해 리액턴스 값이 크게 나타난다. 이는 BLDC 전동기를 고속 운전시 속도를 증가할 수록 상권선에 나타나는 리액턴스는 크다고 할 수 있으며, 리액턴스는 결국 역기전력에 대한 상전류의 지연으로 나타난다. 이를 정리한 결과는 그림 1과 같다.

[†] 교신저자, 正會員 : 國防科學研究所 研究員

E-mail : hckim@add.re.kr

^{*} 學生會員 : 釜山大 電氣工學科 大學園 博士科程

^{**} 正 會 員 : 釜山大 電子電氣通信工學部 教授 · 工博

^{***} 正 會 員 : 釜山大 電子電氣通信工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2007年 9月 10日

最終完了 : 2007年 10月 9日

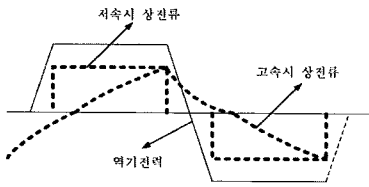


그림 1 저속 및 고속시 상전류 파형 특성
 Fig. 1 Characteristic of phase current waveform for low speed and high speed operation

BLDC 전동기의 고속 운전시 나타나는 상전류의 인덕턴스 효과를 보상하기 위해 커패시터 효과를 주는 상전류의 진상각(phase advance angle)을 적용하여야 하며 이에 대한 개념적 연구는 이미 논문에 발표되어 있다[5].

본 논문에서는 25,000[rpm]으로 고속 회전하는 7상 BLDC 전동기에 대해 시뮬레이션 모델을 연구하기 위해 고속 운전시 나타나는 상전류의 지연을 보상하기 위해 진상각을 적용한 고속 7상 BLDC 전동기 드라이브의 모델은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

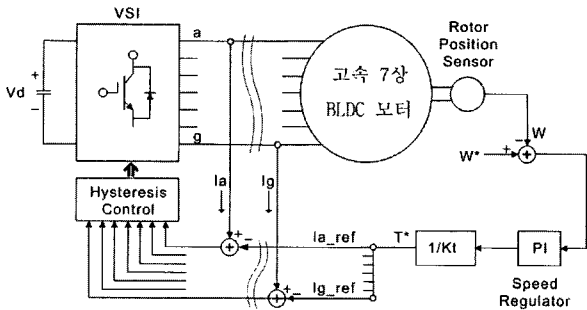


그림 2 고속 7상 BLDC 전동기 드라이브의 제어 블록도
 Fig. 2 Control block of high speed 7 phase BLDC motor drive

2.2 고속시 상권선의 리액턴스 증가 개념

BLDC 전동기의 한개의 상권선에 대해 전압방정식을 나타내어 보면 식 (1)과 같다.

$$v_x = Ri_x + \sum_{k=1}^n \frac{d\psi_{kx}(\theta, i_x)}{dt} \quad (1)$$

여기서 v_x 는 상전압, R 는 상저항, i_x 는 상전류, θ 는 회전자 위치, $\psi_{kx}(\theta, i_x)$ 는 상의 전체 합성자속, n 는 상의 수이다.

$$\psi_1 = L_{11}(\theta, i_1)i_1 + L_{12}(\theta, i_2)i_2 + L_{13}(\theta, i_3)i_3 + \dots + L_{1n}(\theta, i_n)i_n + \lambda_{1r} \quad (2)$$

여기서 $L_{11}(\theta, i_1)i_1$ 은 상 1의 자체 합성자속이고, 2와 3항은 상호 합성자속이고, 마지막 항 λ_{1r} 은 회전자 영구자속에 의한 합성자속이다. BLDC 전동기는 공극이 일정한 표면부착형 영구자석을 갖고 있기 때문에 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화는 없다고 가정한다. 따라서 다음 식 (3)과 같이 간략화할 수 있다.

$$\psi_1 = L_{11}i_1 + L_{12}i_2 + L_{13}i_3 + \dots + L_{1n}i_n + \lambda_{1r} \quad (3)$$

식 (3)을 식(1)에 대해 다시 써 보면

$$v_1 = R_1i_1 + \frac{d}{dt}(L_{11}i_1 + L_{12}i_2 + \dots + L_{1n}i_n) + \frac{d\lambda_{1r}}{dt} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} L_{11} = L_{22} = L_{33} = \dots = L_{nn} = L_s \\ L_{12} = L_{21} = L_{13} = L_{31} = L_{14} = L_{41} = \dots = L_{1n} = L_{n1} = L_m \\ R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n = R \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 L_s 및 L_m 은 자체 및 상호 인덕턴스이다. 식(4)에 대해 다시 나타내어 보면

$$v_1 = R_1i_1 + \frac{d}{dt}(L_s i_1 + L_m i_2 + \dots + L_m i_n) + \frac{d\lambda_{1r}}{dt} \quad (6)$$

BLDC 전동기는 Y-결선이므로 식 (7)과 같은 전류방정식이 만들어 진다.

$$i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n = 0 \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면

$$v_1 = R_1i_1 + (L_s - L_m) \frac{di_1}{dt} + \frac{d\lambda_{1r}}{dt} = R_1i_1 + L \frac{di_1}{dt} + \frac{d\lambda_{1r}}{dt} \quad (8)$$

여기서 $L = L_s - L_m$ 으로 상 인덕턴스를 나타낸다. 그래서 x 번째 상전압 방정식으로 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_x = Ri_x + L \frac{di_x}{dt} + \frac{d\lambda_{xr}}{dt} \quad (9)$$

식 (9)의 두 번째 항은 변압기 전압을 나타내는 항으로 시간에 대해 전류가 변화시 나타나는 전압 항이다. 세 번째 항은 회전하는 전동기에서만 나타나는 속도 전압을 나타내는 항으로 회전자 자속이 상권선에 전압을 유기해서 나타나는 역기전력 항이다. 세 번째 항을 좀 더 풀어보면

$$\begin{aligned} v_x = Ri_x + L \frac{di_x}{dt} + \frac{d\lambda_{xr}}{dt} &= Ri_x + L \frac{di_x}{dt} + \frac{d(k_f f_{xr}(\theta))}{dt} \\ &= Ri_x + L \frac{di_x}{dt} + k_e \frac{d\theta}{dt} \frac{d(f_{xr}(\theta))}{d\theta} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 BLDC 전동기의 고속운전시 두 번째항 및 세 번째 항에 대해 분석해 보면

(1) $L \frac{di_x}{dt}$ 항

상권선에서 반주기 동안 원하는 속도에 도달하기 위해 히스테리시스 전류제어기에 의해 스위치 On, Off를 반복하며 반주기 동안은 정 전압과 나머지 반주기 동안은 부 전압을 갖게 된다. 해석을 간단히 하기 위해 회로는 반주기 동안 계속해서 On 되어 있다고 가정하면, 그림 3과 같이 사각파 인가전압을 갖는 교류회로로 볼 수 있다. 사각파 전압에 대해 푸리에 급수로 나타내어 보면 식 (11)과 같다.

$$v = \frac{4}{\pi} V_m (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots + \frac{1}{n} \sin n\omega t) \quad (11)$$

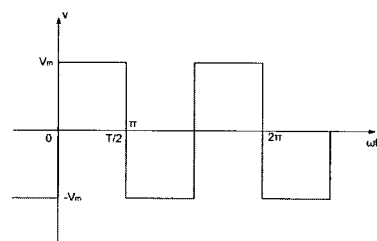


그림 3 사각파 인가전압 파형
 Fig. 3 Squarewave input voltage waveform

BLDC 전동기는 상권선에 대해 반주기 동안은 그림 4 (a)와 같이 직류 해석을 한주기 동안에 대해서는 그림 4 (b)와 같이 교류해석을 할 수 있다.

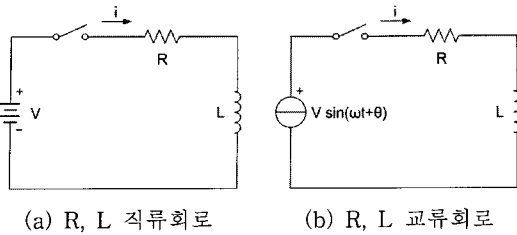


그림 4 R, L 회로
Fig. 4 R, L circuit

반주기 동안의 R, L 직류회로에 대한 전류해는

$$i = \frac{V}{R}(1 - e^{-Rt/L}) \tag{12}$$

한주기 동안의 R, L 교류회로에 대한 전류해는

$$i = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} [\sin(\omega t + \theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}) - \sin(\theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}) e^{-Rt/L}] \tag{13}$$

식 (12),(13)에서 알 수 있듯이 속도가 증가할수록 상권선에 교번되는 스위칭주파수는 증가하며 ωL 항을 증가시켜 상권선의 리액턴스를 증가하게 한다. 한주기 동안의 교류회로에서는 전류의 크기를 작게하고 전압에 대해 전류 위상을 지연시킨다. 반주기 동안의 직류회로에서는 증가된 리액턴스는 전류 상승을 지연시킨다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 고속으로 회전하는 BLDC 전동기는 교번주파수의 큰 상승에 의해 상권선의 전류증가를 완만하게 증가시키고 상전류를 전압에 대해 지연각을 만든다.

$$(2) k_e \frac{d\theta}{dt} \frac{d(f_{xr}(\theta))}{d\theta} \text{ 항}$$

회전자의 영구자석의 자속에 의한 속도항으로 나타나는 $k\omega\Phi$ 항으로 역기전력이라 부르며, 고속으로 증가할수록 역기전력 전압만 상승하게 된다. 이 항은 고속시 역기전력이 증가하므로 결국 상전류가 필요한 만큼의 전류를 보낼 수 없게 될 뿐만 아니라 상전류를 완만히 상승하게 만든다. 그래서 정출력 모드에서는 회전자 자속을 낮추는 약계자 제어 방법과 인가전압을 올려 정전류 제어를 하는 방법으로 BLDC 전동기에 대해 제어를 한다.

2.3 고속에 적용할 진상각 개념

기 언급한 바와 같이 7상 BLDC 전동기를 약 25,000[rpm]의 고속으로 운전할 경우, 상권선에 나타나는 리액턴스는 속도가 증가할 수록 스위칭 소자의 스위칭 시간이 짧아져 di/dt 에 의한 주파수 상승에 의해 리액턴스 값이 크게 나타난다. 이는 결국 역기전력에 대한 상전류의 지연으로 나타난다.

7상 BLDC 전동기의 고속 운전시 나타나는 상전류의 리액턴스 효과를 보상하기 위해 커패시터 효과를 주는 상전류

의 진상각(Phase Advance Angle)을 적용하여야 한다.

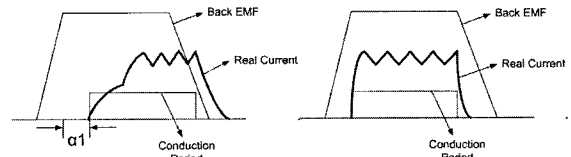
고속 운전시 상권선의 리액턴스 증가에 의한 상전류에 나타나는 현상은 다음과 같다.

(1) 고속 운전시 리액턴스가 적당히 클 때

그림 5 (a)에서는 25,000[rpm]으로 회전하였을 시 나타나는 현상을 그림으로 나타낸 것으로 역기전력에 대한 상전류 지연된 현상을 도시한 것이다. 이 그림에서 보듯이 상전류가 각 $\alpha 1$ 만큼 지연되어 있으므로 진상각을 각 $\alpha 1$ 만큼 진상(Leading Angle)시켜 보상하는 개념을 먼저 적용하면 그림 5 (b)와 같이 상전류를 인가하는 역기전력의 기준점과 만나게 할 수 있다.

그림 5 (b)는 진상각 $\alpha 1$ 을 적용한 경우에 나타나는 결과 그림이다. 결과에서 알 수 있듯이, 진상각 $\alpha 1$ 을 적용한 경우 상전류 파형 모양도 좋아졌고, 상전류 평균값이 그림 5 (a)의 결과 보다 더 크게 나타나고 있다.

결국 고속 운전시 보상이 필요한 진상각 $\alpha 1$ 값을 적용시 그림 5의 (b)와 같은 사각파에 가까운 상전류를 얻을 수 있다.



(a) 고속시 진상각 $\alpha 1$ (b) $\alpha 1$ 적용후 상전류 파형

그림 5 고속운전시 적용하는 진상각 개념 (리액턴스가 적당히 클 때)

Fig. 5 Phase advance angle concept for high speed (In case of high reactance)

(2) 고속 운전시 리액턴스가 매우 클 때

그림 6은 리액턴스가 매우 클 경우에 나타나는 현상으로 이 경우 진상각을 적용하여 리액턴스에 의한 상전류 지연현상을 보상을 하여도 리액턴스에 의한 상전류 상승이 완만하여 원하는 상전류 크기를 만들기가 어렵게 된다. 이를 보완하기 위해 상전류를 인가하는 역기전력의 기준점 보다 더 앞선 위치로 이동시키는 추가 진상각을 적용하여야 한다.

그림 6 (a)는 고속 운전시 리액턴스가 매우 클 경우에 나타나는 일반적인 상전류 파형이다. 리액턴스 영향에 의해 상전류를 인가하는 역기전력의 기준점에서 $\alpha 1$ 각 만큼 지연되고 있다. 지연되는 각 $\alpha 1$ 각 만큼 진상각을 적용하면 그림 6 (b)와 같이 된다.

그림 6 (b)는 리액턴스에 의한 상전류 지연각 만큼의 보상한 진상각을 적용한 결과이다. 그러나 상전류는 여전히 기울기가 완만하게 증가하여 상전류 평균값은 설계자가 원하는 값이 되지를 않는다. 이를 보상하는 방법은 다시 상전류를 진상각으로 보상을 하여 상전류 평균값을 크게 되도록 하는 것이다.

그림 6 (c)는 추가 진상각 $\alpha 2$ 을 적용한 경우에 나타나는 결과 그림이다. 결과에서 알 수 있듯이, 추가 진상각 $\alpha 2$ 을 적용한 경우 상전류 평균값이 그림 6 (b)의 결과 보다 더 크게 나타나고 있다.

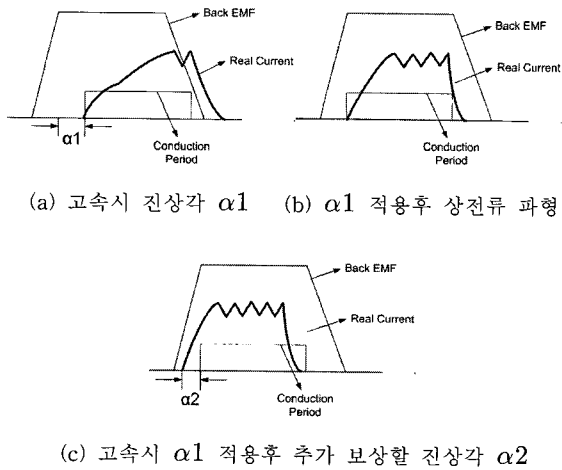


그림 6 고속운전시 적용하는 진상각 개념 (리액턴스가 매우 클 때)

Fig. 6 Phase advance angle concept for high speed (In case of very high reactance)

이상의 결과에서 고속 운전시 적용하는 진상각에 대해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 고속 운전시 리액턴스 적당히 클 때 :
 - 진상각 α_1 의 적용으로 상전류를 제어 하는 값으로 보상 가능하다.
- 2) 고속 운전시 리액턴스 매우 클 때 :
 - 진상각 α_1 의 적용만으로 상전류를 제어 하는 값으로 보상 가능하지 않다.
 - 진상각 α_2 를 추가로 적용하여야 하며 진상각 α_1 의 적용한 경우 보다 상전류 보상이 더 크다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 시뮬레이션

(1) 진상각

(가) 상전류 리액턴스 효과

(a) 리액턴스 변화

그림 7에서는 리액턴스 변화에 따른 상전류 변화를 고찰해 보기 위해 시뮬레이션을 해 보았다. 리액턴스가 증가할수록 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 리액턴스가 증가할수록 상전류를 인가하는 역기전력의 기준점에 대해 지연된다.
- 리액턴스가 증가할수록 상전류 평균값이 낮아져 지령 속도를 추종할 수가 없으며 출력이 낮아진다.

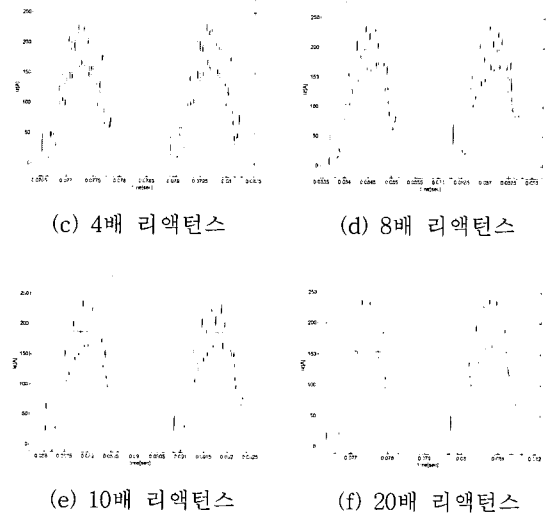
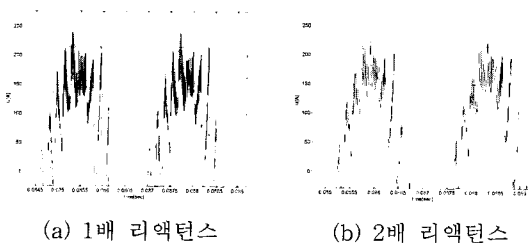


그림 7 25,000[rpm] 고속 운전시 리액턴스 효과
Fig. 7 Inductance effect at 25,000[rpm]

(b) 속도 변화

그림 8에서는 속도 변화에 따른 상전류 변화를 고찰해 보기 위해 시뮬레이션을 해 보았다. 속도가 증가할수록 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 속도가 증가할수록 상전류는 속도에 따른 리액턴스 증가 효과가 나타난다.
- 속도가 증가할수록 리액턴스 영향에 의해 상전류의 스위칭 주파수가 낮아진다.

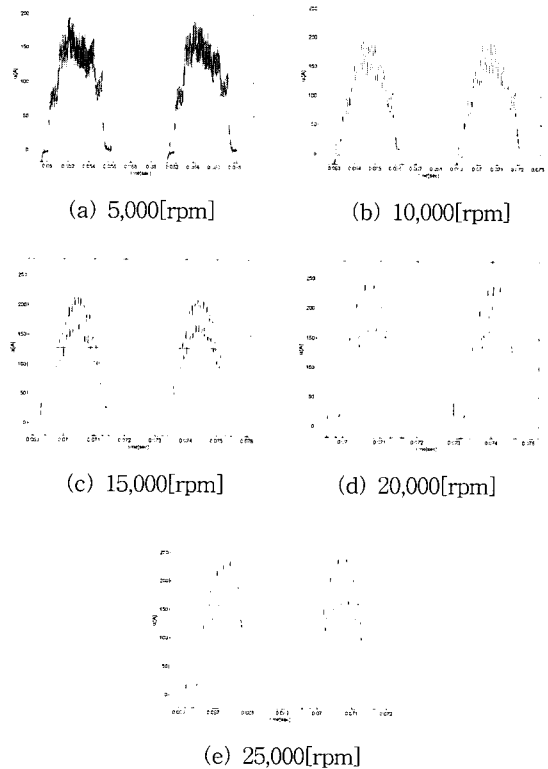


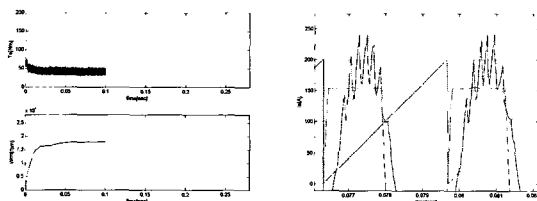
그림 8 속도변화에 따른 리액턴스 효과
Fig. 8 Inductance effect with speed variation

(나) 리액턴스 효과에 대해 진상각을 적용한 상전류

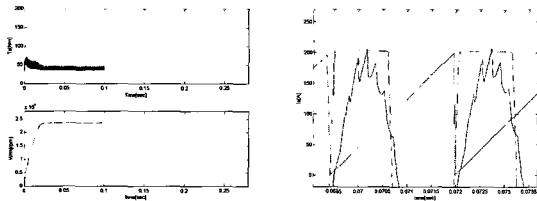
그림 7 (f)의 리액턴스 효과가 큰 20배 리액턴스에 대해 진상각 변화에 따른 상전류 변화를 고찰해 보기 위해 시뮬레이션을 해 보았다.

그림 9는 진상각을 적용시 진상각 변화에 따른 상전류 변화를 볼 수 있을 뿐만 아니라 또한 상전류 변화에 따른 회전수 변화를 볼 수 있다.

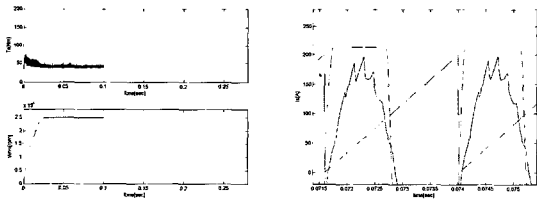
그림 9 (a)는 25,000[rpm] 지령에 대한 토크/역기전력/회전수 등의 결과이다. 고속 운전시 발생된 리액턴스의 증가 현상으로 상전류 크기가 작아져 지정속도를 추종 못하고 있다. 그림 9 (c)는 진상각을 12° 적용시 상전류 지연에 대해 진상각에 의한 보상이 이루어져 회전수가 거의 25,000[rpm]으로 추종되고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 9 (d)는 진상각을 15° 적용시 상전류 지연에 대해 진상각에 의한 보상이 이루어져 회전수가 완벽하게 25,000[rpm]으로 추종되고 있는 것을 볼 수 있다.



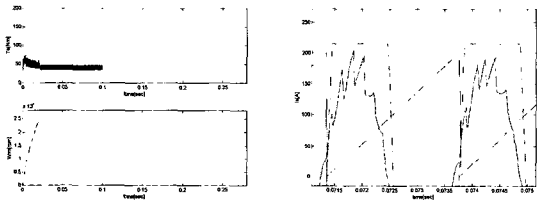
(a) 진상각 0°의 회전수 및 상전류



(b) 진상각 10°의 회전수 및 상전류



(c) 진상각 12°의 회전수 및 상전류



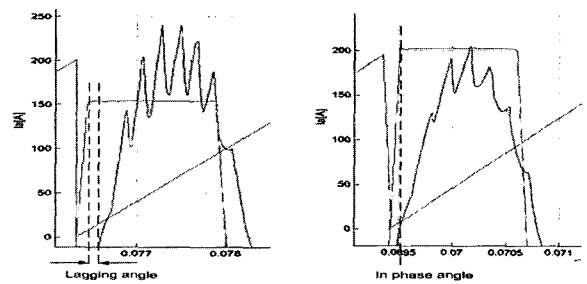
(d) 진상각 15°의 회전수 및 상전류

그림 9 25,000[rpm] 고속 운전시 진상각 효과
Fig. 9 Phase advance angle effect at 25,000[rpm]

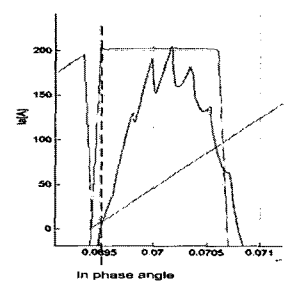
그림 10은 그림 9의 상전류를 확대한 것으로 기 언급한 2.3절의 (2)의 진상각 α_1 및 α_2 적용의 이론적 근거에 대한 고찰을 하기 위한 시뮬레이션 결과이다.

그림 10 (a)에서 고속회전에 의한 상전류가 지연되는 현상을 볼 수 있으며, 진상각 적용이 필요하다는 것을 판단할

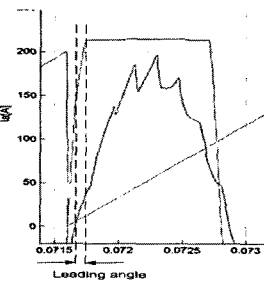
수 있다. 그림 10 (b)의 상전류는 역기전력에 대한 상전류를 시작하는 기준전류 위치와 같은 동상이 되는 것을 볼 수 있다. 그러나 이 위치는 그림 9 (b)에서 보듯이 지령속도를 추종하지 못하고 있으며 더 큰 진상각이 필요함을 알 수 있다. 그림 10 (c)의 상전류는 역기전력에 대한 상전류 시작하는 기준전류 위치보다 진상(leading angle)되어 있다. 그러나 상전류의 전류 기울기가 리액턴스의 영향으로 완만하게 증가하여 진상각을 더 크게 적용할 필요가 있는 것으로 판단된다. 그림 10 (d)의 상전류는 역기전력에 대한 상전류 시작하는 기준전류 위치보다 크게 진상(leading angle)되어 있다. 그러나 리액턴스 영향인 완만한 상전류의 전류 기울기에 대해서 진상각을 크게 앞서게 하는 것이 상전류의 평균치를 크게 만든다.



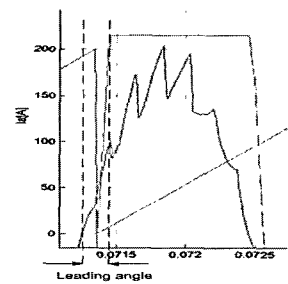
(a) 진상각 0°의 상전류



(b) 진상각 10°의 상전류



(c) 진상각 12°의 상전류



(d) 진상각 15°의 상전류

그림 10 진상각 효과에 의한 상전류 파형 분석

Fig. 10 Phase current waveform analysis with phase advance angle

3.2 실험 결과

본 연구에서는 고속 25,000[rpm]의 고속/고출력화를 달성하기 위해 진상각 및 180° 상전류 제어를 적용하여 개발된 7상 BLDC 전동기의 설계는 25,000[rpm] 회전시 약계자 제어를 적용하지 않고 기저속도로 설계가 되어 있다. 본 연구에서 사용된 전동기는 표 1과 같은 사양을 갖고 있다.

표 1 BLDC 전동기 주요 사양

Table 1 Specification of BLDCM

구분	설계 내용
회전수	25,000rpm
출력	106kW
상수	7상
극수	6극
상당 역기전력	143V/25000rpm
선간 인덕턴스	108μH
상 저항	11mΩ

실험적 연구는 설계 7상 BLDC 전동기에 대해 10,000[rpm] ~ 25,000[rpm]에 대해 부하시험을 수행해 보았다. 그림 11의 윗 부분은 역기전력 위치 신호 파형이고 아랫 부분은 상전류 파형이다. 그림 11 (a)는 10,000[rpm]시 파형으로 엔코더 신호와 상전류가 잘 일치하고 있으며 상전류의 지연이 나타나지 않는다.

그림 11 (b)는 15,000[rpm]시 파형으로 엔코더 신호에 비해 상전류가 크게 뒤지고 있으며 상전류의 지연이 나타나고 있다. 그림 11 (c)는 진상각을 22° 적용한 경우로서, 상전류가 (b) 그림에 비해 상전류의 지연이 많이 보상이 되었으며 상전류 크기와 모양이 개선되는 것을 알 수 있다. 실험의 상세한 내용은 기 게재된 논문을 참조하면 된다[5].

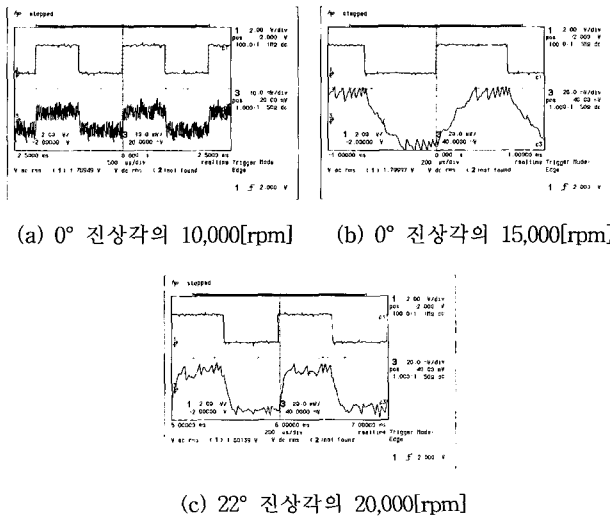


그림 11 고속 7상 BLDC 전동기 실험 결과
Fig. 11 Test results of high speed 7 phase BLDC motor

표 2에서 알 수 있듯이 엔코더 진상각을 주지 않았을 때와 11°로 주었을 경우 출력이 나오지 못하고 있으며, 상전류 ZC(Zero Crossing)과 역기전력 ZC의 위상차가 -로 나타나 원하는 토크를 얻을 수 없었다. 진상각을 더 키우는 경우 상전류 ZC와 역기전력 ZC의 위상차가 +로 커지기 때문에 역토크가 발생하여 원하는 출력을 내기위해 상에 흐르는 전류는 점점 커지고 있었다. 결론적으로 속도 20,000[rpm]기준으로 가장 적절한 엔코더 진상각은 22°가 가장 적절한 값을 알 수 있다.

표 2 엔코더 진상각에 따른 상전류 및 출력 특성

Table 2 Phase current and output characteristic with phase advance angle of encoder

엔코더 진상각	속도 (RPM)	상전류 실효치(A)	출력 (KW)	엔코더와 상전류ZC 위상차	상전류 ZC과 역기전력 ZC 위상차
0°	10,000	33	9	-	-
	15,260	148	51	+46°	-46°
11°	10,000	33	9	-	-
	18,540	129	67	+40°	-28°
22°	10,000	38	9	-	-
	20,000	118	74	+14°	+8°
34.6°	10,000	53	9	-	-
	20,000	137	74	+10°	+23°
45.4°	10,000	61	9	-	-
	20,000	157	74	+10°	+36°

표 2의 엔코더 진상각은 22°에서 자세히 보면 “엔코더 및 상전류ZC 위상차”는 역기전력과 상전류의 위상이 같아지는 위치를 나타내고 있으며 그 위치가 역기전력에 대해 상전류를 14° 진상(Phase advance)한 위치에서 같아진다. “상전류 ZC와 역기전력 ZC 위상차”는 역기전력에 대해 상전류를 더 진상했을 때 나타내고 있으며 그 위치는 역기전력에 대해 상전류를 +8°를 더 진상한 위치이다. 이와 같이 20,000[rpm] 부하시 역기전력에 대해 상전류를 동상한 것 보다 더 진상시켜야 고출력이 됨을 알 수 있다.

(가) 속도 대 상전류/토크 비교

그림 12는 속도 변화에 따라 진상각에 대한 상전류와 토크 값을 조사한 것이다. 진상값에 따라 상전류 실효치 값이 차이가 나는 것은 20[Nm] 부하 조건에 상전류와 역기전력의 곱에 의해 발생하는 토크에 대해 상전류와 역기전력의 위상차에 의해 정(+)토크에 역(-)토크가 합쳐져 나타난 것이다. 따라서 상전류 값이 가장 적게 나타나고 있는 진상각 값이 속도 변화에 최적 값을 알 수 있다. 실험에서 속도 5,000[rpm]에서는 진상각 0°, 10,000[rpm]에서는 진상각 15°, 15,000[rpm]에서는 진상각 15°, 20,000[rpm]에서는 진상각 30° 및 25,000[rpm]에서는 진상각 45°가 같은 토크를 만드는 상전류 값이 가장 낮게 나왔다. 그림 12에서 표시되지 않은 부분의 진상각은 설정된 토크 기준치를 만족하지 못하였다.

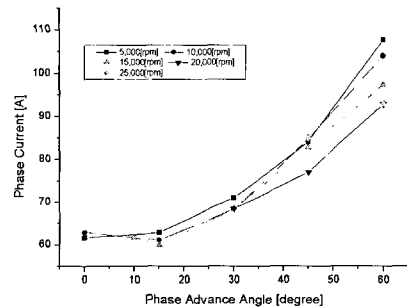


그림 12 속도 변화에 따른 상전류 특성
Fig. 12 Phase current characteristic with speed and phase advance angel variation

(나) 인덕턴스 대 상전류/토크 비교

그림 13은 20[Nm] 부하 조건으로 인덕턴스 변화에 따라 진상각에 대한 상전류와 토크 값을 조사한 것이다. 속도 변화에 따른 상전류/토크 비교와 같이 인덕턴스 변화에 따른

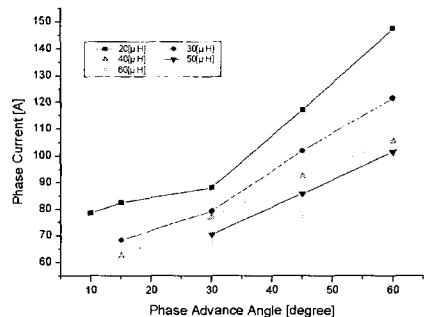


그림 13 인덕턴스 변화에 따른 상전류 특성
Fig. 13 Phase current characteristic with speed and phase advance angel variation

상전류/토크 비교에서도 상전류 값이 가장 적게 나타나고 있는 진상각 값이 속도 변화에 최적 값을 알 수 있다. 실험에서 인덕턴스 20[μH]에서는 진상각 10°, 30[μH]에서는 진상각 15°, 40[μH]에서는 진상각 15°, 50[μH]에서는 진상각 30° 및 60[μH]에서는 진상각 30°가 같은 토크를 만드는 상전류 값이 가장 낮게 나왔다. 그림 13에서 표시되지 않은 부분의 진상각은 설정된 토크 기준치를 만족하지 못하였다.

(다) 25,000[rpm] 부하시험 결과

그림 12에서는 속도변화에 따라 진상각 변화를 0°, 10°, 15°, 30°, 45°, 60°에 대해서만 조사를 하였고 이를 근거로 25,000[rpm] 회전시 106[kW] 출력에 대해 최적 진상각 실험을 수행하였다. 많은 실험 결과, 진상각을 34.6°로 하였을 때 25,000[rpm] 회전시 106[kW]의 최대출력을 달성됨을 확인할 수 있었다. 그림 14는 이때 측정된 25,000[rpm] 회전시 106[kW] 출력에 대한 부하 시험시 상전류 파형이다. 결과적으로 25,000[rpm] 회전시 106[kW]의 최적 진상각은 실험결과 34.6°임을 확인하였다.

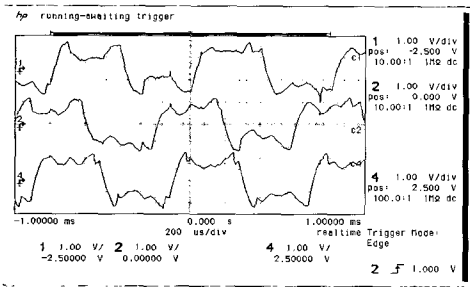


그림 14 106[kw]/25000[rpm]에서 1상, 5상 및 3상 상전류 파형
Fig. 14 Phase current waveforms of 1 phase, 5 phase and 3 phase at 106[kw]/25000[rpm]

4. 결 론

본 논문에서는 고속 25,000[rpm] 운전시 나타나는 상전류 지연에 대한 진상각 보상 운전 연구를 위해 고속시 진상각을 적용하는 개선된 상전류 제어 기법등에 대해 고찰해 보았으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

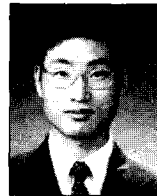
- 1) 전동기 속도가 고속으로 갈수록 상권선에 미치는 리액턴스 효과가 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 상전류 지연을 보상하기 위해 진상각을 적용하여야 함을 확인하였다.
- 2) 진상각은 기존의 발표된 논문에 제시한 상전류 지연각에 대한 보상각이 최적인 진상각이 아님을 확인할 수 있었다.
- 3) 전동기 속도가 고속으로 갈수록 리액턴스 및 리액턴스 성분 전압의 영향이 커지므로 상전류 상승이 완만하게 상승하게 되어 제안한 추가 보상 진상각이 필요함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] U. Buhlmann, "The Evolution of Heavyweight Torpedos, Such As The "System Family SEAHAKE 4" Concept, Development And Test Results," UDT Korea., 2002.
[2] S. K. Safi, P. P. Acarnley, A.G. Jack, "Ananalysis and

Simulation of the High-speed Torque Performance of Brushless DC Motor Drive," IEE Proc. Electro. Power Appl., Vol. 142, No. 3, pp.191-200, May 1995.
[3] S. I. Park, T. S. Kim, S. C. Ahn, and D. S. Hyun , "An Improved Current Control Method for Torque Improvement of High-Speed BLDC Motor," IEEE, pp. 294-299, 2003.
[4] 김현철, 오형식, 김장목, 김철우, "진상각을 갖는 7상 BLDC 전동기의 시뮬레이션 모델," 대한전기학회 투고 중, 2007
[5] 김현철, 공영경, 최태인, 송종환, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발에 관한 연구," 대한전기학회 논문집, pp. 297-304, May. 2000.

저 자 소 개



김현철 (金賢哲)

1963년 5월 5일 생. 1989년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992~현재 국방과학연구소 선임연구원
Tel : 055-540-6144
E-mail : hckim@add.re.kr



오형식 (吳亨植)

1978년 2월 16일생. 2003년 대구대 정보통신공학부 제어계측 졸업. 2006년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 부산대 대학원 전기공학과 박사과정 중
Tel : 051-510-2866
E-mail : jeuse96@nate.com



김장목 (金長睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2001년 5월~현재 부산대 컴퓨터 및 정보통신연구소 연구원. 2001년 3월~현재 부산대 전자전기정보컴퓨터 공학부 조교수.
Tel : 051-510-2366
E-mail : jmok@pusan.ac.kr



김철우 (金喆遇)

1942년 12월 5일생. 1969년 부산대 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대학 전자공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경공업대 전기전자공학과 객원교수. 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 부산대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수.
Tel : 051-510-2368
E-mail : kimcu@pusan.ac.kr