

# 기계 구동시스템 전기적 특성해석 - BLDC 모터를 중심으로

전윤석\*, 목형수\*\*, 최규하\*\*

## 1. 서 론

Brushless DC 모터 (이하 BLDC 모터)는 직류전동기에 비해 수명이 길고 응답성이 빠르며 고속운전 특성이 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 전력용 스위칭 소자의 특성개선과 마이크로 프로세서와 디지털기술의 발달로 산업계에 서 다양한 분야로 확대되고 있는 추세이다.

보편적으로 많이 쓰이는 3상 BLDC 모터의 경우 구동시스템으로서 3상 풀브릿지 인버터가 사용되며 이러한 BLDC 모터 구동시스템은 그 해석에 있어서 다른 모터의 구동시스템과 비교할 때 두가지의 특징이 있다. 첫번째는 다른 모터의 구동시스템은 각상의 도통구간이 전구간에서 이루어 지는데 반하여 3상 BLDC시스템의 경우 각상이 한 주기동안에  $4/3\pi$ 의 도통구간만을 가짐으로서 정상적인 경우 2상 운전을 하게 되나 이러한 도통구간이 한 상에서 다른 상으로 전환할 때 직류전동기와 같은 전류현상이 발생하게 되므로 전류구간동안은 3상운전을 하게된다. 따라서 전체적인 모터 구동시스템의 등가모델이 변화함으로서 이를 판별하고 각각의 모델을 적용시키는 것이 필요하다.

두 번째 특징으로는 기타 모터의 역기전력 파형이 정현파 또는 직류파형인데 반하여 BLDC 모터의 역기전력 파형은 이상적인 경우 사다리꼴 파형을 가지며 또한 사용목적에 따라 슬롯이나 자석의 형상등을 변화시킴으로서 다양한 형태의 역기전력 파형을 얻게 된다. 따라서 최근에는 유한요소법등에 의하여 계산된 역기전력 파형을 복원하여 구동시스템 해석시 이를 적용하는 연구가 진행중이다.

본 고에서는 이러한 2상 3상운전 전환시 변화하는 모델과 최근 발표된 FFT 및 역 FFT를 사용하여 역기전력을 복원하여 구동시스템 해석에 이를 이용하는 방법을 소개하고자 한다.

## 2. 3상 BLDC 모터의 구동시스템

일반적으로 산업용으로 주로 사용되는 3상 BLDC 모터 구동시스템은 그림 1과 같이 최소한의 스위칭 소자로서 bipolar drive를 가능하게 해주는 3상 풀브릿지 회로로서 구성되어 있으며 이러한 BLDC 모터 구동시스템은 모터의 운전상태에 따라 기본적인 모델이 변화하므로 해석을 위해서는 운전상태의 판별과 이에 따른 적절한 모델의 선택이 필요하다.

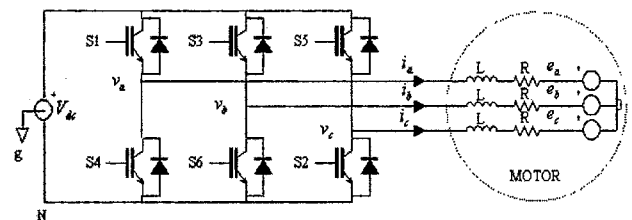


그림 1. 3상 BLDC 모터 구동시스템

### 2.1 BLDC 모터의 기본모델링

BLDC 모터는 각상의 도통구간이 바뀔 때 전류현상이 발생하므로 구동시스템의 해석시는 이러한 전류현상에 의해서 계속적으로 변화하는 모델을 고려하여야 한다. 따라서 변화하는 각각의 모델을 알기 위해서는 기본적인 모델링을 해야 한다. 그림 1의 구동시스템은 일반적인 3상 풀브릿지 회로와 같이 인버터 출력전압방정식, 전기자 권선의 방정식, 그리고 각각의 기계방정식과 전기-기계적 결합방정식으로 나타내어 진다.

## 전기 기계 구동시스템의 전기적 특성 해석

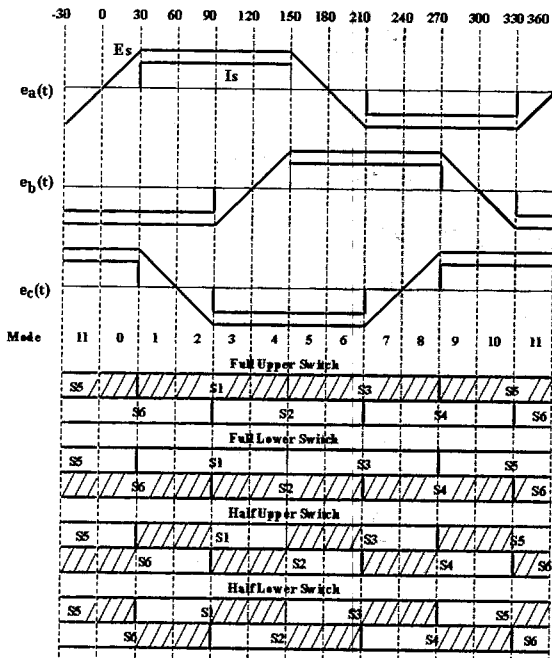


그림 2. 3상 BLDC 모터 구동시스템의 스위칭 초핑

### ① 인버터 출력 전압방정식

전기자 권선에 인가되는 각각의 상전압  $v_{ao}$ ,  $v_{bo}$ ,  $v_{co}$ 는 인버터 출력단 전압과 직류전원의 내부중성점( $g$ )과의 전압  $v_{ag}$ ,  $v_{bg}$ ,  $v_{cg}$ 와 직류전원의 내부중성점과 전기자 권선의 중성점간의 전압  $v_{go}$ 의 합으로 나타낼 수 있다. 이러한 인버터 출력전압은 구동시스템이 2상운전상태 또는 3상운전상태에 있을 때 각각 변화하므로 항상 구동시스템의 운전상태를 판별하고 이에 따른 각각의 전압을 얻어야 한다.

$$v_{ao} = v_{ag} + v_{go} \quad (2.1)$$

$$v_{bo} = v_{bg} + v_{go} \quad (2.2)$$

$$v_{co} = v_{cg} + v_{go} \quad (2.3)$$

### ② 전기자 권선의 방정식

실제의 상전류는 식(2.4)-(2.7)로부터 구할 수 있으며 이때 각각의 역기전력  $e_a$ ,  $e_b$ ,  $e_c$ 는 회전자의 위치로부터 얻을 수 있다. 이때 역기전력은 일반적으로 사다리꼴 파형으로 근사화하지만 보다 정확한 해석을 위해서는 유한요소법등으로 계산된 파형을 복원하여 사용한다.

$$v_{ao} = (L - M) \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a \quad (2.4)$$

$$v_{bo} = (L - M) \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b \quad (2.5)$$

$$v_{co} = (L - M) \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c \quad (2.6)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.7)$$

### ③ 전기적-기계적 결합방정식

모터의 전기적 에너지는 토크형태의 기계적 에너지로 출력되며 이때의 모델은 식(2.8), (2.9)와 같다.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - B\omega \quad (2.8)$$

$$\omega T_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (2.9)$$

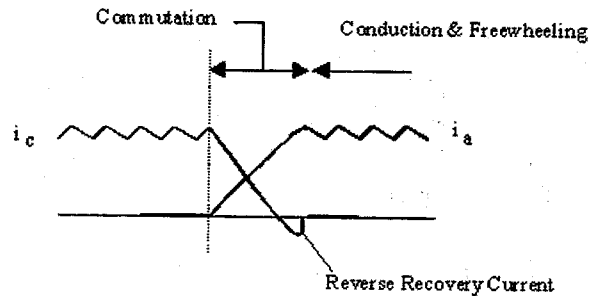


그림 3. 모드전환시의 전류현상

## 2.2 BLDC 모터의 전류현상

BLDC 모터 구동시스템은 각상이 각각 반주기당  $120^\circ$ 의 도통구간을 가짐으로서 그림 2와 같이  $60^\circ$ 마다 모터의 도통상태가 바뀌게 된다. 여기서 그림 2와 같이 두 개의 상이 도통구간일 때 나머지 한상의 전류는 흐르지 않음으로서 항상 2상운전만을 하게 된다. 이때 대표적인 Full Upper Switching 방법을 예로들면 그림 1의 구동시스템에서 전기 각  $30^\circ$ 에서 도통되는 상이 b상과 c상에서 a상과 b상으로 전환되면 전기자 권선 c상에 흐르던 전류는 그림 4와 같이 commutation 경로를 통하여 방전되게 되며 새롭게 a상의 전류가 흐르기 시작된다. 이러한 구간을 전류구간이라 하며 전류구간중 a상과 c상 전류의 관계는 이상적으로 그림3에서 보는바와 같이  $di_a/dt = -di_c/dt$ 와 같으며 b상의 전류는 일정하다. 이때 각상의 전류가 모두 통전상태에 있으므로 전체 구동시스템은 3상운전을 하게 되며 전체적인 모델은 3상시스템과 같다.

## 2.3 BLDC 모터의 스위칭방법

이때 각상의 도통시 안정된 프리휠링 경로를 얻기 위해서는 한 개의 스위치만을 초핑시켜주는 소프트 초핑 방법을 사용한다. 이러한 소프트 초핑 방법은 그림 2의 방법이 있으며, 각각의 초핑방법에 따라 전류상태에서의 방전경로나 프리휠링 경로가 변동되므로 경로에 포함된 역기전력 및 전원에 의해 전류구간중 특성이 변동한다.

① Full Upper Switch

스위치는 각각 120°의 도통구간을 가지게 된다. 이때 전동기로 입력되는 전류는 그림 2와 같이 상단 스위치만을 초핑함으로서 제어할 수 있으며 하단의 스위치는 전류리플이 적은 프리휠링 경로를 얻을 수 있도록 120°의 도통구간에서 항상 on상태를 유지하게 된다.

② Full Lower Switch

기본적인 개념은 Full Upper Switch법과 같으나 전류의 제어는 하단의 스위치를 초핑함으로서 이루어지며 상단의 스위치는 전류리플이 적은 프리휠링 경로만을 얻을 수 있도록 120°의 도통구간에서 항상 on상태를 유지하게 된다.

③ Half Upper Switch

각각의 스위치는 120°의 도통구간을 가지게 되나 전류 제어를 위한 초핑은 도통구간의 시작부분 60°에서만 이루어 지게 되며 후반 60°부분에서는 on상태를 유지하게 된다. 따라서 결과적으로는 초핑 스위치에 의해서 전류제어가 이루어지며 나머지 on상태의 스위치에서 프리휠링 경로를 이루게 된다.

④ Half Lower Switch

기본적인 개념은 Half Switch와 같으나 초핑은 도통구간의 후반부 60°에서만 이루어 지며 전반부에서는 on상태를 유지하게 된다.

3. 운전상태별 인버터 출력전압

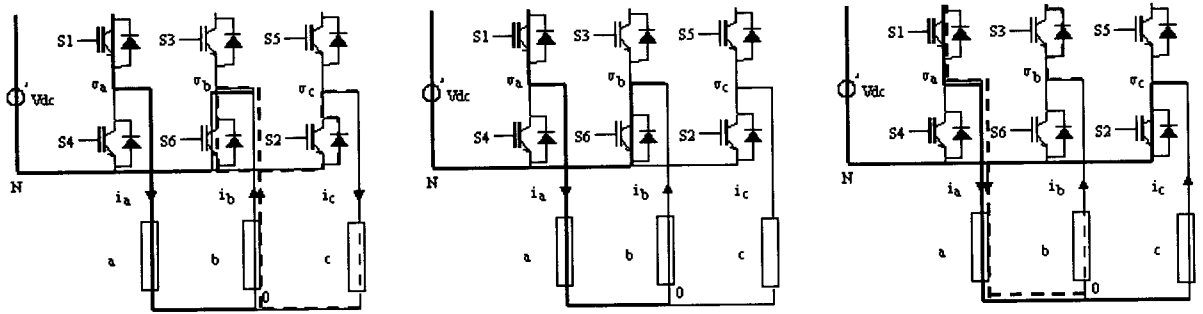
전기자 권선에 흐르는 전류를 알기 위해서는 전기자 권선에 인가되는 인버터의 출력전압을 알아야 한다. BLDC 모터는 DC 모터와 같이 전류현상이 나타나므로 모터 특성상 2상운전에서 3상운전으로 모델의 변화가 이루어지게 되며 따라서 각각의 경우를 판별하고 각각의 경우에 대해서 모델링을 할 필요가 있다. 위의 회로 모델에서 식(2.1)-(2.3)은 회로의 상태가 전류모드 또는 2상운전모드에 따라서 달라지게 되며  $v_{go}$ 가 달라지므로 결과적으로 모터에 인가되는 인버터의 출력전압이 달라지게 된다.

먼저 각각의 스위칭 상태와 상전류로서 각 상의 상태를 판별하면,

if  $S_{upper} = 1$  or  $S_{lower} = 1$  (도통상태)

$$v_{xg} = \frac{1}{2} (S_{upper} - S_{lower}) V_{dc}$$

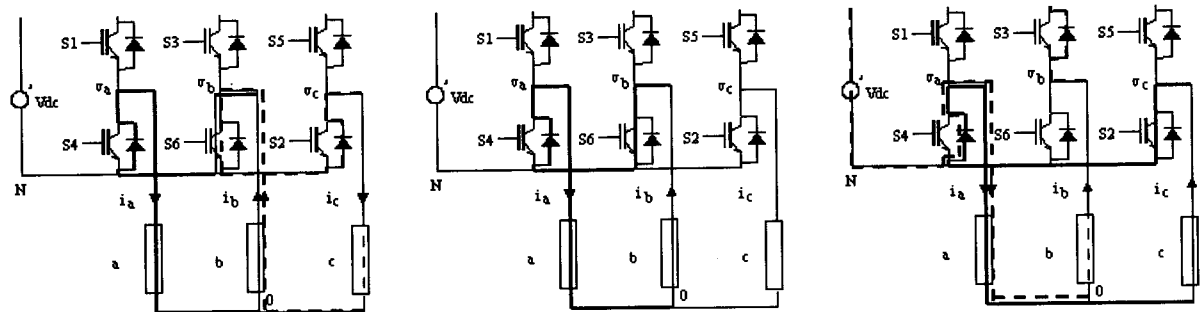
where  $S_{upper}, S_{upper} = 1$  at ON  
 $S_{upper}, S_{upper} = 0$  at OFF  
 $v_{xg} = v_{ag}, v_{bg}, v_{cg}$



a) 전기각 30° ~ 90° 3상운전

b) 전기각 30° ~ 90° 2상운전

c) 전기각 90° ~ 150° 3상운전



———— 도통 및 프리휠링경로      - - - - 전류상태에서의 방전경로

그림 4. 각 도통구간에서의 전류의 흐름

if)  $S_{upper} = 0$  and  $S_{lower} = 0$

i)  $i_{xg} = 0$  (개방상태)

$$v_{xg} = \text{UNKNOWN but } v_{xo} = e_{xo}$$

ii)  $i_{xg} \neq 0$  (전류상태 또는 프리휠링)

$$v_{xg} = -\frac{1}{2} \text{sign}(i_{xg})$$

### 3.1 3상운전

여기에서 각상의 전류가 모두 0이 아닌 경우 구동시스템은 3상운전을 하게 되며 도통상을 제외한 나머지 한상은 전류상태에서 방전을 하고 있다. 이때의 최종적인 인버터의 출력전압은 3상 시스템과 마찬가지로 다음과 같이 나타난다.

$$v_{go} = -\frac{1}{3}(v_{ag} + v_{bg} + v_{cg} - e_a - e_b - e_c) \quad (3.1)$$

$$v_{ao} = v_{ag} + v_{go} \quad (3.2)$$

$$v_{bo} = v_{bg} + v_{go} \quad (3.3)$$

$$v_{co} = v_{cg} + v_{go} \quad (3.4)$$

### 3.2 2상운전

한상의 전류가 0인 경우 한상이 개방상태가 되므로 구동시스템은 2상운전을 하게 된다. 이때 도통상태의 상을 첨자 1과 2로 표시하고 개방상을 첨자 0로 표시하면 인버터의 출력전압은 2상 구동시스템과 같이 나타나게 된다.

$$v_{go} = -\frac{1}{3}(v_{1g} + v_{2g} - e_1 - e_2) \quad (3.5)$$

$$v_{1o} = v_{1g} + v_{go} \quad (3.6)$$

$$v_{2o} = v_{2g} + v_{go} \quad (3.7)$$

$$v_{oo} = e_o \quad (3.8)$$

이렇게 계산되어진 인버터 출력전압을 전기자 권선의 방정식에 대입하여 전기자 권선의 전류를 다시 반복적으로 해석할 수 있다.

## 4. 토크출력 및 역기전력

BLDC 모터는 역기전력 파형의 형태가 토크출력 특성을 크게 좌우하며 이는 슬롯의 모양이나 자석의 형태에 따라 달라지며 각각의 모터의 사용목적에 따라 설계된다.

### 4.1 토크출력

BLDC 모터의 토크출력을 구하기 위해서 우선 역기전력의 기본식을 나타내면 식(4.1)과 같다.

$$e = K_E \omega \quad (4.1)$$

단,  $K_E$ : 역기전력 상수

이때 역기전력상수를  $\theta$ 의 함수로 보면

$$e(t) = K_E(\theta) \omega(t) \quad (4.2)$$

3상의 경우 각상의 역기전력은  $120^\circ$  차이가 있고 따라서 각 상의 역기전력 등가식은 다음과 같다.

$$e_a(t) = K_{E1}(\theta) \omega(t) \quad (4.3)$$

$$e_b(t) = K_{E1}(\theta - \frac{2\pi}{3}) \omega(t) \quad (4.4)$$

$$e_c(t) = K_{E1}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \omega(t) \quad (4.5)$$

단,  $K_{E1}$ 은 1상당 역기전력 계수이다.

여기에서 또한 토크도 역기전력과 마찬가지로 다음과 같이 나타낼 수 있으며 토크 기본식은 식(4.6)과 같다.

$$T = K_T I \quad (4.6)$$

단,  $K_T$ : 토크 상수

이때  $K_E$ 를  $K_E(\theta)$ 로 나타낼 수 있다면  $K_T$  또한  $K_T(\theta)$ 로 나타낼 수 있으며, 단  $K_T(\theta) \propto K_E(\theta)$ 이다.

따라서  $T(t) = K_T(\theta) I(t)$ 로 나타낼 수 있다

또한, 3상일 때 각상은  $120^\circ$  차이가 있다. 따라서, 각상 토크의 등가식은 식(4.7)-(4.9)와 같다

$$T_a(t) = K_{T1}(\theta) I_a(t) \quad (4.7)$$

$$T_b(t) = K_{T1}(\theta - \frac{2\pi}{3}) I_b(t) \quad (4.8)$$

$$T_c(t) = K_{T1}(\theta + \frac{2\pi}{3}) I_c(t) \quad (4.9)$$

단,  $K_{T1}$ : 1상당 토크계수

$T_a, T_b, T_c$ : 각상 발생 토크

따라서 총 발생 토크는 Reluctance 토크 성분을 무시한다면 다음과 같다

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (4.10)$$

단,  $T_e$ : 모터 발생 토크 [N·m]

또한 항상 2상이 도통하는 3상 BLDC 모터에서

$$K_T = 2 \times K_{T1}, K_E = 2 \times K_{E1} \quad (4.11)$$

로 정의되며 부하단에서 모터의 방정식은

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (4.12)$$

$$\omega = (T_e - T_L) \frac{1}{J_s + B} \quad (4.13)$$

단  $T_L$  : 부하 토크 [N·m]

$J$  : Rotor 관성 [ $kg \cdot m^2$ ]

$B$  : 마찰계수

여기에서 Laplace 소자를 사용하지 않았을 경우는

$$T_w = T_E - T_L \quad (4.14)$$

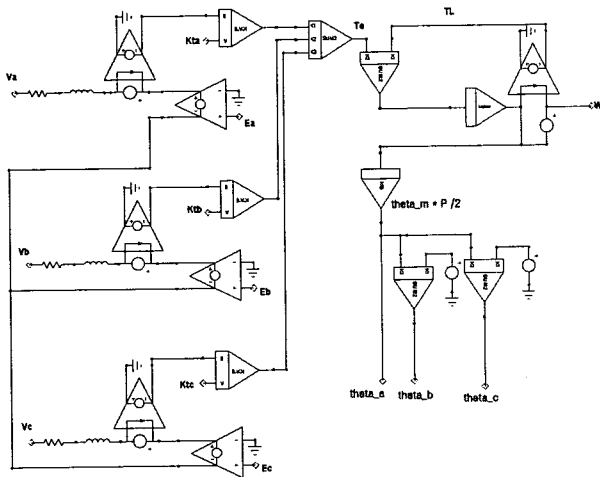


그림 5 . 3상 BLDC 모터 모델

$$T_w = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (4.15)$$

$$I = C \frac{dV}{dt} + \frac{1}{R} V \quad (4.16)$$

위 식(4.15), (4.16)에 의하여  $J = C$ ,  $B = \frac{1}{R}$ 로 대칭 구할 수 있고 이상의 모터 방정식에 의한 모터모델은 그림5와 같다.

### 4.2 역기전력의 모델

일반적으로 구동시스템의 동적 해석을 하기 위해서 역기전력은 이상적이라 가정하며 이의 복원은 사다리꼴 파형의 선형화기법을 사용한다. 이때 비선형적인 역기전력 파형을 선형화 하게되면 필연적으로 오차가 발생하게 되므로 보다 정밀한 해석을 위해서는 역기전력의 실제 파형은 실측이나 유한요소법등의 해석기법을 이용하여 구할 수 있으며 이를 FFT(Fast Fourier Transform)와 IFFT(Inverse FFT)기법을 사용하여 실제 역기전력 파형과 유사한 파형으로 복원할 수 있으며 각종 수치계산 방법을 통해 FFT 계수값은 산정할 수 있다.

먼저 푸리에 급수의 일반적 표현은 아래와 같다

$$f(t) = \frac{b_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t) \quad (4.17)$$

이때 Pole 한쌍 에 의한 파형을 FFT함으로서 Y 축 대칭이며  $\frac{\pi}{2}$  에 대하여 대칭인 사분파대칭 형태의 역기전력 파형을 FFT 하게 되고 이때 모든 정수 n 에 대하여 계수  $b_n$  은 0이 되며 짝수 n에 대한 계수  $a_n$  또한 0으로 되므로 모든 Cosine 항과, Sine 항의 짝수 고조파는 포함하지 않는다. 또한 이때 식(4.17)의  $\omega t$  항은 전기각을 의미한다.

따라서 모델은 시뮬레이션에 적합하게 축소 가능하며 23차 고조파까지 고려한 한쌍의 IFFT 시뮬레이션 모델은 그림 6과 같다.

여기에서 각 Gain 은 홀수차 고조파를 복원하기 위해 1, 3, 5... 의 값을 가지며 FFT의 각 계수값은 SUM 소자의 계수로 사용된다. 또한 속도를 곱하기전 신호는 1상당 토크 계수로 사용된다.

입력으로는 각상마다 120°의 위상차가 있는 파형이어야 하며 기계각을 전기각으로 바꾸기위해 입력단에는 식(4.18)-(4.20) 이 입력되어야 한다.

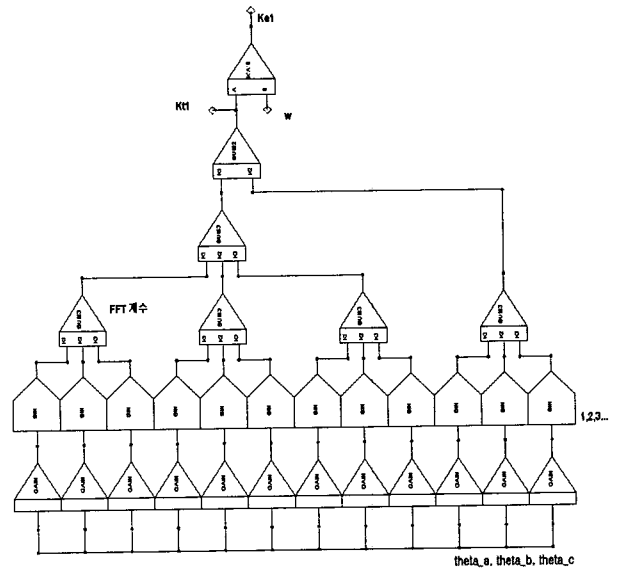


그림 6. 비선형 역기전력 파형 복원모델

$$\theta_a = \theta_m \times \frac{P}{2} \quad (4.18)$$

$$\theta_b = \theta_m \times \frac{P}{2} - 120^\circ \quad (4.19)$$

$$\theta_c = \theta_m \times \frac{P}{2} + 120^\circ \quad (4.20)$$

단  $\theta_a, \theta_b, \theta_c$  는 각상 IFFT 모델의 입력이 되는 전기 각이고  $\theta_m$  은 Rotor 의 기계각이며 식(4.18)-(4.20) 은 그림 5에서 구현되어 있다.

즉 전기각을 기준으로한 FFT를 통해 극 수가 늘어나도 FFT 할 파형의 데이터 개수를 늘리지 않고 복원능력을 유지할 수 있다. 이렇게 해서 복원된 역기전력의 파형과 전류 및 토크곡선은 그림 7과 같다.

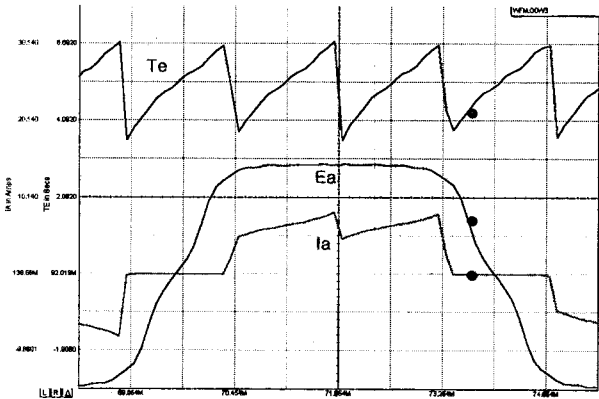


그림 7 . 비선형 역기전력 복원시 토크, 1상당 역기전력, 1상당 전류파형

## 5. 결 론

이상에서 현재 그 수요가 꾸준히 증가하고 있는 3상 BLDC 모터 구동시스템을 해석할 때 필요한 전류현상에 의한 2상 및 3상운전상태에서의 모터 인가전압의 변화와 실제

모터의 역기전력 및 토크출력 복원에 관하여 살펴보았다. 현재 BLDC 모터는 점차 고속, 고효율화 하는 추세이므로 보다 실제에 가까운 정확한 해석이 필요하며 이에 대한 꾸준한 연구가 필요하다.

## 저 자 소 개

### 전윤석(全潤石)

1971년 2월 15일생. 1996년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

### 목형수(睦亨洙)

1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박사). 1995년-1997년 서울산업대 조교수. 현재 건국대 공대 전기공학과 조교수.

### 최규하(崔圭夏)

1955년 7월 24일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(공학박사). 1987년-1988년 미국 오레곤주립대 객원 교수. 현재 건국대 공대 전기공학과 교수.