

히스테리시스 전류제어기 구동 BLDCM의 轉流현상 해석

강석주* 김광현 원종수
서울대학교 공과대학 전기공학과

Analysis of the Commutation Phenomenon in Brushless DC Motor with Hysteresis Current Regulator

Kang Seog - Joo Kim Gwang - Heon Won Jong - Soo
Dept. of Elec. Eng., Seoul Nat'l. Univ.

ABSTRACT - This paper studies the commutation phenomenon in the Brushless DC Motor with the trapezoidal BEMF waveform. It is shown that the torque ripple and the speed ripple due to the phase commutation depend on driving sytem, operating speed and load condition. The effects of resistance and BEMF flat width on torque ripple are considered. Speed - torque characteristics of the motor is presented considering the phase commutation. Uncommutating current control method can attenuate the torque ripple in the low speed region, and also minimize the switching loss and switching frequency. In this paper, the commutation phenomena are verified by analytical formulation and simulation.

1. 서론

사다리꼴 역기전력을 갖는 BLDCM(Brushless DC Motor)은 단위 전류당 높은 토크, 간결한 구동방식 등의 장점^[1]이 있으나, 相轉流로 인한 맥동토크가 발생하는 단점이 있다. 일정토크를 발생시키기 위해서는 역기전력의 평탄한 부분에 120°(전기각)동안 전기자 권선에 구형파전류를 인가해야 한다. 그래서 60°마다 相轉流가 일어나고, 이것은 역기전력 및 저항과 인덕턴스 때문에 전류맥동과 맥동토크를 발생시킨다^[2].

근래의 사무자동화(OA), 공장자동화(FA) 등에 사용되는 서보 모터들은 직결 전달 방식을 채택하는 경향이 늘어 모터의 성능이 적용 시스템의 성능을 좌우하게 된다. 따라서, 모터의 토크맥동을 저감시키는 것이 서보 성능을 향상시키는 데 있어 중요하다.

본 연구에서는 DC전류제어방식과 非轉流모드제어방식으로 BLDCM을 구동하는 경우에 운전속도와 부하변화에 따른 맥동토크와 속도맥동 등의 轉流현상을 해석한다. 그리고, 역기전력의 폭과 저항이 맥동토크와 속도맥동에 미치는 영향을 해석한다. 또한, 轉流현상이 속도 - 토크 특성에 미치는 영향을 검토한다.

2. 히스테리시스 전류제어기에 의한 구동시스템

그림 1은 BLDCM의 각 상에 구형파전류를 인가하기 위해서 히스테리시스 전류제어기(HCR : Hysteresis Current Regulator)를 사용한 전류제어형 전압원 인버터의 구성도이다. 구동시스템에서

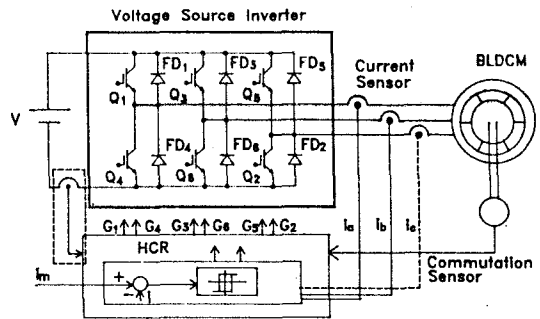


그림 1. BLDCM의 구동시스템

HCR의 비교전류는 인버터 입력단의 DC 전류 또는 모터 입력단의 상전류를 사용한다.

그림 2. a)는 인버터 입력단 DC 전류를 검출하여 이것에 의해 HCR이 2상의 스위칭소자를 동시에 ON/OFF시키는 기존 방식(DC전류제어방식)에서의 전류파형과 스위칭신호 파형이다. 이는 ac상에서 bc상으로 轉流되는 예이며, 여기서 a, b, c상을 각각 감쇄 모드상, 상승모드상, 非轉流모드상이라 한다. 그림 2. b)는 非轉流모드의 상전류를 60°(전기각)마다 검출하고, 이 전류와 기준전류를 비교하여 ON/OFF신호를 발생시키는 방식(非轉流모드제어방식)으로 그 기간 동안 상승모드상은 ON되어 있다. 본 연구에서는 이들 두 방식에서의 轉流현상과 이 토크 및 속도에 대한 영향을 고찰한다.

2.1 DC전류제어방식

HCR의 스위칭신호와 轉流센서신호를 고려하여 2상용전구간과 轉流구간의 전류 미분방정식을 일반적으로 표현하면 식(1)과 식(2)와 같다.

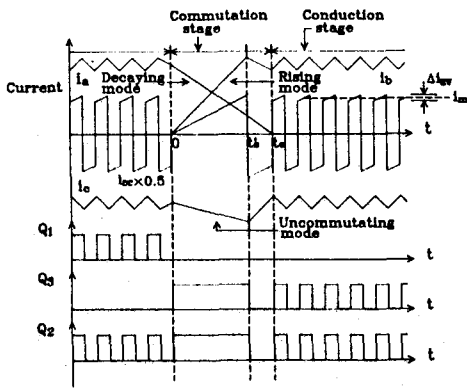
$$di_n/dt = (H_{oc}V - 2Ri_n - e_a - e_b - e_c)/(2L) \quad (1)$$

여기서, $e_{a,b,c}$: 각 상의 역기전력
첨자 n : a, b, c 상을 표시.

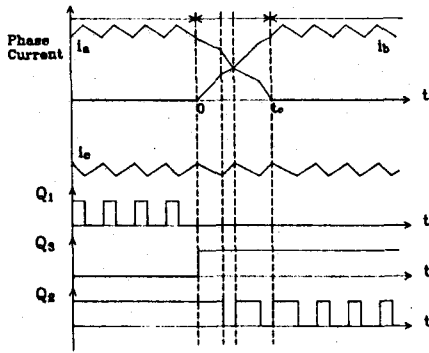
H_{oc} : DC전류제어방식에서 HCR의 ON/OFF 상태

$$|i_{oc}| \geq i_m + \Delta i_{HW}/2 \Rightarrow H_{oc} = 1 \text{ (IGBT ON)}$$

$$|i_{oc}| \leq i_m - \Delta i_{HW}/2 \Rightarrow H_{oc} = -1 \text{ (IGBT OFF)}$$



(a) DC전류제어방식



$$\begin{aligned} di_r/dt &= [CS_r V(1.5H_{bc} + 0.5) - 3R_i r - 2e_r + e_d + e_u]/(3L) \\ di_d/dt &= [-CS_d V - 3R_i d + e_r - 2e_d + e_u]/(3L) \\ di_u/dt &= [CS_u V(1.5H_{bc} - 0.5) - 3R_i u + e_r + e_d - 2e_u]/(3L) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 첨자 r, d, u : 각각 상승, 감쇄, 非轉流모드상을 나타냄
 CS_r, CS_d, CS_u : 각각 상승, 감쇄 및 非轉流모드에
 해당하는 상의 轉流센서신호를 나타내는 변수

$$CS_r, CS_d, CS_u = \begin{cases} 1 : i_r, i_d, i_u > 0 \\ 0 : i_r, i_d, i_u = 0 \\ -1 : i_r, i_d, i_u < 0 \end{cases}$$

맥동토크 ΔT_q 는 식(3)으로 정의되고, 히스테리시스 밴드는 충분히 작아서 2상통전구간에서의 상전류는 지령치와 같다고 가정한다.

$$\Delta T_q(t_c') = (T_{qc}(t_c') - T_{qn}) \quad (3)$$

여기서, $T_{qc}(t_c')$: 轉流구간에서의 최대맥동토크
 $T_{qn} = 2 E_m i_m$: 2상통전구간에서의 평균토크

그리고, 역기전력의 평탄한 폭이 120°인 경우 轉流구간에서의 감쇄모드상의 역기전력 e_d 는 식(4)와 같다.

$$e_d = E_m(1 - t/T_s) \quad (4)$$

여기서, E_m : 역기전력의 평탄한 부분의 크기
 $T_s = \pi/(6 \omega_e)$
 ω_e : 전기적 회전 각속도

부록에 있는 실험 BLDOM의 사양에 따라 식(1)~식(4)를 이용하

여 정격전류 지령치에서의 전류와 발생토크 파형을 시뮬레이션한 것이 그림 3이다. 그림 3에서 BLDOM의 운전조건에 따라 세가지의 轉流현상이 일어남을 알 수 있다. 각각의 轉流현상 및 이 때의 발생하는 맥동토크는 아래와 같이 구해진다.

1) case 1

a상 전류가 감쇄하기 전에 b상 전류가 t_c' 에서 기준전류 i_m 에 도달하는 경우이다. a상 전류는 t_c 에서 0이 되고, 轉流는 끝나게 된다. 맥동토크는 t_c' 에서 최대가 되고, 이 때의 맥동토크 식(5)와 같다.

$$\Delta T_q(t_c') = \frac{E_m(2 - t_c'/T_s) i_a(t_c')}{\omega_m} \quad (5)$$

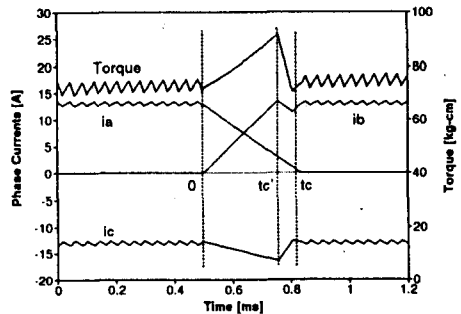
여기서,

$$i_a(t_c') = \frac{E_m}{3L} \frac{1}{T_s} t_c'^2 - \frac{V + 2E_m}{3L} t_c' + i_m$$

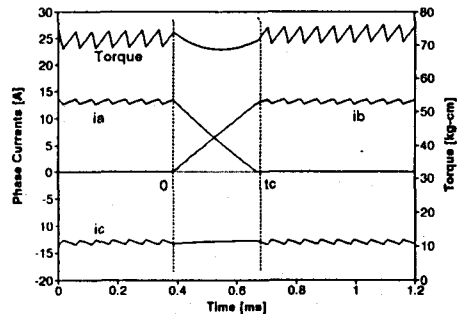
$$t_c' = \frac{2(V - E_m)}{E_m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{3L E_m i_m}{2(V - E_m)^2 T_s}} \right) T_s$$

2) case 2

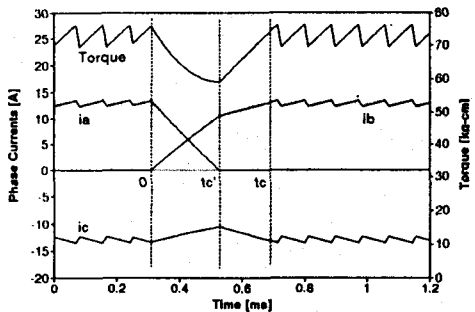
a상 전류가 t_c 에서 0이 됨과 동시에 b상 전류가 기준전류에 도



(a) case 1 : 1000[rpm], 13[A]



(b) case 2 : 2195[rpm], 13[A]



(c) case 3 : 3000[rpm], 13[A]

그림 3. DC전류제어방식의 상전류와 토크파형

달하는 경우이다. 이 경우의 전류는 히스테리시스 밴드 이내로 제한되며 따라서 맥동토크는 나타나지 않는다고 가정한다.

3) case 3

b상 전류가 기준전류 i_m 에 도달하기 전에 a상 전류가 t_c' 에서 0이 되고, b상 전류는 t_c' 에서 기준전류에 도달한다. $0 < t < t_c'$ 에서 발생토크는 감소하고, t_c' 에서 최소가 된다. 이 때의 맥동토크는 다음 식(6)과 같다.

$$\Delta T_q(t_c') = \frac{2 E_m [i_b(t_c') - i_m]}{\omega_m} \quad (6)$$

여기서,

$$i_b(t_c') = \frac{E_m}{6 L} \frac{1}{T_s} t_c'^2 - \frac{2(V - E_m)}{3 L} t_c' + i_m$$

$$t_c' = \frac{V + 2 E_m}{2 E_m} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{12 L E_m i_m}{(V + 2 E_m)^2 T_s}} \right] T_s$$

식(5), (6)은 저항을 무시하고 역기전력의 폭이 120°인 경우의 토크맥동을 구한 것이다. 평한한 폭이 120°보다 커서 감쇄모드상의 역기전력이 轉流구간에서도 일정하다면, case 1, 2, 3은 각각 $V > 4E_m$, $V = 4E_m$, $V < 4E_m$ 인 속도영역에서 발생한다.

그림 4는 속도와 부하전류에 따른 맥동토크를 구한 것이다. case 1에서의 맥동토크는 2상통전구간에서의 평균토크보다 크게, case 3에서는 적게 나타난다. case 3이 일어나는 고속영역에서는 轉流의 영향으로 평균토크가 감소하여 속도 - 토크 특성 곡선의 운전영역을 감소시킬 수 있다.

또, 부하가 증가함에 따라 맥동토크도 증가함을 알 수 있다. 역기전력의 폭이 120°보다 큰 경우는 120°인 경우보다 저속에서는 크게, 고속에서는 적게 나타난다. 표 1은 저항을 고려한 때의

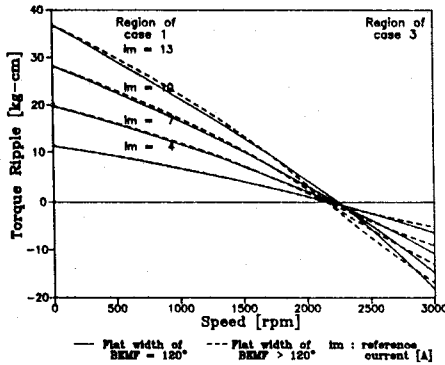


그림 4. 맥동토크의 크기

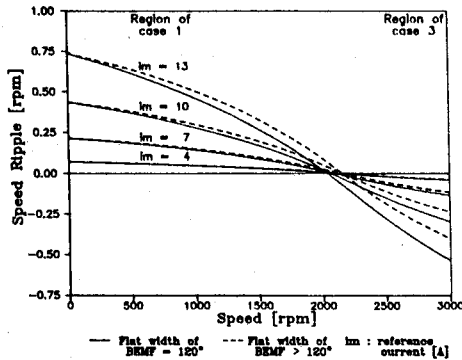


그림 5. 속도맥동의 크기

맥동토크의 크기를 나타낸다. 저항을 고려하면 저속영역에서의 맥동토크는 적게 나타나고, 고속영역에서는 크게 나타남을 알 수 있다.

표 1. 저항을 고려한 맥동토크[kg-cm]

운전 영역	저항 무시	저항 고려
case 1, 1000[rpm]	36.60	27.86
case 2, 2195[rpm]	0.90	0.80
case 3, 3000[rpm]	-18.35	-19.34

※ 전류 지령치 = 13[A]

그림 5는 맥동토크에 의한 속도맥동 $\Delta \omega_m$ 을 다음 식(7)에 의해 구한 것이다. 본 연구의 실험 모터에 대해서는 최고 0.75[rpm]의 속도맥동이 발생하지만, 관성모멘트가 작은 모터의 경우에는 相轉流로 인한 속도맥동이 정속제어특성에 영향을 미칠 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \omega_m &= \frac{1}{J_r} \int_0^{t_c'} (T_{ac}(t) - T_{an}) dt \\ &= -\frac{E_m}{\omega_m J_r} t_c'^2 \left[\frac{E_m}{12 L T_s^2} t_c'^2 - \frac{(V + 3E_m)}{9 L T_s} t_c' \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{V - E_m}{3 L} - \frac{i_m}{2 T_s} \right) \right] \quad (7) \end{aligned}$$

2.2 非轉流모드제어방식

전기적으로 1/2주기에 후반부 60°동안의 非轉流모드전류가 기준전류를 추종할 수 있도록 HCR로 제어하는 방식이다. 그 기간 동안 상승모드의 상은 계속 ON, 非轉流모드의 상은 ON/OFF하므로, 기존의 DC전류제어방식과 같이 두 상을 동시에 ON/OFF하는 경우보다 스위칭손실은 적어진다. 그리고, 非轉流모드상의 스위칭소자가 OFF되면 환류모드가 되어 스위칭주파수가 감소하게 된다. 非轉流모드제어방식에서 2상통전구간과 轉流구간의 전류미분 방정식은 각각 식(8)과 식(9)가 된다.

$$di_u/dt = (H_u V - 2Ri_u - e_a - e_b - e_c)/(2L) \quad (8)$$

여기서, H_u : 非轉流모드제어방식에서 HCR의 ON/OFF 상태

$$\begin{aligned} i_u &\geq i_m + \Delta i_{IH} \Rightarrow H_u = 1, \text{ (IGBT ON)} \\ i_u &\leq i_m - \Delta i_{IH} \Rightarrow H_u = 0, \text{ (IGBT OFF)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} di_r/dt &= [CS_r V(H_u + 1) - 3Ri_r - 2e_r + e_d + e_u]/(3L) \\ di_d/dt &= [CS_d V(H_u - 2) - 3Ri_d + e_r - 2e_d + e_u]/(3L) \\ di_u/dt &= [CS_u V(2H_u - 1) - 3Ri_u + e_r + e_d - 2e_u]/(3L) \quad (9) \end{aligned}$$

그림 6은 식(8)과 식(9)로 case 1의 운전영역에서의 상전류와 토크파형을 구한 것이다. 非轉流모드제어방식에 의해서 非轉流모드의 c상 전류는 히스테리시스 밴드이내로 제한되며, 轉流에 의한 맥동토크는 나타나지 않는다. 따라서, 그림 4와 5에 나타난 저속운전영역의 토크맥동과 속도맥동은 나타나지 않는다. 또한, 그림 3. a)의 DC전류제어방식에 비해 2상통전구간에서의 스위칭 주파수는 매우 낮음을 알 수 있다. 그러나, 이 방식에서 case 2와 case 3의 경우는 DC전류제어방식과 같은 轉流현상이 나타난다.

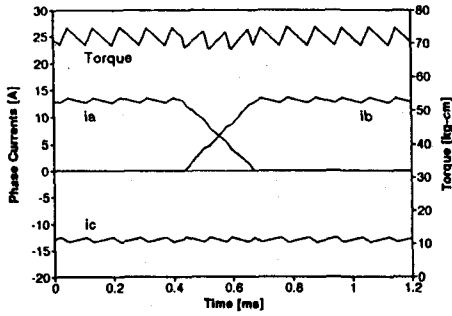


그림 6. 非轉流모드제어방식의 상전류와 토크파형
(case 1 : 1000[rpm], 13[A])

3. 속도 - 토크 특성에 대한 轉流의 영향

모터의 속도 - 토크 특성에서 운전영역의 한계는 모터에서의 발열과 온도 상승에 의해서 주어지는 최대연속운전영역과 모터의 구동시스템과 모터의 기계적 제약에 의해 제한되는 순시최대운전영역 등으로 분류할 수 있다.

그림 7은 轉流에 의한 맥동토크를 고려한 평균토크를 속도에 따라 계산한 것이다. case 3이 일어나는 $V < 4E_m$ (본 연구에 사용한 모터의 경우는 2195[rpm]이상)의 운전영역에서는 평균토크가 서서히 감소함을 알 수 있다. 그러나, 3160[rpm]이상의 속도에서는 평균토크가 급격히 감소하는 데, 이것은 轉流구간이 300(전기각)를 넘어서도 轉流가 끝나지 않아 상승모드의 상전류가 전류지령치에 이르지 못하는 경우이다. 이러한 경우의 상전류와 토크파형을 시뮬레이션한 것이 그림 8이다. 이 운전영역에서는 HCR의 전류제어동작이 원활히 수행되지 않아 발생토크의 맥동은 매우 심하고 평균토크도 현저히 저하함을 알 수 있다.

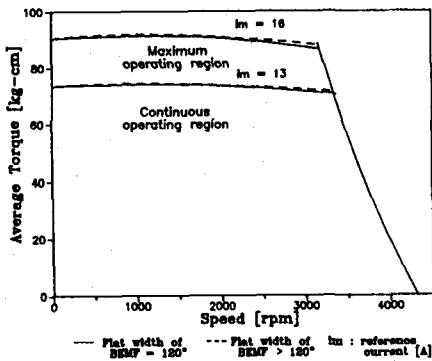


그림 7. 속도 - 토크 특성 곡선

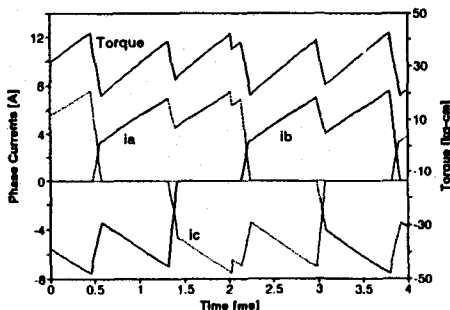


그림 8. 轉流구간이 300를 넘는 경우의 상전류와 토크파형
(4000[rpm], 7[A])

4. 결론

BLOM의 DC전류제어방식과 非轉流모드제어방식에 대하여 相轉流로 인하여 발생하는 맥동토크와 이것에 의한 속도맥동을 해석하였다. 그리고, 속도 - 토크특성에 대한 相轉流의 영향을 검토하였다.

非轉流모드제어방식으로 저속영역에서의 맥동토크와 속도맥동을 저감시키고, 스위칭 손실과 스위칭 주파수를 감소시킬 수 있었다.

轉流현상은 속도에 따라 다르게 나타나고, 부하가 증가함에 따라 맥동토크와 속도맥동이 증가한다. 轉流에 의한 맥동토크는 저속영역에서는 평균토크보다 크게, 고속영역에서는 적게 발생하여 속도 - 토크 특성 곡선의 운전영역을 제한시킨다. 그리고, 또, 고속영역에서의 맥동토크와 속도맥동은 역기전력의 폭이 120°보다 크거나 저항이 작은 경우에 감소한다.

참고 문헌

- [1] R. Krishnan, "Selection Criteria for Servo Motor Drives," IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol. IA-23, No. 2, pp. 270 - 275, 1987.
- [2] Renato Carlson et al., "Analysis of Torque Ripple due to Phase Commutation in Brushless DC Motor", Conf. Rec. IEEE/IAS Annual Meeting, pp 287-292, 1990.
- [3] Gwang - Heon Kim, Seog - Joo Kang, Jong - Soo Won, "Analysis of the Commutation Torque Ripple Effect for BLOM fed by HCRPWM - VSI" IEEE, Conf. on APEC'92, pp. 274 - 284, 1992
- [4] T. J. E. Miller, Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives, Clarendon Press · Oxford, 1989.

부 록 - 실험 BLOM의 사양

정격 회전수	N_m	3000[rpm]
정격 토크	T_{cn}	71[kg-cm]
상당 저항	R	0.48[Ω]
상당 인덕턴스	L	4.4[mH]
역기전력 상수	K_E	0.058[V/rpm]
토크 상수	K_T	5.5[kg-cm/A]
인버터입력단 DC전압	V	250[V]
정격 전기자 전류	I_{cn}	13[A]
회전자 관성모멘트	J_r	0.004[kg-m ²]
극쌍수	P	3