

# Lead Angle 제어기법을 적용한 자동차용 워터펌프 제어

박준성\*, 김진홍\*, 최준혁\*, 구본관\*, 정인성\*  
전자부품연구원\*

## Lead Angle Control Scheme for Automotive Water Pump

Joon Sung Park\*, Jin Hong Kim\*, Jun Hyuk Choi\*, Bon Gwan Gu\*, and In Soung Jung\*  
Korea Electronics Technology Institute\*

### ABSTRACT

최근 고유가 문제와 환경에 대한 관심 증가로 인해 친환경 저연비 자동차에 대한 기술 연구가 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다. 이 가운데서도 특히 반도체 및 배터리의 급속한 기술발전으로 자동차용 부품들이 기계식 방식에서 전자식 방식으로 대체되고 있다. 그 중에서 전동식 워터펌프는 엔진의 회전에 연동된 타이밍 벨트로 구동되는 기존의 기계식 펌프와 달리, 펌프부에 전기모터 및 제어기가 결합되어 독립적인 구동능력을 갖추고 있다. 자동차 동력효율을 높이기 위해 내연기관 및 주변 전장장치들의 온도를 주행조건에 따라 제어하여 적정하게 유지시킬 필요가 있으며 이를 위한 자동차 부품으로 전동 워터펌프의 중요성이 커지고 있다. 본 논문에서는 이와 같은 자동차용 전동워터펌프 제어기 개발을 위하여 브러시리스형 DC모터를 적용하였다. 브러시리스형 DC모터는 고속 및 큰 부하에서 Back EMF 대비 전류의 지상 성분이 발생하여 상전류 증가 및 전체 효율을 떨어뜨린다. 이에 본 연구에서는 Lead Angle의 양을 계산하는 기법을 이용하여 워터펌프에 적용하였다.

### 1. 서론

기존 내연기관의 냉각시스템은 엔진의 회전에 연동된 타이밍 벨트로 구동되는 기계식 펌프로 냉각수 순환의 필요성 여부와 상관없이 엔진속도에 연동되어 독립적으로 동작할 수 없다. 이를 전동식으로 대체하게 되면 필요한 만큼만 가변 제어함으로써 에너지 소모량을 크게 절감할 수 있다. 즉, 전동워터펌프 기술개발을 통하여 엔진 연소효율 상승에 따른 환경오염 배기가스 배출의 감소효과를 얻을 수가 있으며, 자동차의 연비향상 효과가 크다. 전동워터펌프는 기존의 내연기관에 공용으로 적용하여 연비향상을 구현할 수 있을 뿐 아니라, 차세대 차량의 구동방식에 따른 하이브리드 차량 및 전기차량의 냉각에 필수적으로 요구되는 핵심부품이다.

현재 자동차 시스템은 12V시스템으로써 적용하고자하는 워터펌프 모터의 출력은 약 350W급으로 대용량 전류가 필요하게 된다. Back EMF대비 전류의 지상 성분이 크게 발생하여 상전류의 증가 및 전체 효율이 떨어지며, 고속운전이 어려워진다.

BLDC모터 및 제어기는 영구자석의 고밀도화/저가격화와 함께 반도체 소자의 저가격화로 많은 산업 분야에서 활용되고 있으며, 특히 최근 고유가 문제로 인한 친환경 저연비 자동차에

대한 관심과 함께 자동차에서도 많이 적용이 되고 있다. 또한, DC 모터 대비 정류자, 브러쉬가 없어 효율이 높고, 소음이 적으며, 내구성이 좋은 장점이 있다.<sup>[1]</sup>

BLDC모터는 일반적으로 120도 도통방식을 많이 사용한다. 120도 도통방식 제어 시 Back EMF와 상전류의 위상을 일치시켜 최소의 전류로 최대의 출력 토크를 발생시킨다. 그러나 고속운전 하에서 큰 부하가 발생할 경우 상전류와 주파수가 증가하여 모터 상인덕턴스에 의한 임피던스가 증가하여 상전류를 Back EMF에 비하여 상전류 지상이 발생한다. 이러한 현상은 상전류의 양을 증가시켜 전체 시스템 효율을 감소시킬 뿐 아니라 모터의 출력 면에서도 감소를 가져오게 된다.<sup>[2][3][4]</sup>

본 논문에서는 출력전류를 조정하여 Back EMF와 일치시킬 수 있는 기법을 적용하였다. 적용된 기법은 상전류의 최대치와 DC link 전압의 정보를 이용하여 수학적 계산으로 구한다.<sup>[4]</sup> 이 기법을 그대로 적용하기 위해서는 고성능 프로세서가 필요하게 된다. 하지만 본 논문에서 적용하고자하는 전동워터펌프 양산성을 확보하고자 8bit 프로세서를 채용하였으며, 계산 결과는 table화하여 적용하였다.

### 2. 본론

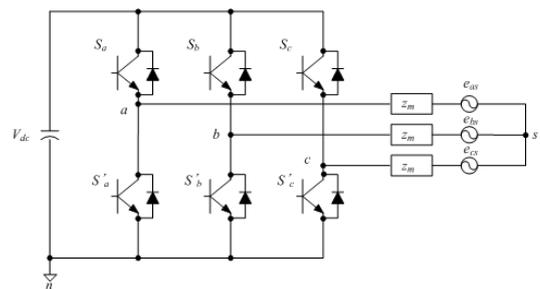


그림 1 BLDC 모터와 인버터 구조

BLDC 모터는 저항 성분 R, 인덕터 성분 L, Back EMF 성분으로 구성되어 있으며, 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a - e_{as} \\ V_b - e_{bs} \\ V_c - e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$e_{as}$ ,  $e_{bs}$ ,  $e_{cs}$ 는 Back EMF를 나타낸다. 모터의 속도가 낮을 경우 전류가 Back EMF에 비하여 늦게 인가하더라도 전체 주 기대비 전류 증가 속도가 상대적으로 빠르기 때문에 위상차가

많이 발생하지 않는다. 그러나 속도가 높은 상태에서는 상대적으로 전류를 증가 시키는 전압도 줄어들고 상대적인 전류 주기 시간도 줄어들기에 Back EMF와 상전류의 위상차가 많이 발생한다. 따라서 고속에서는 상전류를 미리 증가시키는 Lead angle 제어가 필요하다.

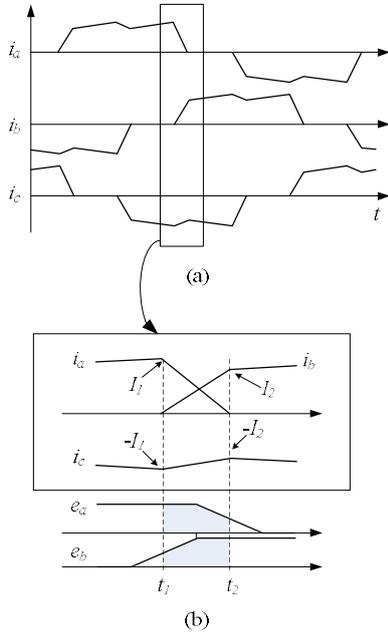


그림 2. 상변환시의 전류

수식 (1)에서 상대적으로 작은 저항 성분을 0으로 보고, a상에서 b상으로 도통되던 전류가 c상에서 b상으로 도통되도록 상변화가 발생할 때의 동적특성은 다음과 같이 표현된다.

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -V_{dc} - e_{as} \\ 2V_{dc} - e_{bs} \\ -V_{dc} - e_{cs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

수식 (2)의 양변을 적분하여 상변화 시간에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$t_2 - t_1 = \frac{L(I_1 + I_2)}{V_{dc}} \quad (3)$$

식 (3)을 사용하면 상변화시의 변화 시간을 알 수 있게 되고, 변화 시간을 알게 되면 Lead angle의 양을 알 수 있게 된다. 그러나, 식 (3)에서  $I_1$ 은 상전류의 Peak치를 측정함으로 인하여 쉽게 구할 수 있으나,  $I_2$ 는 측정하기에 어려움이 있다. 그래서 식(2)의 3번째 항을 이용하여 다음과 같이 추정하였다.

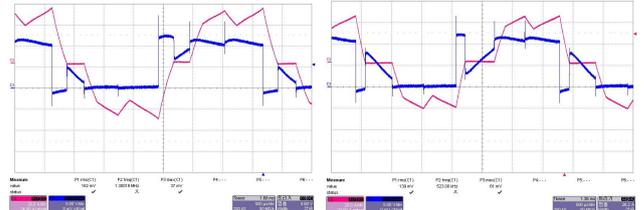
$$I_2 = \frac{4V_{dc} + 3E_{cs}}{2V_{dc} - 3E_{cs}} I_1 \quad (4)$$

식 (3)과 식(4)로부터 다음과 같이 Lead angle 양을 구할 수 있다.<sup>[4]</sup>

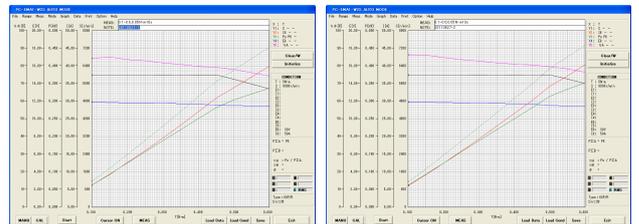
$$\theta = \frac{6LI_1\pi f}{2V_{dc} - 3E_{cs}} \quad (5)$$

식 (5)에서 Back EMF는 속도에 비례하고, DC link 전압의 경우 자동차시스템은 DC 12V 배터리로 이루어져 있어서 식 (5)는 전류와 주파수에 대한 식으로 간단하게 표현될 수 있다. 8bit 프로세서에 적용하기 위해서 전류와 주파수에 대한 식을 table화하여 구현하였다. 그림 3은 모터 상전압 및 상전류의 파

형이며, 그림 4는 무부하에서 0.6Nm까지 50mNmeksdnl로 연속 측정한 결과이다. Lead angle을 사용하지 않았을 경우 정격인 0.45Nm에서 효율이 79.3%로 측정되었으나, 제안된 기법을 사용하였을 경우 효율이 80.7%로써 약 1.4%증가했음을 알 수 있다. 또한, 기존의 방식의 경우 부하를 0.45Nm 인가하였을 때부터 속도가 떨어짐을 알 수 있으나, 제안된 기법을 사용하였을 때는 0.5Nm에서부터 속도가 떨어지기 시작하였다.



a) lead angle 없이 제어하였을 때 b) 제안된 방법을 사용하였을 때  
그림 3. 시험결과 (전압, 전류 파형)



a) lead angle 없이 제어하였을 때 b) 제안된 방법을 사용하였을 때  
그림 4. NTI그래프 비교

### 3. 결론

본 논문은 내연기관 및 전기자동차에 적용되는 12V DC용 전동 워터펌프 제어기 개발에 관한 것으로서 브러시리스 DC모터의 속도정보는 홀센서를 사용하였다. 대용량 전류의 발생 및 고속운전으로 인하여 발생하는 전류 지상문제를 해결하기 위하여 Lead angle 계산 기법을 적용하였다. 적용된 방법으로 효율은 기존 대비 1.4%증가하였으며, 속도운전 범위도 증가하였다.

### 참고 문헌

- [1] Zeraouia M., Benbouzid M.E.H., Diallo., "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion System : A Comparative Study," IEEE Trans. Vehicular Technology Vol. 55, Issues 6, pp. 1756 1764, Nov. 2006.
- [2] A. Tozune, and T.Takeuchi, "Improvement of torque speed characteristics of brushless motor by automatic lead angle adjustment," IPENC 2004, pp 583 587, 2004.
- [3] S. K. Safi, P. P. Acaarnley, and A. G. Jack, "Analysis and simulation of the high speed torque performance of brushless DC motor drives," IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 142, No. 3, May 1995.
- [4] 구분관, 박준성, 최준혁, 정인성, 원충연, "BLDC 모터를 위한 최적 Lead Angle 제어 기법 연구", 전력전자학회 2010년도 하계학술대회 논문집, pp. 59 60, 2010. 07.