

## 소형DC모터의 센서리스 속도제어기의 개발

· 장 충 민\* 김 응 백\* 전 형 육\* 박 상 현\* 전 향 식\*\* 최 영 규\* 김 성 신\*  
부산대학교 전기공학과\*, 대우중공업\*\*, Dept.of. Electrical Pusan National Univ., Daewoo heavy industries Co.Ltd.\*\*

### Sensorless Speed control of micro DC motor

\* Hong-Min Jang\* Young-Bak Kim\* Hyoung Wok Jeon\* Sang-Hyun Park\* Hyang-Sig Jun\*\* Young-Kiu Choi\* Sungshin Kim\* Dept.of. Electrical Pusan National Univ., Daewoo heavy industries Co.Ltd.\*\*

**Abstract** - We propose a new method for detecting Backemf of a motor and estimating parameters of a motor using Recursive Least Square Estimator. The motor speed is obtained from the estimated parameters. We experiment the PID speed controller with the estimated speed.

### 1. 서 론

소형 마그네틱 DC모터는 소형경량화, 에너지 절약에 대응하는 각종 기기의 구동 장치로서 생활 주변 부품, 계측 기기, 컴퓨터 주변기기, 자동차등의 전 산업 영역에 사용되어지고 있다. DC모터의 용이한 제어성을 이용한 웅답속도가 느리고 부하 변동이 거의 없는 상황에 선 저가의 오픈 루프 제어가 사용되어지고, 속응성과 강인성 및 정확한 위치 및 속도제어가 요구되는 곳에선 엔코더를 이용한 피드백 제어가 사용되고 있다. 부하가 변동하는 곳에서 빠른 속응성과 강인성을 가지면서 속도오차의 허용도가 약간 있는 요구상황에선 전자의 방식은 수행성능의 문제가, 후자의 경우는 경제적, 소형화 문제 가 대두된다.

따라서 본 논문에선 위에서 언급한 문제점에 있어서 중간적인 요구조건이 발생하는 상황에 적합한, 역기전력을 모터의 회전수로 피드백 받아 속도를 제어하는 방법을 제안한다. 모터가 회전하는 것은 프레밍의 원순법칙에 의한 것이지만, 동시에 플레밍의 오른손법칙에 의한 발전기도 되어, 회전수에 비례한 역기전력이 발생한다는 것에 착안한 방법인데, 기존의 역기전력 검출방법은 브리지회로를 이용한 브리지 서보방식이 있으나 브리지회로 구성에 의한 저항의 전력손실과 단방향의 미지의 고정 속력 값만을 유지하는 방법이라 동적적인 속도제어에서는 사용할 수 없는 문제점이 있다.

새로운 역기전력 검출방법으로 모터 구동방식을 PWM으로 하고 PWM의 LOW상태가 모터 구동회로에 전원을 공급하지 않은 상태이므로 이 순간 모터 양단의 전압이 모터 회전에서 발생하는 발전 전압임을 이용하여 LOW가 되는 순간부터 전기적 시정수에 기초한 잔류전류의 소멸시간만큼을 대기한 후에 모터 발전전압을 검출하게 된다. 이 검출된 전압을 속력값으로 변환하기 위하여 역기전력 상수와 전압 검출회로의 손실 전압 등 모델링되지 않은 전압을 DC성분으로 가정하고 두 관계를 일차 선형 관계식으로 둔다.

이 선형 관계식에 기초하여 매 샘플링마다 엔코더를 통한 속도 측정 폴스값과 검출된 역기전력값을 자동으로 PC로 load한 후 Recursive Least Square Estimator 알고리즘으로 구현된 파라메타 추정기를 적용하여 두 개의 파라메타를 오프라인으로 계산한다. 이렇게 구한 파라메타를 이용하여 검출된 역기전력을 실제 속도로 추정하고 이 추정된 값을 피드백 받아 PID알고리즘으로 속도제어를 행한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 기존의 역기전력 검출 방법

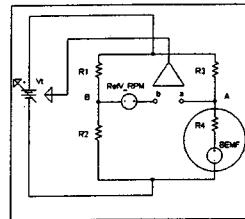


그림 1 브리지 서보 회로

Fig. 1 Bridge servo

$$\begin{aligned}
 R_1, R_2 &= R_3, R_4 \\
 V_B &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_t \\
 V_A &= \frac{R_4}{R_3 + R_4} (V_t - V_{emf}) + V_{emf} \\
 V_A - V_B &= \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_t + \left( 1 - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_{emf} \\
 &= \left( \frac{1}{R_3 + R_4} - \frac{1}{R_1 + R_2} \right) V_t + \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{emf} \\
 &= \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{emf} \\
 V_{BA} &\propto V_{emf}
 \end{aligned}$$

$V_{ba}$ 를 항상 0으로 조절하면 모터의 역기전력을  $RefV\_RPM$ 에 비례하여 일정하게 유지할 수 있다. 정속 유지에 간단하고 저렴하게 구현할 수 있는 방법이지만, 원하는 속도와 가변적인 속도제어 구현에는 문제점이 있다. 그래서 본 논문에서는 모터구동을 전력 효율에 유리한 PWM방식을 이용하여 PWM의 LOW구간에서 모터 양단 전압은 역기전력임을 확인하여 새로운 역기전력 검출방법을 제시한다.

#### 2.1.1 새로운 역기전력 검출방법

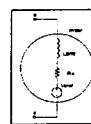


그림 2  
Fig. 2

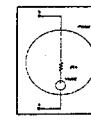


그림 3  
Fig. 3

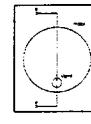


그림 4  
Fig. 4

그림2: 과도상태 모터등가 모델:  $V_{BA} = L \frac{di}{dt} + iR_a + V_{emf}$   
그림3: PWM HIGH 모터등가 모델:  $V_{BA} = iR_a + V_{emf}$   
그림4: PWM LOW 모터등가 모델:  $V_{BA} = V_{emf}$   
단,  $V_{emf} = C_{emf} \times RPM$

PWM LOW 구간에선 모터 양단에 전압이 인가되지

않으므로 그 순간 모터양단에 발생하는 전압이 역기전력을 알 수 있다. 하지만, LOW 직전에 존재한 전류의 소멸이 R과 L값에 의해 지연되기 때문에 시정수에 기초한 실험적 검증에 의해 전류 소멸시간을 구하고, 그 시간(Tid)만큼 대기 후에 안정된 역기전압을 검출하게 된다.

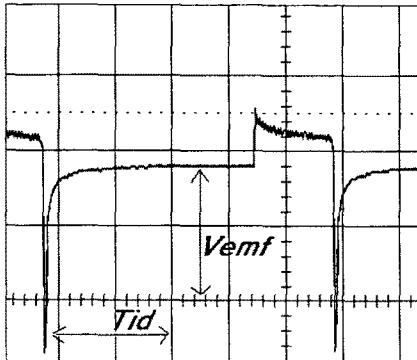


그림 5 PWM인가시 모터양단의 전압 파형  
Fig. 5 Waveform of motor terminal voltage when PWM is applied

보다 더 안정된 전압을 검출하기 위해 하드웨어적으로 Low Pass Filter를 거치고, 소프트웨어적으로 AD conversion을 10번 반복한 평균값 필터링을 통해 검출하게 된다.

## 2.2 역기전력과 속도와의 관계

역기전력은 모터회전속도에 비례하여 발생하게 되지만 본 논문에서 제시한 역기전력검출방법이 정확한 역기전력을 검출한다고 볼 수 없다. 그래서 속도와 검출된 역기전력치를 기울기성분의 역기전력 상수와 모델링되지 않은 DC전압성분의 일차 선형관계식으로 둔다.

$$BEmf^{Detect} = BEmf + dc_{unmodel} \\ = c_{emf} \times RPM^{Detect} + dc_{unmodel}$$

$c_{emf}$ 와  $\hat{dc}_{unmodel}$  가 추정해야 할 파라메타

$BEmf^{Detect}$ 는 검출회로상에서 검출한 모터 역기전압  $RPM^{Detect}$ 은 엔코더를 통해 검출한 모터 회전속도

### 2.2.1 LSE를 이용한 파라메타 추정

#### Least Square Estimator [ L.S.E ]

$$A\theta + e = y \\ E(\theta) = e^T \cdot e \\ = \sum_{i=1}^m (y_i - a_i^T \cdot \theta)^2 \\ = (y - A\theta)^T (y - A\theta)$$

$E(\theta)$ 를 최소로 하는

$$\theta = (A^T A)^{-1} A^T y$$

#### Recursive Least Square Estimator

$k$ 개의 training Data로  $\hat{\theta} = (A^T A)^{-1} A^T y$  추정 후 새롭게 추가되는  $k+1$ 번째 data를 기준에 추정된 결과를 이용하여 그대로 추정하는 방법으로 연속해서 들어오는 데이터를 온라인으로 추정할 시 사용할 수 있다.

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + P_{k+1} a_{k+1} (y_{k+1} - a_{k+1}^T \cdot \hat{\theta}_k) \\ P_{k+1} = P_k - \frac{P_k a_{k+1} \cdot a_{k+1}^T}{1 + a_{k+1}^T P_k a_{k+1}}$$

#### Estimator of the parameter of motor driver

$$BEmf^{Detect} = BEmf + dc_{unmodel} \\ = c_{emf} \times RPM^{Detect} + dc_{unmodel}$$

$\hat{c}_{emf}$ 와  $\hat{dc}_{unmodel}$  가 추정해야 할 파라메타

$BEmf^{Detect}$ 는 검출회로상에서 검출한 모터 역기전압  $RPM^{Detect}$ 은 엔코더를 통해 검출한 모터 회전속도

$$A \begin{bmatrix} RPM_1^{Detect} & 1 \\ RPM_2^{Detect} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ RPM_m^{Detect} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{c}_{emf} \\ \hat{dc}_{unmodel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BEmf_1^{Detect} \\ BEmf_2^{Detect} \\ \vdots \\ BEmf_m^{Detect} \end{bmatrix}$$

#### 2.3 Microprocessor를 이용한 실험적 검증

모터의 파라메타를 추정하는 일은 손으로 계산하는 일이 번거롭고 시간을 요하게 되므로 이일을 자동으로 처리하도록 Estimator를 하드웨어적으로 설계하였다. 80c196를 이용해 모터의 PWM과 역기전력을 검출하도록 하고, 추정연산은 실수연산이고 계산량이 많아 16비트 정수형의 80c196으로 부족하여 PC를 이용해 추정연산을 하도록 설계하였다. 샘플링 시간을 5ms로 하였기 때문에 20개의 평균 데이터 쌍을 추정할 경우 6초정도의 시간이 소요된다. 즉 6초간만 모터를 접속하면 모터의 파라메타가 자동으로 추정된다.

##### 2.3.1. Estimator 구현

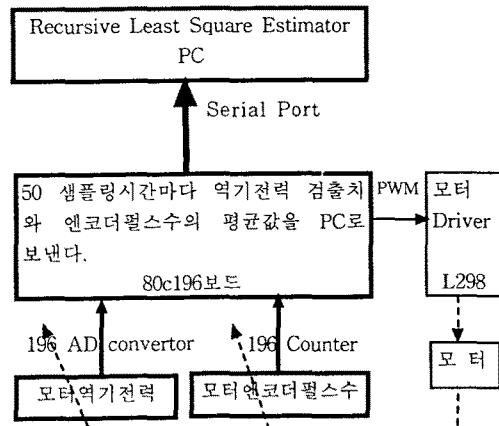


그림 6 Estimator 전체 개요도  
Fig. 6 Schematic of Estimator

그림 6에서 80c196보드에서 50샘플링시간마다, PWM값을 일정간격으로 증가시켜 각 속도치에서 50개의 역기전력치와 엔코더 펄스수의 평균치를 Serial Port를 이용해 PC로 보내면 새롭게 추가되는 data쌍을 이용해 Recursive Least Square Estimator를 이용해 파라메타를 추정하게 한다. 엔코더를 통해 속도를 추정하는 방법은 시간당 펄스수를 세는 M방식으로 저속에서 즉정 속도값의 정확도가 낮아지므로 0근처의 속도에는 추정 파라메타를 구하는데 제외시켰다.

표 1. 평균 역기전력과

실제 속도값

Table.1 Averaged  
back E.M.F and  
corresponding  
velocity

	mV	RPM
1	477.5686	1214.8465
2	584.6436	1485.8824
3	691.2231	1750.9191
4	796.2402	2021.0294
5	901.8677	2269.9632
6	1007.1040	2548.7868
7	1111.1040	2789.0797
8	1213.9650	3067.7206
9	1313.1230	3344.2279
10	1415.9790	3572.8676
11	1519.5430	3833.9338
12	1625.1220	4099.9632
13	1724.0600	4441.6544
14	1829.5260	4606.5044
15	1930.4990	4869.6529
16	2032.4580	5124.8162
17	2132.2390	5492.8676
18	2238.6720	5571.3971
19	2337.2310	5884.5221
20	2437.7560	6142.7206

표 1은 20개의 데이터 쌍을, 그림 7은 각 데이터를 그래프화한 것으로 그라프를 분석해 보면 두 모양이 거의 직선이고 두 직선의 관계가 일차의 선형관계식임을 직관적으로 알 수 있다. 이 데이터로 추정된 파라메터는  $\hat{c}_{emf} = 0.3965$ ,  $\hat{dc}_{unmodel} = -3.766$ 이다.

### 2.3.2. 속도제어 실험

그림 8의 첫 부분은 역기전력을 피드백 받아 정속도 2000rpm을 PID로 제어한 결과를 엔코더형 속도 측정기의 값으로 나타낸 것인데 정상상태에서 평균적으로 1986.6 RPM, 진동오차의 표준편차가 75.459RPM정도를 보였다. 실제 적용시 감속기어를 달게 되므로 대상 플랜트의 진동 오차는 감속 기어비만큼 줄여 진다. 만약 기어비가 20:1일 경우 진동 오차는 5.07RPM, 0.084

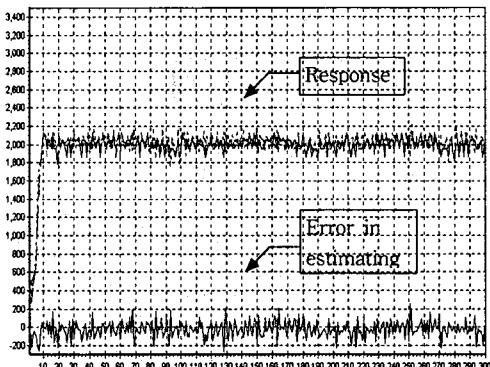


그림 8 실험결과 (2000 RPM)

Fig.8 Experimental results at 2000 RPM

RPS로 줄여지게 된다. 또 그림 8의 아랫부분은 엔코더로 검출한 속도값과 역기전력으로 추정한 속도값의 오차를 나타낸 것인데, 평균 오차  $-15.649\text{RPM}$ 으로 거의 0에 가깝고, 오차의 표준편차  $91.736\text{RPM}$ 의 분포를 갖는다. 역시 감속기어를 달 경우 (20:1), 평균오차  $0.7826\text{RPM}$  ( $0.0130\text{RPS}$ )이고 표준편차가  $4.5868\text{RPM}$  ( $0.0764\text{RPS}$ )로 줄여진다.

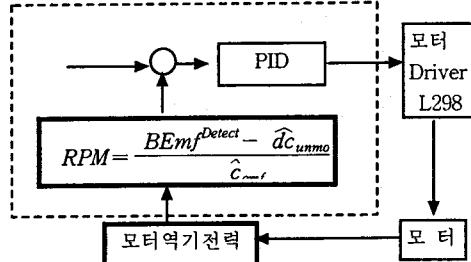


그림 9 속도제어 블록선도

Fig. 9 Block diagram of speed control

### 3. 결 론

소형 마그네틱 DC모터의 속도검출방법으로 새로운 역기전력 검출방법을 제안하였고 검출된 역기전력을 다시 속도로 추정하기 위해 Recursive Least Square Estimator 알고리즘을 이용하였다. 이렇게 추정된 결과를 실제 속도 측정기의 값과 비교하였고, 이 추정된 속도치를 이용해 PID 제어 실험을 하였다. 원칩 마이크로프로세서인 80c196으로 3개의 모터를 동시에 제어할 수 있는 회로의 집적성과 구조적 견실성의 장점을 가진다. 추정기의 설계시 속도측정기의 엔코더 속도검출 방법을 저속에선 T방식으로 고속에선 M방식을 병행하여 실제속도와의 오차를 줄이는 연구와 함께 80c196 ADconverter의 안정적 기준전압의 보장, 그리고 전압검출시 필터링에 대한 연구가 더 보강되어야 할 부분으로 생각된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 장홍민, 김용백, 이성훈, 최영규, "Development of Soccer Robot Using Neural Networks, Fuzzy logic" Proc of the 13th KACC, pp 248, 1998
- [2] S.A.SOLIMAN and A.M.AL-KANDARI, "Parameter identification of a separately excited DC Motor for speed control" Electric Machines and Power Systems, 26:831-838, 1998
- [3] S.Daniel-Berhe, H.Unbehauen "Physical parameters estimation of the nonlinear continuous-time dynamics of a DC motor using Hartley modulating functions method" Journal of the Franklin Institute 336(1999) 481,501
- [4] S.Weerasoorye, M.A.El-Sharkawi, "Identification and control of a DC Motor Using Back-Propagation Neural Networks" IEEE Trans. on Energy Conversion Vol. 6, No. 4, pp.663-669, 1991
- [5] 김용복, 박선호, "모터회전의 회로기술 - 제어용 및 스템핑 모터의 실용회로 설계" 도서출판 세화