

전기자동차 제어를 위한 센서신호 전처리기법에 관한 연구

장태규^o, 이승철, 하희두^{*}, 곽동호^{**}
중앙대학교, *한국전기연구소, **현대전자산업(주)

Sensor signal preprocessing technique applied to the development of an electric vehicle controller

T. G. Chang, S. C. Lee, H. D. Ha, and D. H. Kwak
Chung-Ang University, Korea Electric Research Institute, Hyundai
Electronics Inc.

Abstract

A new digital method of anti-aliasing is presented and is applied to the development of an electric vehicle controller. A layered processing structure and some finite-bit approximation technique, devised in this paper, are the key attributions to the design and implementation of the anti-aliasing filter. The performance of the implemented preprocessing system is tested with several experimental results.

서론

전기자동차 각 부위에서 얻어진 신호들을 실시간 처리하여 시스템 제어기 및 감시경보 장치에 사용할 수 있도록 하는 것은 자동차의 원활한 운전목적을 위해서는 물론이고, 전지 및 모터제어시스템 등의 안전과 피해 파급을 최소화하기 위한 신뢰성 측면에서 매우 중요한 사항이다. 전기자동차는 전지, 인버터, 모터등 여러가지 사항들의 유기적인 제어에 의해 운전되기 때문에 단편적인 사항이 아닌 전류, 전압 등 여러 사항들을 통합적으로 취합하고 해석해야 하며, 감시 및 이상진단등을 위한 정보를 얻을 수 있다. 따라서, 각종 센서신호들을 취합해서 통합해석이 가능한 구조로 센서신호 인터페이스 및 처리기를 개발할 필요가 있다.

이러한 목적으로 최근의 경향은 analog hardware형식으로 구현하던 부분을 가급적이면 디지털프로세서에 의해 소프트웨어로 대체시킴으로써 소형집적화를 가능케하여 경제성측면에서 유리하도록 많은 부분이 있고, 기능면에서도 상대적으로 우월하고 설계구현 및 운전에도 용통성을 가져오도록 하는 추세이다.[1][2] 따라서 시스템제어기 개발에 있어, 각 신호의 기능과 특성에 따라 적합한 형태의 입력 및 처리구조를 정하는 것과, 신호의 입력과 처리 과정에 왜곡현상을 방지해주는 디지털필터를 설계구현하는 것은, 효율적인 시스템의 구현 측면과 시스템의 신뢰성제고 측면에서 매우 중요한 사항이다.

이에 본 논문에서는 전기자동차 각 부위 신호의 기능 및 특성에 따라 처리주기를 달리하는 계층적 처리구조를 제시하고, 이에 준하는 디지털방식의 anti-aliasing 기법과 새로운 형태의 디지털필터 설계 및 구현 기법을 제시하였다. 또한 해당 cycle-time으로 직접 sampling에 의해 처리하는 방법과 비교실험 결과를 통하여 제시한 기법의 유용성을 확인하였다.

1. 전기자동차 신호들의 디지털처리주기 (processing cycle-time)

전기자동차의 각 부위로 부터 입력되는 신호들은 기능에 따라 서로 다른 시간단위로 디지털 처리를 할 필요가 있다. 이것은 주어진 디지털프로세서의 기능을 최대한 활용하여 효율성을 높이기 위해서, 빠른 처리를 요구하는 신호와 느린처리주기를 요구하는 신호들을 구별하여 이에 적합한 형태로 시스템제어기의 처리구조를 설계하여야 한다. 이때, 각 신호들의 처리 cycle-time은 시스템제어기의 성능을 결정하는 중요한 요소로서, sample 자연에 따른 전기자동차 응답지연 허용범위, 전기차 동특성 (mechanical and electrical time constant), 입력신호의 대역폭등을 복합적으로 고려하여 정하여야 한다.[3]

본 연구에서는 자동차 각 부위의 입력신호들을 기능에 따라 cycle-time을 10msec, 1sec, 10sec 3그룹으로 나누었다. 이중 시스템제어기의 기본 cycle-time에 해당하는 10msec는 자동차의 추진제어 알고리즘의 처리주기로서 매 10msec마다 모터인가로 그값들이 시스템제어기의 추진 알고리즘부로부터 계산되어 출력된다. 따라서 추진제어부에서 모터 토크값을 계산하는데 필요한 입력신호들인, 모터 속도, 전류, 가속페달신호등은 10msec주기로 입력되어 필요한 신호처리 과정을 거치게된다. 기본 cycle-time을 10msec로 정한 것은 자동차의 샘플자연응답이 약 100Km/hr를 기준으로 30cm, 20Km/hr를 기준으로 6cm이하가 되도록 허용범위를 설정한 것이다. 또한 이 값은 자동차의 국부 범위 기계적시정수 및 전기적시정수가 각각 수십초, 수초 이상임을 고려하여 충분히 적게 설정한 것이다. 진단과 monitor목적에 필요한 전지온도, 모터온도등 상대적으로 변화가 느린 신호들은 1초, 혹은 10초의 느린 cycle-time으로 처리하도록 하였다.

이상의 처리주기에 의한 계층별 처리구조는 그림 1에 나타낸 바와 같이 interrupt와 time-slot 할당에 의한 시분할 방식 (time-multiplexing)에 의해 구현하였다. 표 1에 각 신호들에 할당된 cycle-time을 나타내었다.

표 1. 전기자동차 각 부위 신호의 cycle-time 구분 예

처리주기 (cycle-time)	Analog	Digital (on/off)
외부 인터럽트	-	emergency button brake on main power failure
10msec	모터 속도, 모터전류, 차 운속도, 가속페달, brake 페달, 햄들	direction(전진, 후진, 중립, 주차), key (stop, aux, o n, start)
1sec	battery 전압, 전류 차량속도	DC link 전압, 전류 IGBT fault
10sec	모터온도, battery 온도 IGBT온도	모터온도, battery 온도 IGBT온도

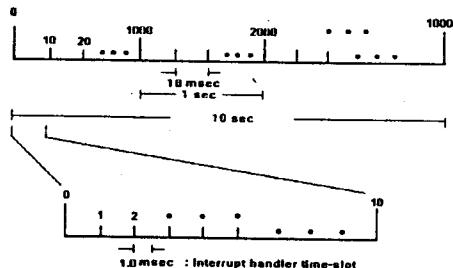


그림 1. 인터럽트와 time-slot 할당의 시분할방식 (time-multiplexing)에 의한 계층처리구조

2. 디지털방식에 의한 anti-aliasing

Analog 신호를 입력시킬때 신호에 첨가되어 있는 고주파 잡음의 양에 따라 sampling 과정에서 aliasing 현상에 의해 필요한 신호에 복구할수 없는 왜곡현상을 일으켜 운전 및 감시목적에 신뢰도의 저하를 가져올 수 있다.[4] 특히 전기자동차는 모터, 인버터등 각종 잡음발생원들이 밀집되어 있는 환경인 점을 고려할 때 이와같은 잡음에 의한 영향을 제거하기 위한 노력이 시스템의 신뢰도 제고 측면에서 매우 중요시된다.

일반적으로 aliasing에 의한 영향을 방지하기 위한 anti-aliasing 목적으로는 R(저항), C(캐패시터) 등의 analog 소자에 의한 lowpass 필터를 설계한다. 하지만 전기자동차의 경우와 같이 신호들의 처리시간 단위가 광범위한 경우는, 저주파 영역의 신호에 대해서는 R, C등의 analog 소자들의 값들이 크게되어 구현이 비 현실적이고, 소형집적회로에 장애요소가 된다. 예로, cycle-time을 10msec, 1sec, 10sec로 각각 설정한 경우, 샘플링주파수는 100Hz, 1Hz, 0.1Hz에 해당하므로 이에 해당하는 analog 필터의 차단주파수는 50Hz, 0.5Hz, 0.05Hz 이하 이어야 원하는 신호에 대한 왜곡현상을 충분히 작은 값으로 제한할 수 있다. 하지만 차단주파수를 f_c 라 할때 이를 구현하기 위한 1차 analog RC 필터를 예로하면 요구되는 R과 C의 값은 식 (1)과 같다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

상대적으로 느린 처리주기인 1초, 10초단위의 신호들은 필요한 analog필터의 R을 100KΩ으로 고정시킬경우 C 값이 3 μF, 30 μF 이상이되어 회로구현 측면에서 비 현실적이다. 따라서 상대적으로 느린 1초, 10초의 처리주기를 갖는 신호들에 대해서는 그림 2에 나타낸 바와 같이 다단계 decimation과 필터를 적용한 디지털방식에 의한 anti-aliasing을 제시하였다. 50Hz cutoff 주파수를 갖는 analog anti-aliasing 필터를 통과시킨 신호를 100Hz로 sampling하여 단계마다 10:1의 decimation을 거치도록 하고, 디지털필터의 통과대역은 sampling에 의한 최대 주파수의 0.1로하여 decimation에 의한 aliasing의 영향이 없도록 설계하였다.[4] 이 과정에 적용한 디지털필터는 다음절에서 기술한 바와 같이 마이크로컨트롤러 환경에서 실시간구현 목적으로 적합한 형태의 필터구조와 근사구현기법을 제시하여 설계한 특수한 형태의 선형위상필터를 사용하였다.

제시한 디지털방식에 의한 anti-aliasing 및 필터의 유용성을 확인하기 위하여 해당신호의 처리주기에 맞추어 직접 sampling 하여 signal conditioning 필터를 수행시키는 경우와 비교실험을 수행하였으며, 이결과 신호에 미치는 왜곡현상을 4절에서 비교 제시하였다.

3. 컨트롤러 환경에 적합한 디지털 필터의 설계

진단을 목적으로 기기동으로 부터 채집되는 자연적인 신호들은 인위적인 RF(radio frequency) 신호등과 달리 상대적으로 대역이 넓고, 주관심사가 신호로 부터 특징적인 현상을 검출하

여 진단하고자 하는 것이므로, 원하지 않는 배경 및 잡음을 제거하는 것도 중요하지만 원하는 정보가 담겨있는 신호의 절대적인 모양을 보존할 수 있도록 하는것이 매우 중요한 요소이다. 이와 같은 목적일 경우는 상대적으로 과도특성이 완만하고 광대역의 필터가 적합하다는 사실이 과거 연구[6]에 의해 보여졌으며, 이점에 착안하면 실시간처리에 적합한 특수한 형태의 선형위상필터를 설계하고 이를 근사에 의해 연산의 제약이 없이 마이크로컨트롤러 환경에서 구현할 수 있다.

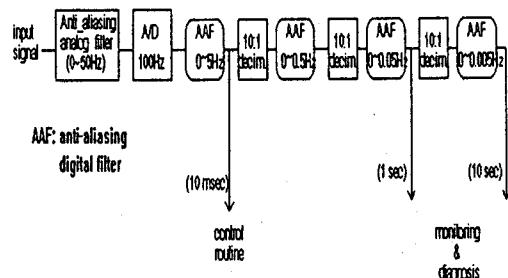


그림 2. 디지털방식에 의한 anti-aliasing 불러선도

Signal conditioning 필터의 구조는 $H(z) = 1 + z^{-N}$ 로 주어지는 빗살 형태의 FIR(finite impulse response) 필터(comb filter)와 $H_s(z) = z^{-2} - 2\cos\phi z^{-1} + 1$ 로 표현되는 arcade 제거기를 조합한 형태로 나타내어 진다. 이때 계수값을 finite-precision bit의 조합으로 표현될 수 있도록 근사치들을 사용하면, 마이크로컨트롤러 환경에서 실시간 처리에 적합하도록 유한한 bit수의 shift 와 add의 연산으로 필터를 구현할 수 있다. 이와같은 근사치들을 적용할 수 있는 이유는 전에 언급한 바와 같이 signal conditioning 필터는 목적상 요구되는 특성이 상대적으로 완만한 기울기의 천이대역을 갖는 것이 적합하고 통과대역에서의 평활성(flatness)에 대한 필요성이 심하지 않아 근간한다.[6]

본 논문의 경우 signal conditioning 필터는 대여폭이 0 ~ 0.1π이므로 comb 필터의 차수는 식 (2)에 의해 5차로 얻어졌다.

$$N = \frac{f_s}{4B \cdot W} = \frac{100}{4 \cdot 5} = 5. \quad (2)$$

f_s : sampling frequency, 100Hz.
B, W: bandwidth of the filter, 0 ~ 5Hz.

따라서, 5차인 $(z^{-5}+1)$ 의 comb 형태 필터에 $(z^{-2}+1.5z^{-1}+1)$, $(z^{-2}-0.5z^{-1}+1)$ 의 복소수 conjugate를 삽입하여 고주파 대역의 arcade를 제거시켜 0~5Hz의 passband를 갖는 signal conditioning 필터를 식 (3)과 같이 설계하였다.

$$H(z) = (z^{-5}+1)(z^{-2}+1.5z^{-1}+1)(z^{-2}-0.5z^{-1}+1) \quad (3)$$

이상에서 설계한 필터는 그림 3에 나타낸 바와 같이 실시간 처리를 위하여 9개의 지연을 위한 레지스터와 1bit shift, add, subtract 명령만으로 마이크로 프로세서 환경에서 구현할 수 있다.

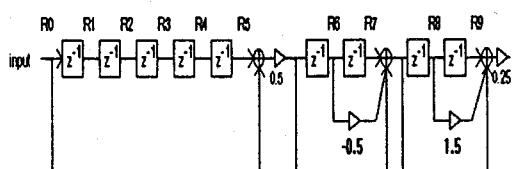


그림 3. Signal conditioning 필터의 구현

4. 시스템구현 및 비교실험

본 논문에서 제시한 디지털방식에 의한 anti-aliasing필터를 출력 15KW AC 유도전동기 두대에 의한 구동방식을 채택한 전기자동차 시스템제어기를 개발하는데 적용하였다.

시스템제어기의 기능은 가속페달, 브레이크, Key 스위치, direction lever 등 운전자 동작지령신호와 모터, battery, inverter, 차체등 전기자동차 각 구성요소로부터 얻어지는 센서신호들을 실시간에서 채집하고 필요한 전처리과정을 통해 모터에 가해줄 토크지령치를 계산하여 인버터제어기로 출력하고, 동작상태의 이상유무를 판정하여 운전자에게 표시하고 필요한 조치를 취하도록하는 역할을 수행하는 장치를 일컫는다.

전체시스템은 인텔의 16bit controller인 80196KR를 기반으로 구성하였다. 시스템제어기는 또한 Philips사의 PCA82C200과 PCA82C250을 이용하여 인버터, on-line시뮬레이터용 PC등과 디자간의 양방향 통신이 가능하도록 CAN(controller area network)을 기반으로하여 구성하였다.

입력신호들의 형태는 모터제어 인버터를 경유하는 신호들은 약 10msec주기로 CAN을 통한 통신에 의해 입력하고, battery장치 및 기타 인버터를 경유하지 않는 센서신호들은 chip에 내장된 A/D converter 와 digital input/output 형태로 출력력을 수행하며, 차륜속도 encoder, handle각 센서등은 interrupt기능을 사용하여 구현하였다.

본 논문에서 제시한 디지털방식에 의한 anti-aliasing필터의 유용성을 확인하기 위하여 입력신호에 Gaussian 형태의 잡음을 통하여 필터의 응답을 알아보는 실험을 행하였다. 디지털방식의 anti-aliasing 필터를 적용한 경우와 이를 생략하고 해당처리주기로 직접 샘플하여 signal conditioning 필터를 수행한 경우로 나누어 신호에 상대적인 잡음의 양을 변화해가며 나타나는 출력을 비교하여보았다. 입력신호로서는 각기 다른 처리주기, 즉, 10sec, 1sec, 10msec에 대하여 0.001 Hz, 0.001Hz, 1.0 Hz의 정현파신호로 설정하였다.

그림 4는 신호처리 주기가 1초인 그룹의 신호 예로서 0.01Hz 정현파를 설정하고 여기에 Gaussian noise를 0dB, -10dB, -20dB 만큼 삽입시킨 신호를 500sec 동안 5주기를 차례로 나타낸 것이다.

그림 5는 그림 4의 잡음섞인 신호를 본 논문에서 설계한 필터와 10:1 decimation을 두단계 적용하여 처리한 후 signal conditioning 필터를 수행한 결과이고, 그림 6은 디지털방식의 anti-aliasing 없이 1.0Hz로 직접 sampling 하여 signal conditioning 필터를 수행시킨 결과를 나타낸 것이다.

이 경우에 보듯이 디지털방식의 anti-aliasing필터를 적용한 경우는 잡음의 양이 상대적으로 많아도(신호의 전력과 같은 0dB 인 경우도) 거의 완벽하게 잡음을 제거한 원신호를 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다. 하지만 디지털방식의 anti-aliasing 없이 해당 처리주기에 따라 직접 sampling 하여 signal conditioning을 수행한 경우는, 원래 신호대잡음비가 20dB 이상, 즉 잡음전력이 신호의 1% 이하인 경우외에는 심한 왜곡현상 때문에 원신호를 복구할 수 없음을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 제시한 선형위상필터는 특정한 주파수에 notch를 위치시키기기에 적합한 형태이기 때문에 고정된 harmonic형태의 잡음이 많은 경우에 harmonic 잡음제거 목적으로도 유용하게 적용할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 전기자동차 각 부위 신호의 처리주기에 의해 구분된 계층적 처리구조에 준하는 디지털방식의 anti-aliasing기법과 새로운 형식의 필터설계기법을 제시하고, 신호의 해당 처리주기로 직접 sampling하여 디지털방식의 anti-aliasing 없이 처리하는 경우와 비교실험을 통하여 이의 유용성을 확인하였다. 신호대잡음비의 비가 약 20dB 이하인 경우는 신호에 왜곡이 심하여, 반드시 디지털방식에 의한 anti-aliasing이 필요하다는 것을

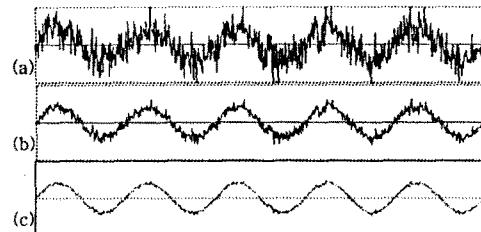


그림 4. 잡음이 섞인 0.001Hz 정현파 입력신호. 잡음의 양이 각각 (a) 0dB (b) -10dB (c) -20dB

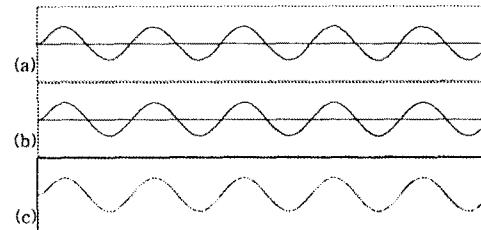


그림 5. 잡음섞인 0.01Hz 정현파 신호 (그림 4)를 디지털방식의 anti-aliasing필터를 적용하여 처리한 출력. 입력의 신호대잡음비가 각각 (a) 0dB (b) 10dB (c) 20dB인 경우.

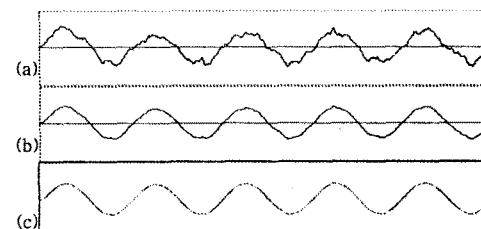


그림 6. 잡음섞인 0.01Hz 정현파 신호 (그림 4)를 1.0Hz로 직접 sampling하여 signal conditioning 필터를 수행시킨 출력. 신호대잡음비가 각각 (a) 0dB (b) 10dB (c) 20dB인 경우.

일 수 있었으며, 상대적인 잡음이 많은 경우에도 제시한 방법에 의해 관심영역 신호에 왜곡이 없이 잡음을 제거할 수 있음을 보였다.

전기자동차와 같이 인버터, 모터등 잡음원들이 밀집되어 있는 환경에서는 제부위에서 채집하는 신호들이 상대적으로 잡음이 많기 때문에, 제어, 진단 및 monitoring목적의 시스템제어기를 구현하는데 신뢰성있고 효율적인 신호처리를 위해서는 디지털방식의 anti-aliasing이 필수적이며 본 연구에서 제시한 형태의 필터및 처리방식이 이러한 목적에 매우 효과적임을 확인 할 수 있었다. 앞으로 실차실험과 elaboration과정을 거쳐 전기자동차 진단시스템 개발 목적으로 제시한 기법들이 적합하다는 것을 확인하고자한다.

6. 참고문헌

- [1] Michael J. Reizenman, "Electric Vehicles," IEEE spectrum, pp. 18-24 & pp. Nov. 1992.
- [2] 경량모터 및 제어 기술 개발, 상공자원부, 1993.12.
- [3] T. G. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.
- [4] A.V. Oppenheim and R. W. Schafer, *Discrete-time Signal Processing*, Prentice-Hall, 1989.
- [5] Fred J. Taylor, *Digital Filter Design Handbook*, Marcel Dekker Inc., 1983.
- [6] T. G. Chang, J. H. Cho, and W. Y. Yang, "Comparisons of EEG waveform distortions caused by the signal conditioning filters," Korean Automatic Control Conference, pp. 509-513, 1992.