

리튬폴리머 배터리 잔존충전용량 추정을 위한 비선형 관측기 설계

A Nonlinear Observer Design for Estimating State-of-Charge of Lithium Polymer Battery

류석환

Seog-Hwan Yoo

대구대학교 전자전기공학부

요 약

본 논문은 리튬 폴리머 배터리 셀의 잔존충전용량을 추정하기 위한 비선형 관측기의 설계방법을 제시한다. 배터리 셀의 동적방정식은 비선형 전압원을 갖는 간단한 RC 전기회로로 모델하고 파라미터는 비선형 최적화기법을 이용하여 구한다. 관측기 이득은 제곱합 분해기법을 사용하여 오차의 동적방정식이 점근적으로 안정하고 추정오차 감소율이 설계자가 지정한 값 이하가 되도록 설계한다. 관측기의 성능을 입증하기 위하여 UDDS 전류 프로파일을 사용한 실험 데이터를 이용하여 모의실험을 수행하였다.

키워드 : 잔존충전용량, 리튬폴리머 배터리, 비선형관측기, 제곱합

Abstract

This paper presents a nonlinear observer design method for SOC(state-of-charge) estimation of Lithium polymer battery cell. The dynamic equation of the battery cell is modeled as a simple RC electrical circuit with a nonlinear voltage source and the parameters are obtained via nonlinear optimization. Using the sum of squares decomposition, the observer gain is designed such that the error dynamics is asymptotically stable and the decay rate is below the prescribed value. In order to illustrate the performance of the observer, a computer simulation is performed using the experimental data with the UDDS(urban dynamometer driving schedule) current profile.

Key Words : State of charge, Lithium polymer battery, Nonlinear observer, Sum of squares

1. 서 론

최근 친환경 자동차인 하이브리드 자동차와 전기 자동차에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 하이브리드 자동차의 구동원으로 엔진과 전기모터, 전기자동차의 구동원으로 전기모터를 채택하고 있다. 전기모터의 에너지원으로 최근 부피가 적고 에너지 밀도가 큰 리튬 폴리머 배터리가 많이 사용되고 있으나 리튬 폴리머 배터리를 안전하게 장기간 사용하기 위해서는 배터리 관리시스템이 필수적이다. 배터리 관리시스템의 주요 역할은 배터리의 잔존충전용량(state-of-charge, SOC)을 예측하고 배터리 팩(pack)을 구성하고 있는 개개의 배터리 셀(cell)의 잔존충전용량을 균형화하여 과충전과 과방전으로 발생하는 배터리손상을 예방

하는 일이다[1]. SOC는 배터리 공칭용량대비 현재 사용가능 용량으로 정의되며 SOC가 1이면 완전충전, 0이면 완전 방전되었음을 의미한다. SOC의 추정방법으로 전류적분법, 개방전압(open circuit voltage, OCV) 측정법, 모델기반의 관측기 등이 있다. 전류적분법은 매순간 충/방전 전류를 적분하여 계산하며 초기값이 비교적 정확하다면 SOC 추정치도 비교적 정확하지만 초기값이 불확실하면 추정치도 불확실하며 시간이 흐름에 따라 적분오차가 누적된다. 배터리를 1~2시간 무부하 상태로 두어 화학적으로 평형되었을 때의 단자전압인 OCV를 측정하여 SOC를 추정할 수 있다. 그러나 이 방법은 충방전이 지속적으로 이루어지는 차량용 배터리 셀의 SOC 추정에는 부적절하다. 최근 차량 운행중 실시간으로 SOC를 추정하기 위하여 모델기반의 추정기법이 많이 제시되고 있다[2]-[7].

모델기반으로 SOC를 추정하기 위해서는 배터리의 전기화학적 동적모델 확립이 필수적이다. 배터리의 동적모델은 아주 복잡하고 비선형이지만 근사적으로 배터리 내부저항과 RC회로로 구성된 등가 전기회로로 많이 표현한다. 본 연구에서도 SOC의 비선형함수로 주어지는 전압원과 저항, 커패시터의 직렬회로로 구성된 등

접수일자: 2012년 3월 6일

심사(수정)일자: 2012년 5월 4일

게재확정일자 : 2012년 5월 7일

† 교신 저자

이 논문은 2009학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임.

가 전기회로를 사용하고자한다. 등가 전기회로부터 얻어진 상태방정식으로부터 추정알고리즘으로는 EKF(Extended Kalman Filter)의 사용[2]-[6], sliding mode 관측기의 사용[7] 등이 보고되고 있다. 칼만필터의 경우 선형시스템에서 잡음의 확률적인 특성이 정확하다면 추정오차의 공분산을 최소화하는 최적필터이지만 EKF의 경우 칼만필터를 비선형시스템에도 선형화를 통해서 사용할 수 있도록 확장하였기 때문에 최적필터는 아니다. 또한 프로세스 잡음과 측정 잡음의 공분산을 알기가 어려우며 실제 필터를 실시간으로 적용하기 위해서는 실시간 계산량이 많은 부담이 있다.

최근 비선형시스템을 효과적으로 다루기 위해 다항식 시스템에 적용 가능한 제곱합(sum of squares, SOS) 분해기법에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다 [8]-[10]. 일반적인 비선형시스템은 Taylor 급수전개에 의해 충분히 근사적으로 다항식시스템으로 표현이 가능하다. SOS 분해기법은 다항식 시스템에서 안정성이나 제어성능을 보장하는 제어기를 설계하는 과정에서 발생하는 여러 가지 부등식의 해를 효과적으로 구할 수 있는 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 하이브리드/전기자동차용 리튬폴리머 배터리 셀의 SOC를 추정하기 위한 비선형 관측기를 설계한다. OCV를 SOC에 대한 다항식으로 표시하고 관측기 이득을 SOC 추정치의 다항식으로 표시하는 방법을 제시한다. 이를 위하여 추정오차의 동적방정식이 안정하고 설계자가 지정한 값 이하의 추정오차 감소율(decay rate)을 보장하도록 최근 많은 연구가 되고 있는 SOS 분해기법을 이용한 관측기 설계방법을 제시한다.

2. 배터리 동적모델

이 절에서는 배터리의 동적모델을 설정한다. 실제 배터리의 동적모델은 아주 복잡한 비선형이지만 그림 1과 같이 간단한 전기회로로 근사화한다.

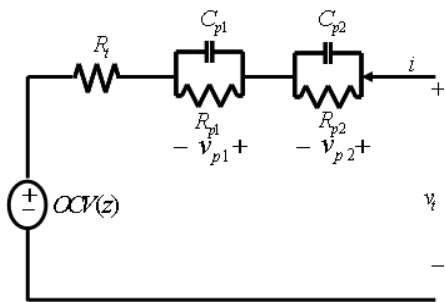


그림 1 등가 전기회로
Fig. 1 Equivalent electric circuit

그림 1에서 R_i 는 배터리의 내부저항, R_{p1}, R_{p2} 는 분극(polarization)에 의한 이온화 손실저항, C_{p1}, C_{p2} 는 이중층(double layer)에 의한 캐패시턴스, v_t 는 배터리 단자전압, i 는 충·방전 전류를 나타내며 $OCV(z)$ 는 배터리 OCV, z 는 SOC를 나타내며 OCV는 SOC의 비선형 함수로 주어진다. SOC $z(t)$ 는 (1)과 같이 정의된다.

$$z(t) = \frac{\text{잔존용량}}{\text{공칭용량}} = z(t_0) + \int_{t_0}^t i(t) dt \quad (1)$$

여기에서 $i(t)$ 의 부호는 충전일 때 양으로 방전일 때 음으로 정의한다.

$OCV(z)$ 는 실험실에서 배터리 셀의 전기화학적 안정상태를 크게 깨지 않도록 아주 낮은 충·방전율(통상 C/30 정도)로 충·방전하여 얻어질 수 있다. 본 연구에서 사용한 공칭용량 5AH 리튬폴리머 배터리 셀의 상온(25°C)에서의 OCV-SOC 곡선을 그림 2의 실선으로 나타낸다.

$OCV(z)$ 를 z 의 다항식으로 근사하기 위해 3차의 다항식으로 곡선접합을 수행하여

$$OCV(z) = 0.9357z^3 - 3.0441z^2 + 3.5549z + 2.6731 \quad (2)$$

의 관계식을 얻는다. (2)의 관계식을 그래프로 나타내면 그림 2의 점선으로 표시된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 OCV-SOC 곡선은 3차 다항식으로 근사가 잘 되고 있음을 알 수 있다.

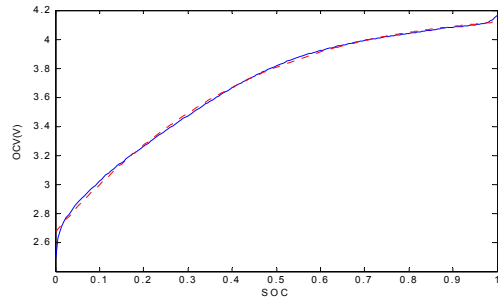


그림 2 개방전압 vs. 잔존충전용량
Fig. 2 OCV vs. SOC

그림 1에서 R_{p1}, R_{p2} 양단의 전압을 각각 v_{p1}, v_{p2} 라 정의하고 배터리 셀의 공칭용량을 C_n 이라 정의하면 SOC의 정의와 간단한 회로법칙으로부터 (3)식과 같은 상태방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bi(t) \\ y(t) &= OCV(z(t)) + R_i i(t) + v_{p1}(t) + v_{p2}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서

$$x(t)^T = [z(t) \ v_{p1}(t) \ v_{p2}(t)], \quad y(t) = v_t(t),$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{p1}C_{p1}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_{p2}C_{p2}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1/C_n \\ 1/C_{p1} \\ 1/C_{p2} \end{bmatrix}$$

(3)식에서 프로세스 방정식은 선형이지만 출력방정식은 상태변수의 비선형 방정식으로 주어진다. 동적방정

식의 파라미터를 결정하기 위해서 상온(25°C)에서 SOC가 1인 배터리를 방전전류 25A로 100초간 방전 한 후 방전을 중지하였다. 이 때 배터리 단자전압 $v_t(t)$ 를 그림 3의 실선으로 나타낸다.

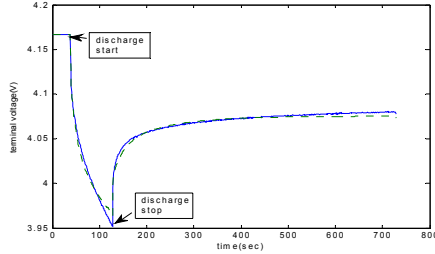


그림 3 펄스 응답
Fig. 3 Pulse Response

k 번째 샘플 시점의 모델 배터리 단자전압을 $v_{tm}(k)$ 라 할 때 샘플링시간을 1초로 정하고 matlab 최적화 toolbox의 fminsearch함수를 사용하여 $\sum_k (v_t(k) - v_{tm}(k))^2$ 를 최소화 하는 모델 파라미터를 구하였으며 그 결과는 표 1과 같다.

표 1. 모델 파라미터
Table 1. Model Parameters

R_t ($m\Omega$)	R_{p1} ($m\Omega$)	R_{p2} ($m\Omega$)	C_{p1} (F)	C_{p2} (F)
1.90	2.33	1.23	42,647	17,525

표 1의 파라미터를 사용했을 때 모델전압은 그림 3의 점선과 같으며 모델전압이 배터리 단자전압과 거의 비슷함을 알 수 있다.

3. 관측기 설계

이 절에서는 SOS 접근법을 사용하여 배터리 동적모델식 (3)을 바탕으로 SOC를 추정하는 비선형 관측기를 설계한다. 이를 위하여 먼저 SOS에 대한 몇 가지 유용한 정의를 기술한다.

정의 1 : $p(x) = \sum_{i=1}^M f_i^2(x)$ 를 만족하는 다항식 $f_i(x), i=1, \dots, M$ 가 존재하면 다항식 $p(x)$ 는 SOS이다. 여기서 $x \in R^n$ 이다.
정의 1로부터 $p(x)$ 가 SOS이면 모든 x 에 대해서 $p(x) \geq 0$ 임을 알 수 있다. 그러나 $p(x) \geq 0$ 일지라도 SOS가 아닐 수도 있다.

정의 2[8] : SOS 다항식 $h_i(x) (i=1, \dots, n)$ 에 대해 $p(x) - \sum_{i=1}^n h_i(x)p_i(x)$ 가 SOS이면 $p_i(x) \geq 0 (i=1, \dots, n)$ 인 모든 x 에서 $p(x) \geq 0$ 을 만족한다.

정의 2는 건설제어이론에서 많이 사용되는 S-procedure의 다항식으로의 확대조건이다. 배터리 모델식 (3)에서 (4)와 같은 관측기를 설계한다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bi(t) + L(\hat{z}(t))(y(t) - OCV(\hat{z}(t)) - R_t i(t) - \hat{v}_{p1}(t) - \hat{v}_{p2}(t)) \quad (4)$$

여기에서 $\hat{x}(t) = [\hat{z}(t) \hat{v}_{p1}(t) \hat{v}_{p2}(t)]^T$ 는 $x(t)$ 의 추정치이고 $L(\hat{z}(t))$ 은 관측기 이득으로 SOC 추정치 $\hat{z}(t)$ 의 다항식으로 표시된다. 추정오차를 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ 라 정의하면 오차는 다음의 (5)식과 같은 동적관계식을 갖는다.

$$\dot{e}(t) = (A - L(\hat{z}(t))C)e(t) - L(\hat{z}(t))(OCV(z(t)) - OCV(\hat{z}(t))) \quad (5)$$

여기에서 $C = [0 \ 1 \ 1]$ 이다.
(6)-(8)로 정의되는 다음의 집합을 생각한다.

$$D_x = \{x \in R^3 | 1 - x^T P_x x \geq 0\} \quad (6)$$

$$D_e = \{e \in R^3 | 1 - e^T P_e e \geq 0\} \quad (7)$$

$$D_\rho = \{e \in R^3 | V(e) = e^T Q e \leq \rho\} \quad (8)$$

여기에서 P_x, P_e 는 대칭 양행렬(positive definite) 행렬이며 $V(e)$ 는 리아푸노프 후보함수이고 Q 는 대칭행렬, ρ 는 양수이다. 비선형 관측기를 설계하기 위한 설계기준은 다음과 같다.

- 1) 관측기 (4)에 대한 오차의 동적방정식 (5)는 영역 D_x 와 D_e 에서 안정하다. 즉 전역적이 아닌 국부적으로 안정한 관측기를 설계한다.
- 2) D_ρ 는 동적시스템 (5)의 invariant set이며 $D_\rho \subseteq D_e$ 를 만족한다. 즉 $e(0)^T Q e(0) \leq \rho$ 이면 모든 $t \geq 0$ 에서 $e(t) \in D_\rho \subseteq D_e$ 이다.
- 3) $|e(t)| < k e^{-\alpha t} |e(0)|$ 를 만족한다. 여기에서 k 는 적절한 양수이다.
- 4) D_ρ 의 크기를 가급적 크게한다.

설계기준 1)과 3)을 만족하기 위해서는 리아푸노프 후보함수가 영역 D_x 와 D_e 에서 $V(e) > 0$ 을 만족하고 $\dot{V}(e) + 2\alpha V(e) < 0$ 가 되면 충분하다. 따라서 식 (9)의 L_1 과 식 (10)의 L_2 가 SOS가 되는 대칭 행렬 Q , 다항식행렬 $M(\hat{z})$, SOS 다항식 $\tau_i(x, \hat{x}) (i=1, \dots, 4)$ 이 존재하면 충분하다.

$$L_1 = (x - \hat{x})^T Q (x - \hat{x}) - \tau_1(x, \hat{x})(1 - (x - \hat{x})^T P_e (x - \hat{x})) - \tau_2(x, \hat{x})(1 - x^T P_x x) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} L_2 &= -\dot{V}(e) - 2\alpha V(e) - \tau_3(x, \hat{x})(1 - (x - \hat{x})^T P_e (x - \hat{x})) \\ &\quad - \tau_4(x, \hat{x})(1 - x^T P_x x) \\ &= -L_{21} - L_{21}^T - \tau_3(x, \hat{x})(1 - (x - \hat{x})^T P_e (x - \hat{x})) \\ &\quad - \tau_4(x, \hat{x})(1 - x^T P_x x) \end{aligned} \quad (10)$$

여기에서

$$L_{21} = (x - \hat{x})^T (QA - M(\hat{z})C_e + \alpha I)(x - \hat{x}) - (x - \hat{x})^T M(\hat{z})(OCV(z) - OCV(\hat{z}))$$

$$M(\hat{z}) = QL(\hat{z})$$

이다.

설계기준 2)를 만족하기 위해 L_3 가 SOS가 되는 $\rho > 0$ 와 $\tau_5(x, \hat{x})$ 이 존재하면 충분하다.

$$L_3 = \tau_5(x, \hat{x})(1 - (x - \hat{x})^T P_e (x - \hat{x}) - (\rho - (x - \hat{x})^T Q (x - \hat{x})) \quad (11)$$

설계기준 4)를 만족하기 위해 Q 의 크기를 $QQ \leq I$ 로 제한하고 ρ 의 크기를 가급적 키운다. 이를 위해 L_4 가 SOS가 되도록 한다.

$$L_4 = v^T \begin{bmatrix} I & Q \\ Q & I \end{bmatrix} v, \quad v \in R^6 \quad (12)$$

즉, 비선형 관측기 설계문제는 주어진 P_x, P_e, α, ρ 에 대해서 $L_1 \sim L_4$ 가 SOS가 되도록 하는 $Q, M(\hat{z})$, SOS 다항식 $\tau_i(x, \hat{x}) (i=1, \dots, 5)$ 를 구하는 문제이며 이것은 최근 개발된 SOS optimization toolbox를 이용하여 matlab 환경에서 쉽게 구할 수 있다.

4. 모의실험

이 절에서는 앞 절에서 기술한 관측기 설계법에 따라 관측기 이득을 다항식의 형태로 구하고 이를 배터리 표준 충방전 프로파일에 적용하여 SOC 추정의 효용성을 보고자한다. 이를 위해 먼저 P_x, P_e, α, ρ 를 다음과 같이 정의한다.

$$P_x = P_e = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/30 & 0 \\ 0 & 0 & 1/30 \end{bmatrix}, \quad \alpha = 0.001, \quad \rho = 1.72$$

실제 배터리의 SOC 범위는 0~1이고 v_{p1}, v_{p2} 의 범위도 R_{p1}, R_{p2} 의 크기가 $5m\Omega$ 이하이고 충방전 최대전류를 100A로 생각하면 $-0.5 \sim 0.5V$ 정도이다. 따라서 D_x 는 배터리 동적모델 (3)에서 상태변수가 도달할 수 있는 모든 범위를 포함한다.

$L_1 \sim L_4$ 를 SOS가 되는 해를 구한 결과

$$Q = \begin{bmatrix} 0.640 & -0.166 & -0.0991 \\ -0.166 & 0.906 & -0.0377 \\ -0.0991 & -0.0377 & 0.935 \end{bmatrix},$$

$$L(\hat{z}) = \begin{bmatrix} 0.0105\hat{z}^2 - 0.0199\hat{z} + 0.0247 \\ 0.00258\hat{z}^2 - 0.00285\hat{z} + 0.00965 \\ 0.00166\hat{z}^2 - 0.00168\hat{z} + 0.00815 \end{bmatrix}$$

를 얻었다. $\hat{z}(0)$ 를 0과 1사이의 임의의 값으로 두고 $\hat{v}_{p1}(0) = \hat{v}_{p2}(0) = 0$ 으로 둘 경우 $e(0) \in D_\rho$ 이 된다.

설계된 비선형 관측기의 성능 검증을 위한 배터리 셀의 충·방전 패턴은 하이브리드 자동차의 UDDS(urban dynamometer driving schedule) 전류 프로파일을 18회 반복 사용하였다. 각각의 UDDS 전류프로파일 사이에는 적절한 전류를 방전하여 전체 전류 프로파일이 SOC 대부분의 영역(0.1~1)을 포함하도록 하였다. 배터리 셀의 충·방전에 사용한 전류 프로파일과 그때의 배터리 단자전압을 그림 4와 그림 5에 나타낸다.

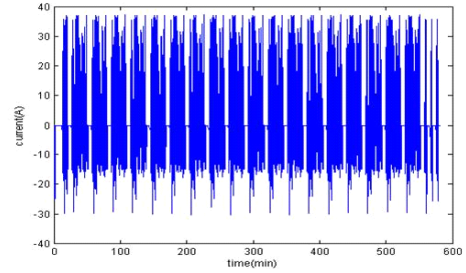


그림 4. UDDS 전류 프로파일
Fig. 4. UDDS current profile

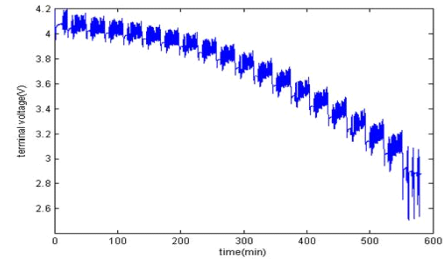


그림 5. 배터리 단자전압
Fig. 5. battery terminal voltage

그림 4에 주어진 UDDS 전류프로파일에 따라 배터리 셀을 충·방전시키고 전류적분법으로 배터리 셀의 SOC를 구하면 그림 6과 같이 주어진다. 그림 6에서 보면 SOC가 0.1~1의 전 영역을 포함하는 것을 알 수 있다.

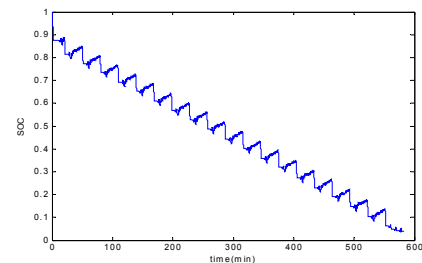


그림 6. 잔존충전용량
Fig. 6. State-of-Charge

본 연구에서 제시한 비선형 관측기를 사용하고 실제 SOC의 초기 값은 1이지만 필터에서 SOC의 초기 값을

0.8로 하여 실험을 한 결과 SOC 추정오차를 그림 7에서 관찰할 수 있는 바와 같이 초기 오차가 급속히 감소하여 SOC의 전 영역에서 0.02의 범위내로 수렴됨을 알 수 있다.

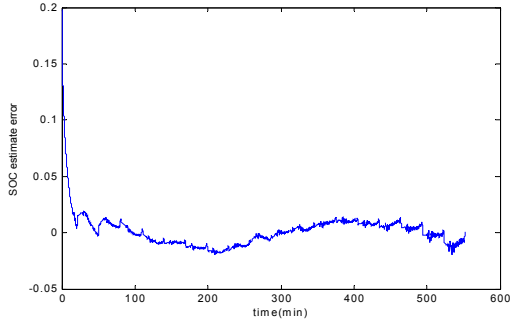


그림 7. 잔존충전용량 추정오차
Fig. 7. SOC estimation error

본 연구에서 제시한 관측기는 EKF[2]-[6]에 비하여 프로세스 잡음, 측정잡음에 대한 통계적 특성을 모르더라도 필터를 설계할 수 있으며 매 샘플링마다의 계산량이 EKF를 사용 시 수행해야하는 time update, measurement update에 비하여 적은 장점이 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 자동차용 리튬폴리머 배터리 관리시스템에서 SOC를 추정하기 위한 비선형 관측기 설계방법을 제안하였다. 배터리의 동적특성을 SOC의 3차 다항식으로 표현되는 OCV를 전원으로 하는 전기회로로 근사화하여 모델링하였다. 관측기는 오차방정식이 사전에 설계자가 정의한 국부적인 영역에서 안정하도록 최근 많은 연구가 되고 있는 SOS 기법을 사용하였다. UDDS 전류프로파일에 의한 충·방전 실험을 통하여 제안한 필터가 0.02의 오차범위 내에서 SOC를 추정할 수 있음을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] B. Pattipati, K. Pattipati, J. Christopherson, A. Namburu, D. Prokhorov and L. Qiao, "Automotive Battery Management Systems," *IEEE Autotestcon*, pp. 581-586, Salt Lake city, UT, Sep. 2008.

[2] G. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 1. Background," *Journal of power sources*, pp. 252-261, Vol. 134, 2004.

[3] G. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 2. Modeling and Identification," *Journal of power sources*, pp. 262-276, Vol. 134, 2004.

[4] G. Plett, "Extended Kalman filtering for battery

management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 3. State and parameter estimation," *Journal of power sources*, pp. 277-292, Vol. 134, 2004.

[5] W. Yan, Y. Tian-ming and L. Bao-jie, "Lead-acid Power Battery Management System Basing on Kalman Filtering," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China, Sep. 2008.

[6] B. Bhangu, P. Bentley, D. Stone and C. Bingham, "Nonlinear Observers for Predicting State-of-Charge and State-of-Health of Lead-Acid Batteries for Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 54, No. 3, pp.783-794, May 2005.

[7] C. Gould, C. Bingham C. Stone and D. Bentley, "New Battery Model and State-of-Health Determination Through Subspace Parameter Estimation and State Observer Techniques," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 58, No.8, pp.3905-3916, Oct. 2009.

[8] A. Papachristodoulou and S. Prajna, "Analysis of Non-polynomial Systems using the Sum of Squares Decomposition", pp. 1-20, *Positive Polynomials in Control*, Springer, 2005.

[9] K. Tanaka, K. Yamauchi, H. Ohtake and H. O. Wang, "Guaranteed Cost Control of Polynomial Fuzzy Systems via a Sum of Squares Approach", *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.5954-5959, New Orleans, LA, Dec. 12-14, 2007.

[10] K. Tanaka, H. Ohtake, M. Wada, H. O. Wang and Y. Chen, "Polynomial Fuzzy Observer Design: A Sum of Squares Approach", *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 7771-7776, Shanghai, P.R.China, Dec. 16-18, 2009.

저 자 소 개



류석환(Seog-Hwan Yoo)

1975년 : 서울대학교 전기공학과 졸업

1989년 : University of Florida 전기공학과 졸업 공학박사

1991년~현재 : 대구대학교 정보통신대학 전자전기공학부 교수

관심분야 : 건설제어, 지능제어, 모델간략화, 제어응용

Phone : 053-850-6621

Fax : 053-850-6619

E-mail : shryu@daegu.ac.kr