

Newton-Raphson법 기반의 적응 망각율을 갖는 RLS 알고리즘에 의한 원격센서시스템의 시변파라메타 추정

김경업*, 지석준*, 광려혜*, 이준탁**

* 동아대학교 전기공학과 박사과정, ** 동아대학교 전기공학과 교수

Time Variant Parameter Estimation using RLS Algorithm with Adaptive Forgetting Factor Based on Newton-Raphson Method

Kyung-Yup Kim, Seok-Joon Ji, Lee-Hui Kwak, John-T Lee
Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University

Abstract - This paper deals with RLS algorithm using Newton-Raphson method based adaptive forgetting factor for a passive telemetry RF sensor system in order to estimate the time variant parameter to be included in RF sensor model.

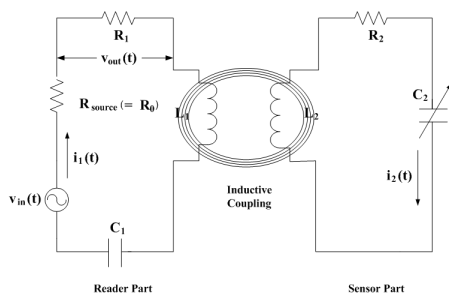
1. 서 론

최근 RFID 기술의 발전과 더불어 유비쿼터스 서비스의 하드웨어적 기반으로 RFID 기반의 센서(이하 RF센서) 기술이 부각되고 있다. 이는 미국, 일본, 한국에서 RFID 기술과 관련된 특허출원의 약 50% 이상이 센서분야에서 이루어지는 것을 통해 알 수 있다[1].

현재 RF 센서는 측정된 데이터를 관독하는 다양한 방식을 사용하며 그중, 공진주파수를 이용하는 방식은 유도결합원리를 이용한 것으로 정해진 입력주파수 범위에 대해 공진주파수와 임피던스 위상의 변화를 측정함으로써 센서 측의 임피던스 변화를 추정해낸다[3]. 또한, 유도결합원리를 이용한 원격 RF 센서시스템은 수학적 모델로 유도가 용이하므로 센서 측의 임피던스 변화를 측정하기 위해 다양한 기법들이 적용가능하며, 모델기반의 추정기법인 RLS알고리즘을 접목한 연구에도 적용되었다.[2] 일반적으로 RLS 알고리즘은 시변파라메타 추정시 망각율을 사용하게 되는데, 이는 단지 관측된 시간순서에 대한 가중치일 뿐 모델이 가지고 있는 다른 정보를 사용하지 않는다는 측면에서 설계자의 전문지식 및 시행착오를 요구한다. 이러한 망각율 결정의 수고를 덜기 위해 본 연구에서는 미분기반의 최적화 기법인 Newton-Raphson법을 적용한 적응 망각율을 제안하고자 한다. 제안된 적응 망각율을 이용한 RLS 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 페이저 타입으로 유도된 원격 RF 센서 시스템 모델을 사용하여, Newton-Raphson법 기반의 적응 망각율을 가지는 RLS 알고리즘의 유효성을 입증하고자 한다.

2. 원격 RF센서 시스템 모델

본 연구에서는 보다 간단하고 저 전력 소모특성을 가지는 센서 시스템을 구현하기 위해 그림 1과 같은 유도결합원리를 이용한 모델을 제안하여 시스템을 구성하였다.



〈그림 1〉 유도결합원리에 따른 원격 RF 센서 시스템

제안된 모델은 크게 데이터를 처리하는 Reader부와 대상체에 이식되어 데이터를 수집하는 Sensor부로 나눌 수 있다. 그림 1에서 제시된 모델에서는 Sensor부의 정전용량 C2에 따라 Reader부의 전류 i1 및 vout이 가변되는 특징이 있는데, 이를 이용한 새로운 추정모델이 제안될 수 있다. 추정모델은 미지의 두 파라메타 C2와 M을 추정하기 위해 모델기반의 추정알고리즘 RLS 알고리즘을 적용하고자 식 (1)과 같이 설계행렬(Design Matrix) A 및 회귀계수 X 그리고 계측된 출력변수 Z로 재배열될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

혹은,

$$Z = AX$$

(1)

이다. 여기서, 모델의 각 파라메타에 대한 정의는 표 1과 같다.

〈표 1〉 설계행렬 A, 회귀계수 X 및 출력변수 Z

z_1	$Re\left(\left(\frac{V_{rms}R_1}{V_{out}} - R_0 - R_1 - j(\omega L_1 - 1/\omega C_1)\right)^{-1}\right)$		
z_2	$Im\left(\left(\frac{V_{rms}R_1}{V_{out}} - R_0 - R_1 - j(\omega L_1 - 1/\omega C_1)\right)^{-1}\right)$		
x_1	$1/M^2$	x_2	$1/C_2M^2$
a_{11}	R_2/ω^2	a_{12}	0
a_{21}	L_2/ω	a_{22}	$-1/\omega^3$

3. Newton-Raphson법 기반의 적응 망각율을 이용한 RLS 알고리즘

본 장에서는 2장에서 유도된 원격 RF센서시스템의 수학적 모델의 미지수 X를 추정하는 기법에 대해 기술하고자 한다. 본 연구에서 제안된 시스템은 입출력 데이터 쌍을 다량 확보할 수 있고, 출력데이터를 실시간으로 수집할 수 있을 뿐만 아니라, 미지수 X가 시변특성을 가지므로 이를 위해선 Recursive Least Square (RLS) 알고리즘에 의한 추정방식이 적당할 것이다.

3.1 시변회귀계수 추정을 위한 RLS 알고리즘

그림 1로부터 유도된 식 (1)에서 미지의 파라메타 C2와 M을 포함하고 있는 회귀계수 X는 추정대상으로, 이를 위해 본 연구에서는 모델기반의 추정기법인 RLS 알고리즘을 도입했다.

원격 RF센서 시스템의 모델을 나타내는 식(1)을 이용하여 RLS 알고리즘은 식(2) ~ 식(5)으로 정리될 수 있다.

$$\xi^T(k) = Z(k) - A(k)\hat{X}(k-1) \quad (2)$$

$$\hat{X}(k) = \hat{X}(k-1) + K(k)\xi^T(k) \quad (3)$$

$$K(k) = P(k)A^T(k) \quad (4)$$

$$P(k) = \lambda^{-1}(P(k-1) - P(k-1)A^T(k)(\lambda I + A(k)P(k-1)A^T(k))^{-1}A(k)P(k)) \quad (5)$$

여기서, $\xi^T(k)$ 는 그림 5에서와 같이 추정오차를 의미하며, λ 는 망각율을 나타낸다.

3.2 Newton-Raphson법 기반의 적응 망각율

본 연구에서는 망각율 선정방법에 있어 선형적 방법을 대신하기 위해 목적함수의 최적점을 찾아가는 Newton-Raphson법을 도입하였다. 망각율 λ 를 적응적으로 조절하기 위한 구조를 가지기 위해 식 (6)과 같은 목적함수 $J(k)$ 를 취해보자.

$$J(k) = \frac{1}{2} [\xi^T(k)\xi(k)] \quad (6)$$

λ 의 변화에 따른 $J(k)$ 의 변화율 $\frac{\partial J(k)}{\partial \lambda} \equiv J'(k)$ 와 $\frac{\partial^2 J(k)}{\partial \lambda^2} \equiv J''(k)$ 가

존재한다고 가정하면, λ 의 변화에 대한 $J(k)$ 의 최적점은 식 (7)과 같이 나타나며, 이러한 형태로 목적함수의 최적점을 찾아가는 방법을 *Newton* 혹은 *Newton-Raphson* 법이라고 한다.[4]

$$\hat{\lambda}(k+1) = \hat{\lambda}(k) + \frac{J'(k)}{J''(k)} \quad (7)$$

식 (7)은 최적의 $\hat{\lambda}$ 를 찾기 위한 업데이트함수로서 매 시점 k 마다 목적함수의 변화율 $J'(k)$ 를 요구하게 되며, 식 (2)에서 정의된 $\xi^T(k)$ 을 이용하여 식(8)과 같이 정리할 수 있다.

$$J'(k) = \frac{1}{2} [-\mathbf{A}^T(k)\boldsymbol{\psi}(k-1)\boldsymbol{\xi}(k) - \boldsymbol{\psi}^T(k-1)\mathbf{A}(k)\boldsymbol{\xi}^T(k)] \quad (8)$$

여기서, $\boldsymbol{\psi}(k-1) \equiv \frac{\partial \hat{\mathbf{X}}(k-1)}{\partial \lambda}$ 이며, 이는 주어진 식(3)를 이용하여 식 (9)와 같이 재정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}(k) &= \boldsymbol{\psi}(k-1) + \mathbf{S}(k)\mathbf{A}^T(k)\mathbf{Z}(k) - \mathbf{S}(k)\mathbf{A}^T(k)\mathbf{A}(k)\mathbf{X}(k-1) \\ &\quad - \mathbf{P}(k)\mathbf{A}^T(k)\mathbf{A}(k)\boldsymbol{\psi}(k-1) \\ &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{A}(k)]\boldsymbol{\psi}(k-1) + \mathbf{S}(k)\mathbf{A}^T(k)\boldsymbol{\xi}^T(k) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $\mathbf{S}(k) \equiv \frac{\partial \mathbf{P}(k)}{\partial \lambda}$ 이며, 식(14)을 이용하여 정리하면 식 (10)과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(k) &= \hat{\lambda}^{-1}(k) [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{A}(k)]\mathbf{S}(k) [\mathbf{I} - \mathbf{A}(k)\mathbf{K}^T(k)] \\ &\quad + \hat{\lambda}^{-1}(k)\mathbf{K}(k)\mathbf{K}^T(k) - \hat{\lambda}^{-1}(k)\mathbf{P}(k) \end{aligned} \quad (10)$$

따라서, 식(8)~식(10)을 이용하면 망각율 λ 에 대한 목적함수의 변화율을 구할 수 있으며, 목적함수의 최적값을 만족하는 최적의 $\hat{\lambda}$ 를 얻을 수 있다.

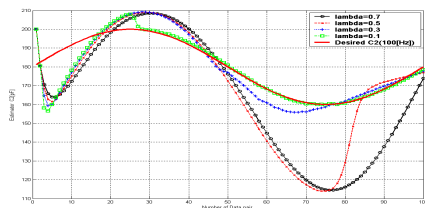
4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 장에서는 3장에서 제안된 적응 망각율 기법을 이용한 *RLS* 알고리즘의 성능을 입증하고자 한다. 본 모의실험을 위해 사용한 파라미터 값을 표 2에 나타내었다.

표 2. 원격 RF 센서 시스템의 파라미터

Parameter	Value	Parameter	Value
L_1	100[mH]	Initial value of C_2	200[pF]
C_1	1[pF]	Initial value of M	3[μH]
L_2	555.6[mH]	R_0	5[Ω]
C_2	180[pF] ~200[pF]	ω_{span}	150[kHz] ~160[kHz]
R_1	10[Ω]	R_2	200[Ω]
Number of Data Pairs (N)	100		

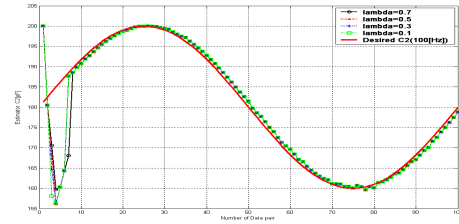
이러한 조건하에서 추정대상인 회귀계수 \mathbf{X} 에 포함된 정전용량값이 100 [Hz]의 주파수를 가지는 정현파의 형태로 시변한다고 가정하였을 때, 주어진 데이터쌍을 이용하여 추정을 수행하도록 하였다.



〈그림 2〉 고정망각율을 사용한 경우 수렴패턴 및 망각율 변화 추이

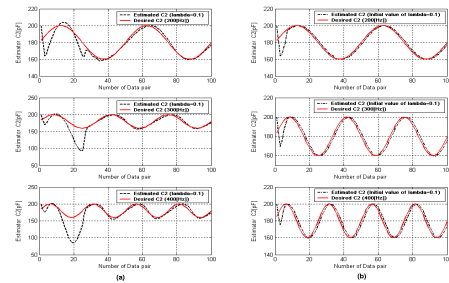
그림2는 총 4개의 망각율 $\lambda = 0.7, 0.5, 0.3, 0.1$ 에 대해 추정성능

을 비교한 것으로, 망각율 값이 목표값에 대해 다소 수렴치 못하는 추정 결과를 보였으나 동일 조건하에서 본 연구에서 제안한 적응 망각율을 적용한 경우, 그림3과 같이 망각율의 초기값을 0.7 부터 0.1 사이에서 임의로 선정하더라도 원하는 목표값에 만족스럽게 수렴되는 성능을 보였다.



〈그림 3〉 적응 망각율을 사용한 경우 수렴패턴 및 망각율 변화 추이

또한 이는 목표값의 주파수를 달리 적용시켜 추정성능을 비교한 그림 4에서도 볼 수 있듯이 고정망각율을 사용하는 경우에 비해 *Newton-Raphson*법을 적용한 적응 망각율을 사용한 경우가 좀 더 빠른 시간내에 안정적으로 목표값에 수렴하고 있음을 알 수 있다.



〈그림 4〉(a) 고정망각율을 적용한 경우, 주파수(200[Hz],300[Hz],400[Hz])에 따른 추정성능 (b) 적응망각율을 적용한 경우, 주파수(200[Hz],300[Hz],400[Hz])에 따른 추정성능

5. 결론

본 연구에서는 망각율의 초기값을 임의로 선정하더라도 적정한 성능으로 추정을 완료하였으며, 이는 고정망각율을 사용할 경우 최적의 망각율 값을 찾아내기 위해 시행착오 과정의 비용을 줄일 수 있는 잇점이 있었다. 뿐만 아니라, 적응 망각율을 이용한 *RLS* 알고리즘을 원격 *RF*센서시스템에 적용하여 만족할 만한 결과를 얻음으로써 실제 시스템에 대한 실효성을 입증할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 조재신, "RFID 지식재산권 동향과 대응 방안", 특허청, 2005
- [2] T.J.Hapster, B.Stark, K.Najafi, "A Passive Wireless Integrated Humidity Sensor", The 14th IEEE International Conference on MEMS, pp.553-557,2001
- [3] www.microstrain.com
- [4] J.R.Jang, C.Sun, E.Mizuan, Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Prentice-Hall International, Inc. pp.95-117, 1997

[본 논문은 한국전력공사에서 지원한 전력변환 시스템 신기술 연구센터 (과제번호2006-0273)의 사업으로 수행되었습니다.]