

RLS 추정 알고리즘을 이용한 정지상태 유도전동기 파라미터 추정 방법

한동엽, 김성민
한양대학교

Standstill Parameter Estimation of Induction Motors Using RLS Algorithm

Dongyeob Han, Sungmin Kim
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문은 유도전동기의 파라미터를 정지 상태에서 추정하기 위한 오프라인 방식의 알고리즘을 제안한다. 유도전동기의 효율 운전 또는 고성능 운전을 하기 위해 간접 벡터 제어 또는 모델 기반의 관측기를 사용하게 되는데 제정수의 오차는 제어 성능 저하와 직결된다. 파라미터를 추정하기 위해 유도전동기에 단상 정현파 전압을 인가하고, 재귀적 최소제곱법(Recursive Least Squares)을 통해 등가 저항을 계산한다. 계산된 등가 저항 데이터를 기반으로 Luvenberg-Marquadt algorithm을 기법을 사용해 유도기 제정수를 추정한다. 본 논문에서는 5.5kW 유도 전동기에 제안한 기법을 통해 제정수를 추정하고 토크 선형성을 통해 제정수 추정 결과의 유효성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 전세계적으로 에너지 절감 및 온실가스 감축을 위한 많은 노력을 하고 있다. 우리나라의 전체 전력 소비량 중 유도 전동기가 차지하는 비중은 54% 이상 차지한다.^[1] 유도전동기의 효율적인 운전을 위해서는 인버터를 사용하게 되는데 유도 전동기를 효과적으로 제어하기 위해서는 유도전동기의 제정수를 필요로 된다. 하지만 대부분의 제작사에서는 보통 모터의 정격조건에 해당하는 제정수만을 제공하기 때문에 정격 외의 제정수는 모르는 경우가 많다. 인버터를 이용하는 유도 전동기의 제어 기법 중 흔히 사용되는 간접 벡터 제어는 동기 주파수와 회전 주파수의 차이인 슬립을 제어함으로써 토크를 제어하는 방법이다. 정확한 토크를 합성하기 위한 슬립은 유도 전동기의 제정수를 통해 계산되는데, 제정수의 오차는 슬립의 오차와 직결된다.^[2] 따라서 정확한 제정수를 추정하는 것이 간접 벡터 제어 성능 개선에 가장 중요하다. 유도 전동기의 제정수를 추정하는 방법은 무부하 조건과 구속조건을 이용한 고전적인 방법이 알려져 있다.^[3] 이런 방안이 비교적 정확하지만, 수 MW의 대용량 유도 전동기의 경우 제정수 추정을 위한 회전이 불가능한 경우가 많다.

본 논문에는 정지상태의 Offline 방식으로 제정수를 추정하는 방법을 제안한다. 유도 전동기의 제정수를 추정하기 위하여 유도전동기에 단상 정현파 전압을 인가하고, 전류를 측정한다. 측정된 전류를 RLS(Recursive Least Squares) 방법을 통해 등가 저항과 등가 리액턴스를 계산한다. 계산된 등가 저항으로

부터 회전자 저항 및 자화 인덕턴스를 추정하기 위해 전류와 주파수에 따른 데이터 집합을 만든 후 Luvenberg-Marquadt algorithm 기반의 Data fitting 알고리즘을 사용하였다. 누설 인덕턴스는 고주파 전류를 주입하여 추정할 수 있다. 본 논문에서는 파라미터 추정 알고리즘을 적용하고 MG 세트를 활용하여 토크를 확인하여 알고리즘을 검증하였다.

2. 유도전동기 정지상태 파라미터 추정

2.1 유도전동기 임피던스 모델 분석

유도전동기 모델은 T-모델, Inverse Γ-모델 그리고 Γ-모델이 있으며 T 모델은 고정자 저항, 회전자 저항, 자화 인덕턴스, 고정자 누설 인덕턴스, 회전자 누설 인덕턴스로 5개의 파라미터로 구성되어 있다. 인버스 Γ 모델은 T 모델에서 회전자 누설인덕턴스가 없으며 Γ 모델은 T 모델에서 고정자 누설인덕턴스가 없는 모델이다.^[4] 본 논문에서는 유도전동기의 제정수를 추정하기 위하여 Inverse Γ-모델을 사용하였다. T 모델과 Inverse Γ-모델의 관계는 (1)로 나타내어진다.

$$k = L_m/L_r, L_\sigma = L_{ls} + kL_{lr}, R_R = k^2R_r, L_M = k\gamma L_m \quad (1)$$

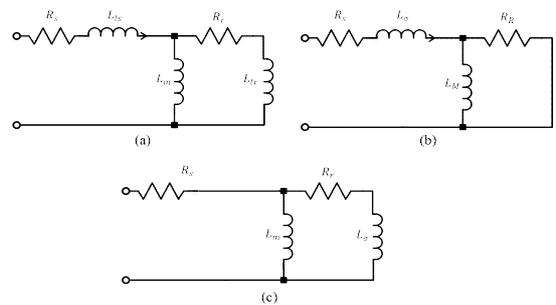


그림 1 유도전동기 모델; (a) :T-모델 (b) : Inverse Γ-모델 (c) : Γ-모델

Fig. 1 Induction motor model; a) :T-model (b) : Inverse Γ-model (c) : Γ-model

유도전동기의 전압 방정식과 임피던스는 (2), (3)으로 나타낼 수 있다.

$$v = R_{eq}i + L_{eq} \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$Z_{eq} = R_s + \frac{X_M^2 R_R}{R_R^2 + X_M^2} + j(X_\sigma + \frac{X_M R_R}{R_R^2 + X_M^2}) = R_{eq} + jX_{eq} \quad (3)$$

유도 전동기의 파라미터를 추정하기 위하여 (4)로 표현되는 정현파 전압을 인가하면 전류는 (5)와 같이 표현된다.

$$v_{test} = V_h \cos(\omega t + \theta) \quad (4)$$

$$i(t) = \frac{V_{test}}{Z_{eq}} = \frac{V_h \cos(\omega t + \theta)}{R_{eq} + jX_{eq}}$$

$$= \frac{V_h \{R_{eq} \cos(\omega t + \theta) + X_{eq} \sin(\omega t + \theta)\}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (5)$$

인가하는 전압의 위상을 0으로 하면($\theta=0$), (5)를 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$i(t) = V_h (A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) \quad (6)$$

$$\left(A = \frac{R_{eq}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}, B = \frac{X_{eq}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \right)$$

식 (6)을 등가 저항과 등가 리액턴스로 나타내면 (7), (8)로 나타낼 수 있다. 즉 전압을 인가해서 전류를 통해 등가 저항과 등가 리액턴스값을 구할 수 있다.

$$R_{eq} = A \left(\frac{V_h}{I_{mag}} \right)^2 \quad (7)$$

$$X_{eq} = B \left(\frac{V_h}{I_{mag}} \right)^2 \quad (8)$$

2.2 재귀적 최소제곱법을 통한 등가 임피던스 계산

본 논문에서는 유도전동기의 등가 저항과 등가 리액턴스 값을 추정하기 위해 재귀적 최소제곱법을 이용하였다. 식 (9), (10)은 일반적인 재귀적 최소자승법을 수식으로 나타낸 것이다. θ 는 parameter matrix이며 c 는 Regressor matrix를 의미한다.^[5]

$$P_k = P_{k-1} - \frac{1}{1 + c_k^T P_{k-1} c_k} P_k c_k c_k^T P_{k-1} \quad (9)$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + P_k c_k [y_k - c^T \theta_{k-1}] \quad (10)$$

추정하려는 모델은 (6)에 나타난 것처럼 Cosine과 Sine 함수의 합으로 나타낼 수 있으므로 Regressor matrix는 (11)로 구성할 수 있다.

$$c = \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{bmatrix} \quad (11)$$

그림 2는 재귀적 최소제곱법을 사용해서 임피던스의 추출 결과를 시뮬레이션으로 확인한 결과이다. 시뮬레이션 모델에서 0.4 Hz의 정현파 전압을 인가하였고 A상 전류에 대하여 재귀적 최소제곱 알고리즘을 통해 등가 저항과 등가 리액턴스 값을

추정한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과 5 cycle 이후 추정된 등가 저항값과 등가 리액턴스 값이 안정되는 것을 확인할 수 있다.

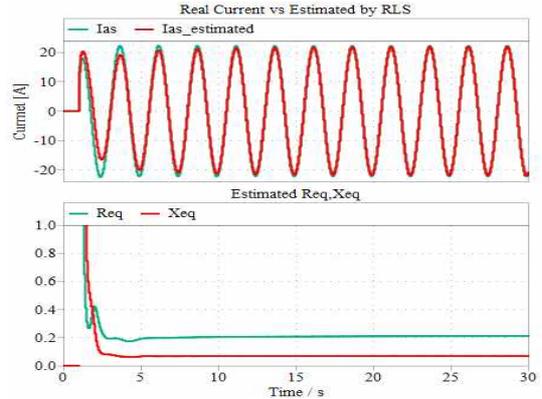


그림 2 RLS 알고리즘을 통한 등가 저항 및 등가 리액턴스 추정

Fig. 2 Estimated equivalent resistance and equivalent reactance with the RLS algorithm

2.3 Data Fitting을 이용한 회전자 저항, 자화 인덕턴스 추정

등가 저항 및 등가 리액턴스 값을 통해 회전자 저항 및 자화 인덕턴스 값을 추정하기 위해 (8)로 알려져 있는 Luvenberg-Marquadt algorithm을 바탕으로 데이터 피팅을 수행하였다.^[6]

$$x_{k+1} = x_k - (J(x_k)^T J(x_k) + \mu_k I)^{-1} J(x_k)^T r(x_k) \quad (8)$$

추정 모델은 (3)의 등가 저항식을 사용하였다. 데이터 피팅을 통해 등가 저항 또는 등가 리액턴스 값의 데이터 집합이 필요하다. 데이터 집합을 구하기 위하여 주파수에 따른 임피던스의 데이터를 획득하였다. 인가된 주파수는 유도전동기의 슬립 주파수 부근의 주파수를 선정하여 회전자 저항이 표피효과로 인해 크게 추정되는 것을 방지하였다. 또한 자화 전류에 의해 회전자 저항값이 변하기 때문에 여러 전류에 대한 데이터들을 획득하였다.

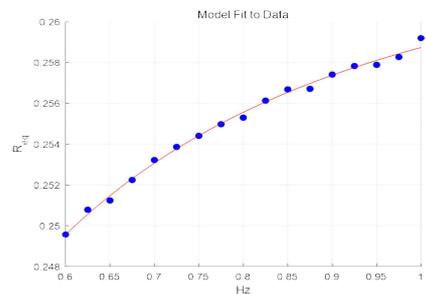


그림 3 5A 전류조건에서의 등가저항 데이터

Fig. 3 Equivalent resistance data set at 5A current

표 1 추정된 고정자 저항, 회전자 저항, 자화 인덕턴스
Table 1 Estimated system parameters

Rs	0.186 [Ω]	LM	0.04238 [H]
RR	0.0792 [Ω]	L _o	5.3 [μ H]

2.4 고주파 전류 주입을 이용한 누설 인덕턴스 추정

누설 인덕턴스를 추정하기 위해 높은 주파수의 정현파 전압을 인가하였다. 고주파가 인가 되어있을 때 자화 인덕턴스의 임피던스가 누설임피던스의 임피던스보다 매우 크다고 볼 수 있으므로 (10)와 같이 누설 인덕턴스의 리액턴스와 등가 리액턴스 값으로 근사할 수 있다.^[7]

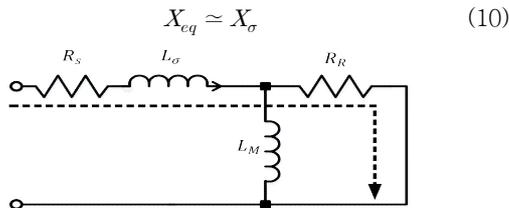


그림 4 고주파에서의 전류 흐름도
Fig. 4 The flow of current in high frequency

3. 실험 결과

표 1은 5A 기준에서의 추정된 파라미터이다. 같은 방법으로 10A, 15A에서의 제정수를 추정할 수 있다. 그림5은 제안한 추정된 파라미터의 타당성을 시험하기 위하여 구성한 시험세트이다. 5.5kW 용량의 유도전동기와 5kW 용량의 부하기로 이루어진 MG 세트와 인버터를 구성하였다. 유도전동기의 토크 제어를 수행하였고 PMSM의 토크를 측정하여 유도전동기의 토크를 측정하였다. 실험에 사용된 유도전동기의 정보는 표 2와 같다.



그림 5 유도전동기 파라미터 검증을 위한 실험세트
Fig. 5 Experiment setup

표 2 유도전동기 제정수
Table 2 Induction motor parameters

정격 전류	5.5 [kW]	정격 주파수	60 [Hz]
정격 전압	220/380[V]	정격 슬립	0.0139
정격 전류	21.3 [A]	정격 토크	29.6 Nm

자화전류를 5A, 10A, 15A 기준에서 추정된 파라미터값을 이용하여 토크 정합성 및 선형성을 확인하였다. 1N~13N 까지 점진적으로 토크를 인가하여 유도전동기의 토크를 확인하였다. 그림 6은 유도전동기의 토크 정합성을 도시하였다. 자화전류가 10A, 15A 조건에서 추정된 파라미터는 5% 이내의 토크 정합성을 가지는 반면 5A 기준의 추정된 파라미터는 10%의 토크 오차를 가지는 것을 확인하였다. 높은 자화전류 조건에서 추정

파라미터의 오차가 상대적으로 큰 이유는 전동기 포화 현상으로 인하여 추정을 통해 계산된 등가 임피던스에 전동기 포화 현상에 의한 파라미터의 비선형성이 반영되기 때문으로 판단된다.

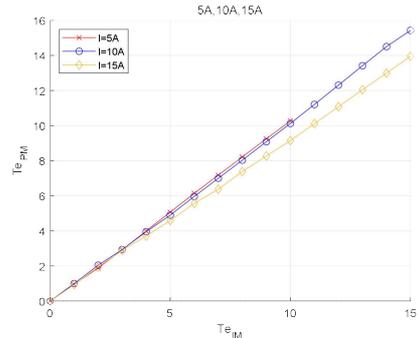


그림 6 토크 선형성 및 Linearity 확인
Fig. 6 Torque correctness and Linearity.

4. 결론

본 논문은 정지상태에서 유도전동기의 파라미터를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 단상 전압을 유도기에 인가하고 슬립주파수 대역의 낮은 주파수를 인가하여 등가 저항에 관한 데이터집합을 만들어 회전자 저항 및 자화 인덕턴스를 추정하였으며 고주파 전류를 주입하여 누설 인덕턴스를 추정하였다. 추정된 파라미터로 정토크가 발생하는지 실험으로 확인했다. 5A, 10A 조건에서 추정된 파라미터 조건에서의 토크의 오차는 5%, 15A 조건에서는 10%의 오차를 보였지만 고정된 자화 전류 조건에서 토크 선형성은 확보되었음을 확인할 수 있었다.

추후 연구 과제로서는 단상 전압을 통한 파라미터를 추정하기에 자속 변동에 의한 등가 임피던스 오차가 파라미터 오차에 반영되는 문제를 하는 것이 필요하다.

참고 문헌

- [1] 산자부, “저소비·고효율 산업구조 전환을 위한 중소·중견기업 에너지 효율혁신 방안,” 2022. 12.
- [2] P. C. Sen, Principles of electric machines and power electronics. John Wiley& Sons, 2007.
- [3] S. A. Odhano, P. Pescetto, H. A. A. Awan, M. Hinkkanen, G. Pellegrino, and R. Bojoi, “Parameter identification and self-commissioning in AC motor drives: A technology status review,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 4, pp. 3603-3614, Apr. 2019.
- [4] G. R. Slemon, "Modelling of induction machines for electric drives," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 25, no. 6, pp. 1126-1131, Nov./Dec. 1989.
- [5] I. Mareels, J. W. Polderman. Adaptive Systems: An Introduction. Birkhäuser: Boston, MA. 1996.
- [6] Edwin K. P. Chong, Stanislaw H. Żak. An Introduction to Optimization. Wiley-Interscience: New York, NY. 2008.
- [7] 김규식, 김춘환, "유도 전동기의 매개변수 측정 및 동정," 전력전자학회논문지, Vol. 6, No. 3, pp. 282-290, 6 2001.