

Thermocouple을 이용한 선형 유도전동기의 1차측 저항 보상 Primary Resistance Compensation of Linear Induction Motor Using Thermocouple

김 경 민*
Kim, Kyung Min

박 승 찬**
Park, Seung Chan

ABSTRACT

This paper describes online stator-resistance estimation of a linear induction motor(LIM) with cage-type secondary using direct thrust control(DTC), where the resistance value is derived from stator-winding temperature estimation using thermocouple. In this paper, corrected stator resistance has an error in actuality measurement resistance. So compensation coefficient κ which is decided through comparison and verifying several times relation of calculated resistance and measured motor line-line resistance. The stator-winding temperature information can also be used for monitoring, protection, and fault-tolerant control of the machine. Also, this paper reports the LIM's responses of the flux measured by the proposed stator resistance compensation algorithm.

1. 서론

견인 전동기에 사용되어지는 회전형 유도전동기나 자기 부상열차에 사용되어지는 선형 유도전동기 등과 같은 시스템은 한번 구동으로 오랜 시간 운전하게 된다. 이와 같이 오랜 시간 운전하게 되면 시스템의 제어 알고리즘에서 사용되어지는 전동기의 파라미터 변동으로 인해 원하는 제어 성능을 낼 수 없게 된다. 전동기의 전압 모델 해석을 기반으로 하는 직접 추력 제어 알고리즘과 고정자 자속 기준 벡터 제어 알고리즘에서 사용되어지는 피드백 신호 추정의 정확성은 오직 고정자 저항에만 의존을 하기 때문에 고정자 저항 변동으로 인해 부정확해진다[1]. 이는 고정자 자속 벡터 연산에서 자속의 크기뿐만 아니라 위상 판별에서도 오차를 유발하게 된다. 이 오차는 고정자 저항의 전압 강하 성분이 전동기의 역기전력 성분과 비교되어질 정도의 크기를 가질 경우인 영 근방의 저속 영역에서 심각해진다. 그러기에 요구하는 제어 성능을 위해 정확한 전동기의 파라미터 보정을 통한 제어 피드백이 필요하다.

본 논문에서는 각각 두 개의 선간 전압과 상전류를 검출하여 직접 추력 제어 알고리즘으로 구동되어지는 선형 유도전동기에서 고정자 저항 보상을 위해 1차측 고정자 권선부에 온도 센서인 서모커플 하나를 삽입하고 구성된 서모커플 증폭회로부터 검출된 출력 전압 신호를 DSP의 ADC로 받아들이고, 이를 구리의 온도-저항 관계식으로 고정자 저항 변동을 보정하고자 한다. 그러나 보정되어지는 고정자 저항은 서모커플로부터 측정된 전동기의 1차측 고정자 권선 사이 한 부분의 온도로 연산되어진 값이기에 실제 저항하고는 오차를 가진다. 그래서 온도 변동시 수차례 연산되어진 저항과 그 때 측정된 전동기 선간 저항의 실험적 데이터를 바탕으로 결정되어진 보정 계수 K_t 를 온도-저항 관계식에 고려해 주었다. 더불어 보상된 고정자 저항을 이용하여 직접 추력 제어 알고리즘으로 구동되어질 때 선형 유도전동기에 자속 응답 특성을 살펴보았다.

* 동양대학교 대학원, 박사과정, 정회원

** 책임저자, 동양대학교 철도운전제어학과 교수, 정회원

2. 직접 추력 제어 알고리즘

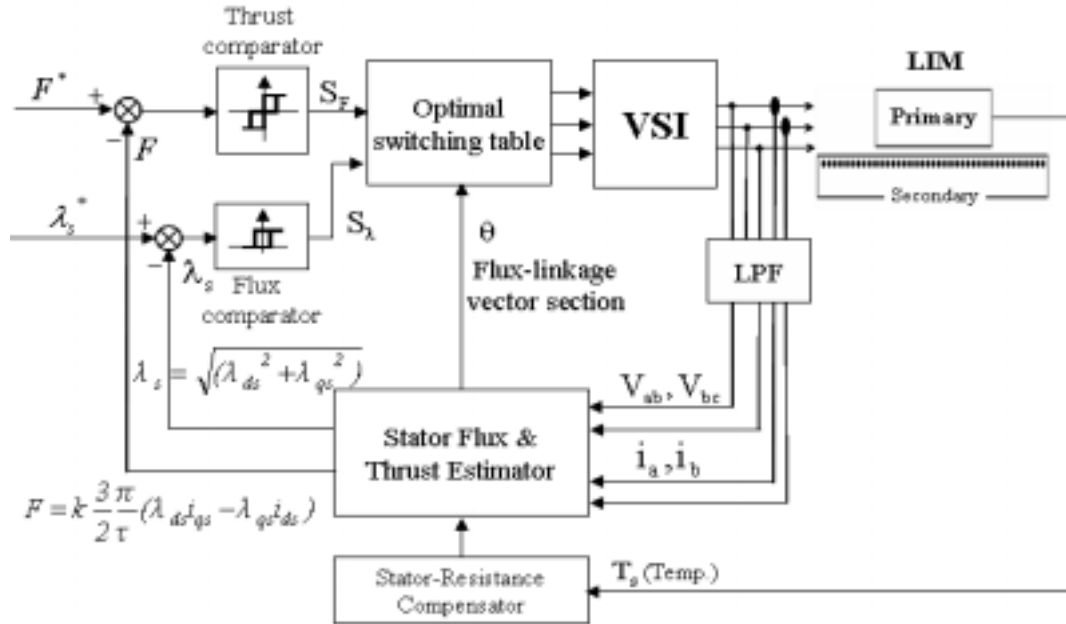


그림 1. 고정자 저항 보상을 지닌 선형 유도전동기의 직접 추력 제어 블록도

그림 1은 직접 추력 제어 알고리즘을 적용한 농형 2차축을 갖는 LIM의 전체 제어시스템 블록도로서 고정자 저항이 제어 알고리즘에 끼치는 영향에 대하여 알아보고자 한다.

고정자 쇄교자속은 d q 축 전압 V_{ds} , V_{qs} 및 전류 i_{ds} , i_{qs} 로부터 유도되어지고, 추력은 구해진 d q 축 전류 및 자속을 이용하여 각각 다음과 같이 유도된다.

$$\lambda_{ds} = \int (V_{ds} - R_s i_{ds}) dt \quad (1)$$

$$\lambda_{qs} = \int (V_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (2)$$

$$F = k \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (3)$$

여기서, R_s 는 고정자 저항, k 는 end effect를 고려한 추력 보정계수(Thrust Correction Coefficient)로써 본 논문에서는 $k = 0.9$ 인 상수로 결정하였고, τ 는 극 간격을 나타낸다.

DTC 알고리즘은 LIM에 인가되어지는 두 개의 선간 전압과 상전류를 각각 전압 센서 및 전류 센서를 통해 검출하여 고정자 자속과 순시 추력값을 연산하고 각각의 지령치와 비교되어 오차가 설정한 히스테리시스 밴드폭 내에 존재하면서, 자속 벡터의 위치에 따라 최적의 전압 벡터 테이블에 의해 인버터 전압 벡터를 제어한다[2][3]. 위 수식으로부터 고정자 저항은 직접 추력 제어 알고리즘으로 구동되어지는 선형 유도전동기의 고정자 쇄교 자속 및 추력 연산의 정확성에 영향을 끼치게 된다. 특히 고정자 저항의 전압 강하 성분이 전동기의 역기전력 성분과 비교되어질 정도의 크기를 가질 경우인 영 근방의 저속 영역에서 심각하여지기에 원하는 성능을 위해 고정자 저항의 보상이 요구되어진다.

3. 고정자 저항 보상 알고리즘

그림 2는 서모커플을 이용한 선형 유도전동기의 1차측 고정자 저항을 보상하기 위하여 구성된 서모커플 증폭 회로도를 나타내고 있다. 본 논문에서 사용된 T-type의 서모커플은 동-콘스탄탄(Cu 55%, Ni 45%)으로 구성되어 두 금속 접합부에서 제백 효과(Seebeck Effect)를 이용하여 그 기전력으로 온도를 측정하는 센서이다. 제백 효과는 이종 금속 접합부에 온도차가 있을 때, 금속 고유의 페르미 준위 및 자유 전자 밀도에 따라 결정되어 기전력이 발생하는 현상이다. 서모커플의 접합부는 측정점(Hot Junction)과 기준점(Cold Junction)으로 구분되는데 서모커플의 열기전력은 측정점 온도와 기준점 온도의 차이에 해당하는 크기의 전압을 발생하게 된다. 따라서 정확한 측정점의 온도를 알려면 기준점의 온도를 일정하게 즉 0°C로 교정하여 측정할 필요가 있으나 이는 현실적으로 어려우므로 기준점의 온도를 보상하여 주는 방법으로 대신하고 있다. 회로도에서 기준점의 온도를 보상하고자 기준점의 온도를 검출하는 센서로 백금-측온저항체(RTD)를 이용하여 기준점의 접점에서 발생되어지는 열기전력은 같은 영역에 측온저항체를 위치시킴으로써 전압 변동으로 출력 전압을 보상하고 있다. 또한 계측용 정밀 증폭용 IC인 INA118를 사용하여 서모커플 출력전압을 증폭하게 된다[4].

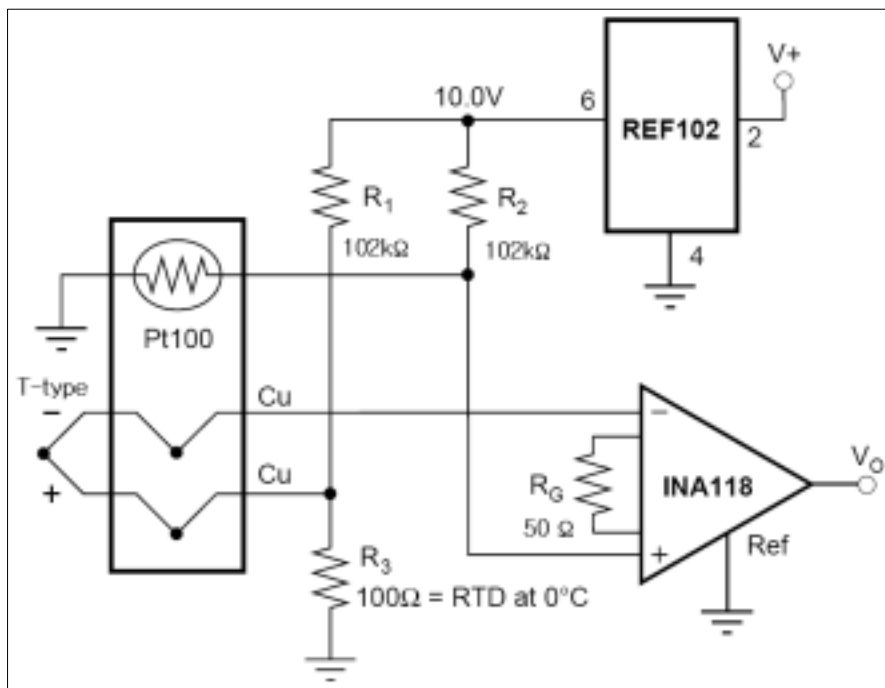


그림 2. 냉접점 보상을 가진 서모커플 증폭회로

서모커플의 출력은 제백 계수의 동작 온도 범위에 따라 변화되므로 높은 비선형을 가진다. 이런 이유로, 본 논문에서는 미국표준기술연구소(NIST)에서 주어지는 다항식 계수를 사용하여 전압대 온도 곡선을 근사화하게 된다. 위 회로와 같이 구성되어진 서모커플 증폭회로의 출력 신호는 DSP의 ADC를 통해 받아들여 표 1.에서 주어진 전압대 온도 계수를 사용하여 식(4)와 같이 다항식을 사용하여 온도를 연산하게 되고, 또한 연산되어진 온도는 구리의 온도와 저항 관계식(5)를 이용하여 변동된 고정자 저항을 구하게 된다.

$$T = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + a_4 v^4 \quad (4)$$

$$R_t = R_0 + K_t \cdot \alpha R_0 (T - 25) \quad (5)$$

여기서, T 는 연산된 온도, v 는 서모커플 증폭회로의 출력전압, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 는 다항식 계수이고, R_t 는 보상되어진 저항, R_0 는 25도에서 저항, α 는 구리의 저항온도계수(0.00393), K_t 는 유도되어진 보정계수(0.9)이다. 본 실험에서 유도되어진 보정계수는 온도 변동시 연산되어진 고정자 저항과 그 때 측정된 데이터를 바탕으로 보정계수 K_t 를 유도하여 도입하였다.

표 1. 온도 변환용 다항식 계수

	다항 계수			
T-type Thermocouple	a_0	0.0	a_3	4.637791E-11
	a_1	2.592800E-2	a_4	-2.165394E-15
	a_2	-7.602961E-7	a_5	6.048144E-20
오차	±0.03℃			

4. 실험 장치 구성 및 결과

본 실험에서는 그림 3과 같이 DSP인 TMS320F2812를 사용하여 농형 2차측을 갖는 LIM의 직접 추력 제어 알고리즘을 구현하기 위해 600[V], 30[A]용인 IPM을 사용하여 인버터를 제작하였고, 전동기에 인가되어지는 두 개의 선간 전압과 상전류 신호를 검출하고자 전압 센서 및 전류 센서를 사용하였다. 그리고 고정자 저항 보상을 위해 T-type 서모커플 하나를 LIM의 1차측 고정자 권선부에 삽입하고, 서모커플 출력 신호를 검출하고자 증폭기 회로를 제작하였다.

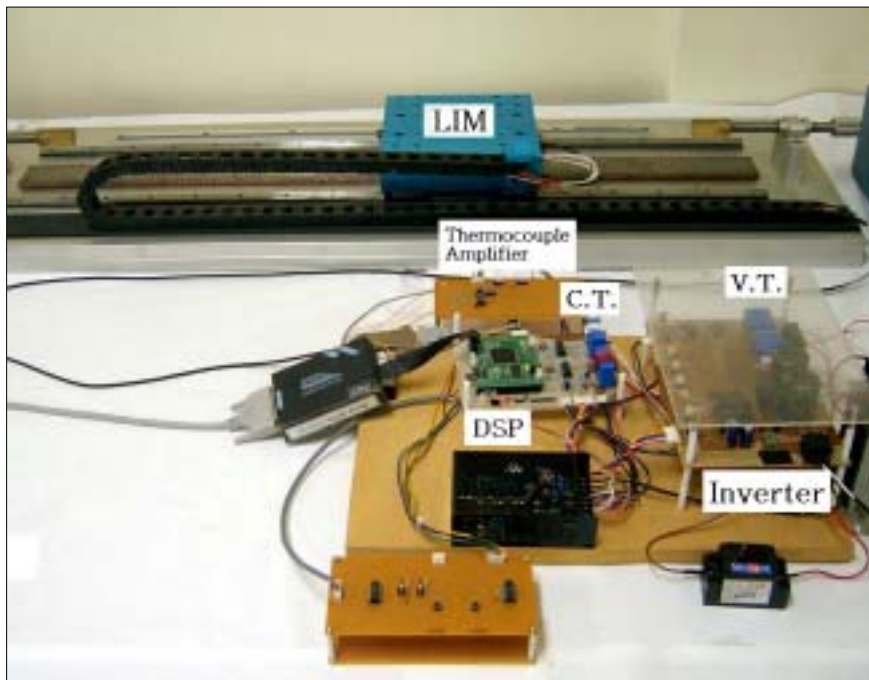


그림 3. 전체 시스템 실험 장치 사진

본 실험의 시스템에 하나의 서모커플이 선형 유도전동기의 1차측 고정자 권선부에 삽입되어 있는 상태라서 한 부분의 온도 검출로 평균 저항을 추정하기에는 많은 오차를 포함하게 된다. 따라서 온도와 저항 관계에서 연산된 저항과 측정된 고정자 저항을 그림 4와 같이 비교-검증하여 보정계수를 결정하였다. 그림 4와 같이 보정계수를 도입함으로써 측정되어진 저항과 비슷한 특징을 나타내고 있다. 그림 5는 선형 유도전동기를 직접 추력 제어 알고리즘으로 구동하였을 때 고정자 저항의 보상 유무에 따른 d축 자속 파형을 보여주고 있다. 그림 5(a)는 고정자 저항이 11%정도 증가하였을 때이고, 그림 5(b)는 18%정도 증가하였을 때의 자속 파형으로써 온도 변화에 따른 고정자 저항 변동으로 인해 자속 오차가 점점 커짐을 볼 수 있다.

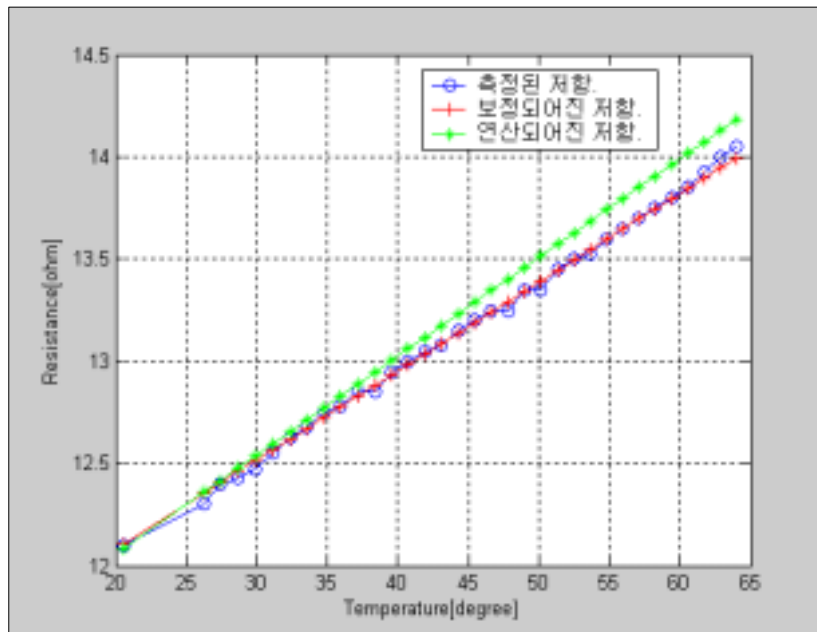
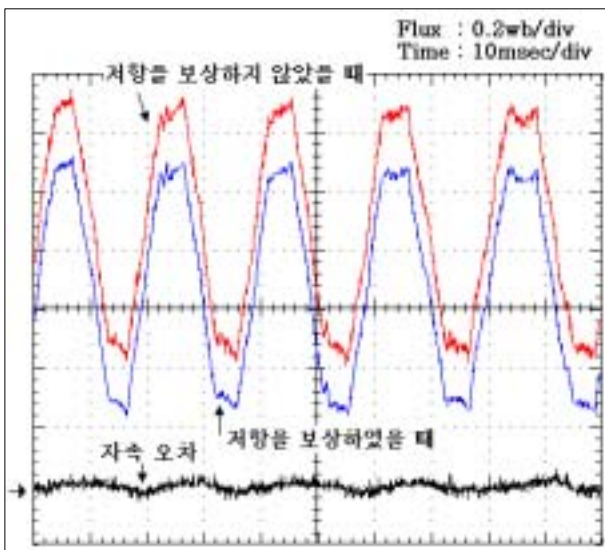
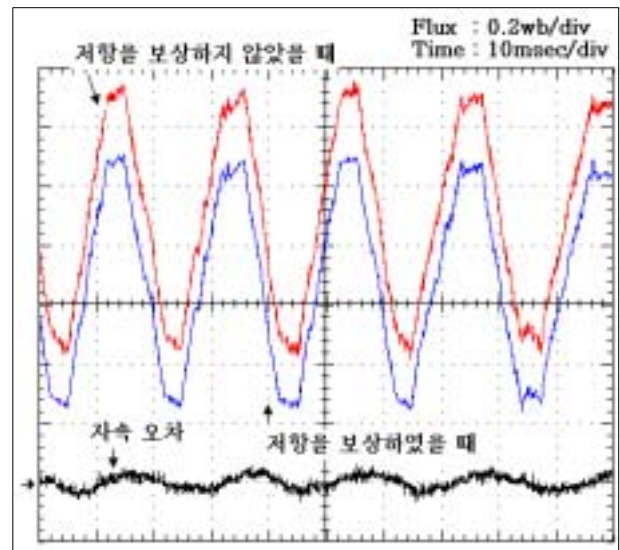


그림 4. 고정자 권선 구리의 온도와 저항 관계



(a) 50°C일 때



(b) 65°C일 때

그림 5. 고정자 저항 보상 유무에 따른 자속 파형

5. 결론

본 논문에서는 T-type 서모커플을 선형 유도전동기의 1차측 고정자 권선부에 삽입하여 이로부터 측정된 온도변화로 고정자 권선부의 저항 변동을 보상하였다. 이를 위해 서모커플의 미소 전위를 검출하고자 증폭회로를 구성하여 제작하였다. 그러나 측정된 온도는 한 부분에 해당되는 온도이기에 이를 보정하고자 측정된 저항과 비교하여 보정 계수를 도입하였다. 또한 고정자 저항 보상을 적용한 직접 추력 제어 알고리즘으로 구동되어지는 선형 유도전동기의 자속 응답에서 요구하는 제어 성능을 위해 정확한 전동기의 파라미터 보상이 필요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Bimal K. Bose, Nitin R. Patel, "Quasi-Fuzzy Estimation of Stator Resistance of Induction Motor", IEEE Trans on Power Electronics, vol.13, No.3, pp.401-409, 1998
- [2] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford Press, 1988
- [3] 김경민, 박승찬, "직접 추력 제어에 의한 농형 선형유도전동기의 속도 제어", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.920-922, 2004. 7.
- [4] Texas Instruments, "Precision, Low Power Instrumentation Amplifier", ina118