

# Tapped winding을 이용한 선형유도전동기의 자속검출에 관한 연구

임 달 호\*, 권 병 일\*, 김 창 업\*\*, 임 형 빈\*  
\* 한양대학교 전기공학과      \*\* 효성중공업(주) 기술연구소

## A Study on Flux Sensing of Linear Induction Motor Using Tapped Winding

Dal-Ho Im\*, Byung-Il Kwon\*, Chang-Eob Kim\*\*, Hyung-Bin Im\*  
\* Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ.      \*\* R & D Institute, Hyosung Industries Co., Ltd.

### Abstract

A method of flux sensing using tapped winding is described for measuring air gap flux in linear induction motor. This method which utilizes coils of motor itself is neither affected by temperature nor resistive voltage drop due to stator current in the motor coils. So it can measure air gap flux in reliable manner. The tapped winding method has been implemented in experiment and the result shows that this method can be sufficiently used in direct vector control of linear induction motor.

### 1. 서론

최근 선형유도전동기(LIM: Linear Induction Motor)를 이용한 시스템을 실용화하려는 연구가 활발해지고 있다. LIM을 서보와 같은 응용에 사용하려는 경우에는 자속범위에서의 정확한 제어가 요구된다. 이같은 요구는 고성능의 추력제어 기법인 벡터제어를 적용하여 해결할 수 있다[1].

벡터제어의 기본 개념은 기기에서의 AC전류와 쇄고자속을 회전하는 벡터량으로 보는 것이다. 2차속 자속벡터에 대하여 고정자 전류벡터를 적절히 위치시키면 상호작용에 의해 원하는 전자 기력과 공극자속을 얻게 된다. 벡터제어는 2차속 자속을 기준으로 하여 고정자전류벡터의 위치를 결정하기 때문에, 이 제어방식에 가장 핵심적인 요구사항은 움직이는 자속벡터의 순시적인 위치를 알아내는 일이다.

본 논문에서는 선형유도전동기의 직접벡터제어에 필요한 2차 자속 즉, 공극자속을 검출하는 방법으로 tapped winding을 이용하는 방법을 고찰한다[2]. 필요한 2차속 자속을 간접적으로 구해내는 간접벡터제어와는 달리 직접벡터제어에서는 이를 직접 측정하여 제어에 사용한다. 이로인해 2차속 저항과 인덕턴스의 변동에 영향받지 않는 자속검출을 행할 수 있다.

2차속 자속검출을 위한 방법으로는 우선 search coil을 이용한 방법을 들 수 있다. 가는 선으로 감은 coil을 슬롯에 삽입하고 그 유기전압을 적분하여 자속을 구하게 되는데, 설치에 많은 수고가 따르고 내구성이 떨어지는 단점이 있다. 다른 방법으로서 hall sensor를 이용하는 방법이 있는데, 이 방법은 소자의 출력에 온도에 민감하다는 단점과 몇몇의 극부적인 위치의 자속만을 알 수 있다는 단점이 있다.

위의 단점들을 해결할 수 있는 방법이 tapped winding을 이용하는 방법이다. 이 방법은 모터의 코일 자체를 자속검출센서로서 사용하는 방법으로 추가적인 자속센서를 공극에 설치할 필요가 없다는 장점이 있다.

본 연구실에서는 tapped winding에 의한 자속검출의 연구를 행하여 왔고 그 결과를 발표한 바 있다[3]. 그러나 실험기가 2극기인 제약으로 인하여 실험에서는 바람직한 결과를 얻기 어려웠다. 본 논문에서는 4극 LIM을 실험기로 연구를 하여 얻은 결과에 대하여 고찰하였으며 tapped winding을 이용한 자속검출 방법이 LIM의 직접벡터제어를 위한 자속검출에 사용될 수 있음을 밝힌다.

### 2. Tapped winding을 이용한 자속검출의 원리

고정자의 권선 자체에 연결된 탭(tap)에서 측정되는 각 상의 두 코일전압을 이용하면 2차속 자속을 검출할 수 있다[2][3]. 이 방법은 고정자 권선을 제작할 때 코일에 추가적인 선을 연결함으로써 쉽게 구현될 수 있다. 이 방법의 설명을 위해 그림 1에 개략적인 LIM을 나타낸다. 그림에는 한 상의 권선 일부만이 나타나 있다. 고정자 권선은 실제로는 그림과 같은 코일들이 직렬 또는 병렬로 연결되어 있는 구조이다. 코일전압은 한 phase belt를 이루는 코일들 중에서 최외각에 위치한 두 코일에서 측정된다.

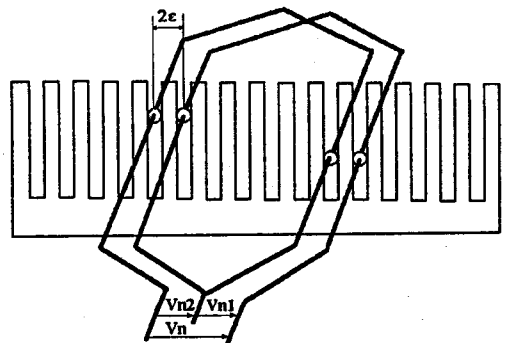


그림 1 LIM의 두 코일

그림 1에서와 같이 공간적으로  $2\epsilon$ 의 전기각 만큼 떨어진 두 코일  $n1$ 과  $n2$ 에서 각각 측정된 두 전압은  $2\epsilon$ 만큼의 위상차를 갖게 된다. 고정자 3상 검출전압에 대한 두 코일전압의 폐이저도 를 그림 2에 나타낸다.

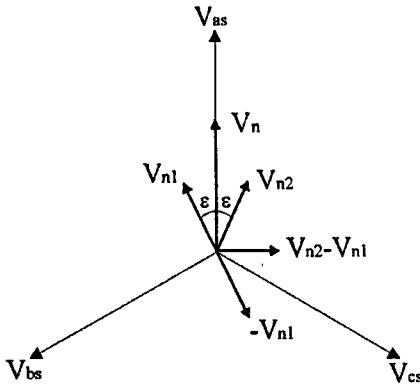


그림 2 코일n1과 코일n2에서 측정되는 전압의 배치도

두 코일전압의 차  $V_{n2}-V_{n1}$ 를 구할 경우 a상과는  $90^\circ$  위상차를 가지는 전압이 측정된다. 이 성분은 전기기기의 d-q모델의 d축 성분이 된다[4]. 이렇게 구한 두 코일전압의 차를 적분하여 search coil과 유사하게 자속을 측정하게 된다.

이와같이 두 코일전압의 차를 이용하면 저항에 의한 전압강하분이 상쇄되어 코일저항이 온도에 따라 변화하는 경우나 저항에 의한 전압강하가 상대적으로 큰 경우에도 신뢰성있는 자속검출을 할 수 있다.

두 코일에 검출되는 순시치 전압을 각각  $v_{n1}$ ,  $v_{n2}$ 라 하면 공극자속의 d<sup>s</sup>축 성분  $\lambda_{md}^s$ 는 다음식으로 표현된다.

$$\lambda_{md}^s = k \int_a [v_{n2} - v_{n1}] dt \quad (1)$$

그리고 공극자속의 q<sup>s</sup>축 성분은 다음과 같다.

$$\lambda_{mq}^s = \frac{k}{\sqrt{3}} \left( \int_b [v_{n2} - v_{n1}] dt - \int_c [v_{n2} - v_{n1}] dt \right) \quad (2)$$

여기서 첨자 s는 고정자 기준 좌표계에서 정의되는 양임을 나타내고 a는 a상과 관련됨을, b와 c는 각각 b상과 c상에 관련됨을 나타낸다. 참고문헌[2]에는 위 식의 유도와 관련된 자세한 내용이 기술되어 있다. 최종적으로 공극자속  $\lambda_m^s$ 은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\lambda_m^s = \sqrt{(\lambda_{md}^s)^2 + (\lambda_{mq}^s)^2} \quad (3)$$

### 3. LIM의 자속검출회로 구현

그림 3에 자속검출회로의 block diagram을 나타낸다. q<sup>s</sup>축 자속성분은 식(2)을 구현하여 얻을 수 있다. d<sup>s</sup>축 자속성분은 a상으로 부터 구하여진 자속을 바로 이용하지 않고 식(4)처럼 나머지 두 상과 연산하여 구한다. Gauss의 법칙에 의해 공극을 통과하는 자속의 합은 항상 0이 됨을 이용한 것으로 이 같은 연산을 이용하면 상간의 불평형으로 인한 고조파의 영향을 감소시킬 수 있다.

$$\lambda_{md}^s = \frac{k}{3} \left( \left( \int_b [v_{n2} - v_{n1}] dt - \int_a [v_{n2} - v_{n1}] dt \right) + \left( \int_c [v_{n2} - v_{n1}] dt - \int_a [v_{n2} - v_{n1}] dt \right) \right) \quad (4)$$

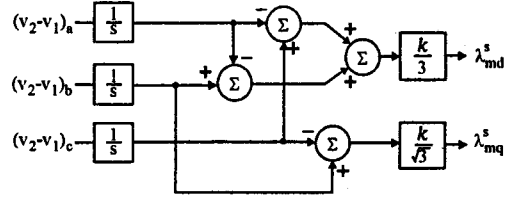


그림 3 자속검출회로의 block diagram

### 4. Tap의 위치 선정 및 자속검출 실험

LIM은 그 구조상 양 단부가 존재하기 때문에 회전형 유도기와는 달리 공극의 자속 분포가 극마다 동일하지 않다. 일반적인 형태의 LIM은 양 단부에서 단층권이 존재하게 되므로 이러한 현상은 더욱 심하게 나타난다. 따라서 LIM의 경우에는 회전형 유도기와 달리 특정한 부분에서 자속검출을 해야한다. LIM에서 양 단부 극의 자속밀도는 중앙부 극의 그것보다 작고, 이로 인해 단부 극에서 발생하는 추력은 중앙부 극에서 발생하는 추력의 수분의 일이 된다. 따라서 중앙부에서 검출한 자속을 기준으로 하여 벡터제어를 행하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

자속검출 실험에 사용된 4극 LIM의 사양을 표 1에 나타낸다.

표 1 4극 LIM의 사양

극간격	69.5 [mm]	1차축의 길이	310 [mm]
전체 슬롯수	29	1차축의 폭	85 [mm]
1상의 직렬 turn수	720	1차축의 높이	55 [mm]
코일당 turn수	90	2차축 Al의 두께	4 [mm]
매극대상당 슬롯수	2	Air gap	4 [mm]

1차축 3번째 극의 중앙에 위치한 a상의 권선에 탭을 설치하고 나머지 두 상에 대하여는 앞뒤로  $120^\circ$ 의 전기각만큼 떨어진 위치의 권선에 탭을 설치하였다. 그림 4에 자속검출을 위한 4극 LIM의 탭 위치를 나타낸다. 그림에서는 7번 슬롯부터 25번 슬롯 사이의 부분만이 그려져 있다.

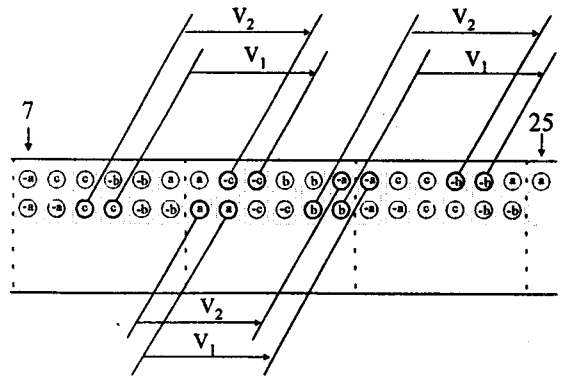


그림 4 4극 LIM의 탭 위치

LIM의 인가전원으로는 PWM 인버터를 사용하였고 전원 주파수를 30Hz로 하여 구속실험을 할 때 각 파형을 측정하였다.

그림 5는 각 상의 탭에서 구한 코일전압차  $v_2-v_1$ 를 나타낸 것이고, 그림 6는 각 상의 코일전압차를 적분한 파형을 나타낸 것이다.

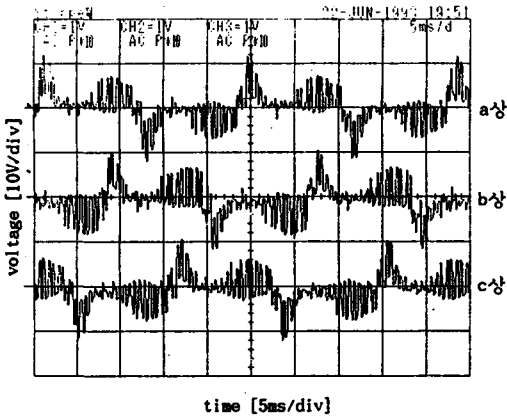


그림 5 각 상의 코일전압차

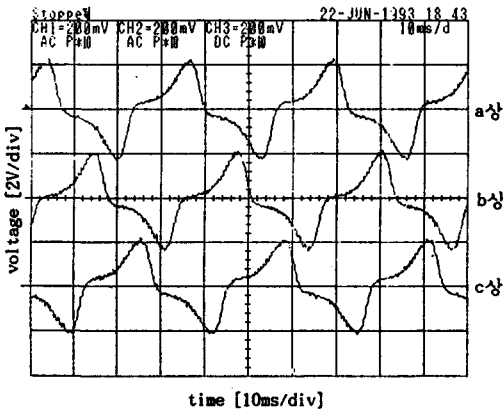


그림 6 각 상 코일전압차의 적분파형

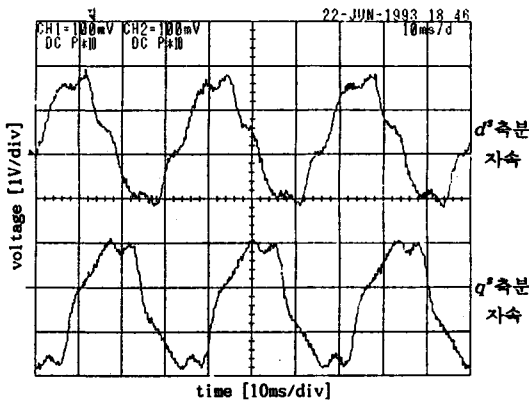


그림 7 공극자속의  $d^*$ 축분과  $q^*$ 축분

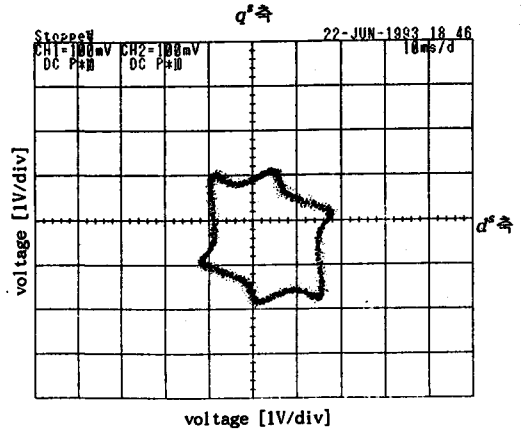


그림 8 공극자속의 위상도

$d^*$ 축분 공극자속과  $q^*$ 축분 공극자속에 비례하는 전압파형을 그림 7에 나타내며 그에 따른 공극자속의 위상도를 그림 8에 나타낸다. 인버터 전원을 5Hz 정도의 낮은 주파수로 인가하였을 때 도 마찬가지로 공극자속을 검출할 수 있었다. 파형의 왜곡은 공간 고조파의 영향 때문으로 이는 정현적이지만 기저력 분포와 PWM 인버터의 고조파분에 의한 것으로 생각된다. 고조파 제거를 위해 적절한 필터링을 이용한다면 개선된 파형의 공극자속을 검출할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 LIM의 직전력제어를 위한 지속검출방법으로 tapped winding을 이용한 방법을 적용하여 그 가능성을 고찰하였다. 4극 LIM에 대한 실험을 통하여 공극자속을 검출할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 4극 LIM의 경우 tapped winding을 이용하면 직전력제어에서 필요한 공극자속을 검출할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] D. W. Novotny, R. D. Lorentz, (eds), "Introduction to Field Orientation and High Performance AC Drives", Tutorial Course Rec. 1985 & 1986 IEEE IAS Annual Meeting.
- [2] T. A. Lipo and K. C. Chang, "A New Approach to Flux and Torque Sensing in Induction Machines", in Conf. Rec. IEEE IAS Annual Meeting, Oct 1985, pp.765-779.
- [3] 임달호, 권병일, 김창업, 윤호, 임형빈, "Stator Tapped Coil을 이용한 편축식 선형유도전동기의 직전력제어", 대한전기학회 하계학술대회논문집(B), 1992, pp.692-694.
- [4] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall, 1986.