

누설자속을 고려한 영구자석 선형 동기 전동기의 전원용량 산출법

김용재*, 조경필*
조선대학교*

Calculating Method for Power Supply Capacity of Permanent Magnet Linear synchronous motor considering Leakage Flux

Yong-Jae Kim*, Kyoung-Pil Cho*
Chosun University*

Abstract - 영구자석 선형 동기 전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)는 회전 모터와 달리 사용 용도에 맞추어 설계할 필요가 있으며, 회전 모터와 다르게 고정자와 가동자의 길이가 유한장이기 때문에 회전 모터에 비하여 누설 자속이 크다. 따라서, 반송장치용 영구자석 선형 동기 전동기의 전원용량을 정확히 산출하기 위해서는 영구자석 선형 동기 전동기에서 발생하는 누설자속량을 산출할 필요가 있다. 본 논문은 영구자석 선형 동기 전동기의 전원용량의 산출법에 대하여 나타낸다.

1. 서 론

최근, 고보자력을 가지는 영가의 영구자석의 개발이 진행되어 영구자석형 리니어 동기 모터(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor; PM-LSM)가 반송 장치의 동력원으로서 실용화되고 있다 [1,2]. 반송 시스템용 PM-LSM은 회전 모터와 달리 사용 용도에 맞추어 설계할 필요가 있다. 또한, PM-LSM은 회전 모터와 다르게 고정자와 가동자가 유한장이기 때문에 회전 모터에 비하여 누설 자속이 크다. 따라서, PM-LSM의 설계시 누설 자속을 고려한 설계가 필요하다 [3]. 특히, 반송장치용 PM-LSM의 전원용량을 산출하기 위해서는 PM-LSM의 슬롯 및 코일단 등에서 발생하는 누설자속량을 파악하여 동기리액턴스와 권선 저항을 산출할 필요가 있다.

PM-LSM의 전기자 권선은 일반적으로 집중권 및 분포권이 이용되고 있다. 이 2개의 코일 구조중, 본 연구에서는 반송장치용 PM-LSM의 대추력화와 전기자 코일의 제작 용이성등을 고려하여 PM-LSM의 전기자에 집중권 채택하여 전원용량을 설계하였다.

본 논문에서는 누설자속을 고려한 반송장치용 집중권 PM-LSM의 전원용량 산출법에 대하여 나타내고자 한다.

2. 반송장치용 집중권 PM-LSM의 전원용량 산출법

전원용량 V_{rms} 은 속도기전력 e_0 , 동기리액턴스 x_s 의 총합, 권선저항 R_a 로부터 산출한다. 우선, 동기리액턴스 x_s 을 식(1) 및 (2)을 이용하여 구한다.

$$x_s = 2\pi f L_a \tag{1}$$

$$L_a = n^2 \sum P_n \tag{2}$$

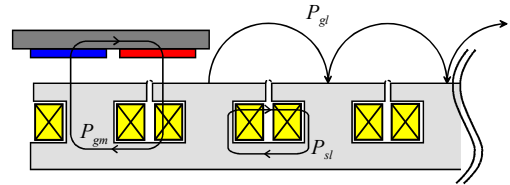
단, L_a : 인덕턴스, n : 권수, P_n : 각 누설 퍼미언스

식(1)의 인덕턴스 산출에는 각 누설 퍼미언스를 계산할 필요가 있다. 우선, 전기자측에 의존하는 누설 퍼미언스로서 슬롯부에서 발생하는 누설 퍼미언스 P_{sl} , 코일 단에서 발생하는 누설 퍼미언스 P_{cl} , 치 단에서 발생하는 누설 퍼미언스 P_{tl} , air-gap 외의 누설 퍼미언스 P_{gl} 가 있다. 또한, 전기자와 가동자가 대항하는 위치관계에 의해서 누설되는 P_{gm} 이 존재한다. 각 누설 퍼미언스의 계산방법을 이하에 나타낸다. 그림 1에 각 누설 퍼미언스를 나타낸다. 그림 1(a)는 집중권 PM-LSM의 측면을, (b)는 집중권 PM-LSM의 상면을, (c)는 치단의 누설 퍼미언스를 나타낸다.

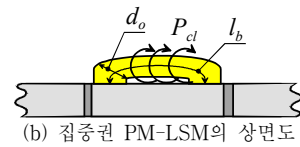
2.1 슬롯부에서 발생하는 누설 퍼미언스

그림 1(a)에 슬롯부에서 발생하는 누설자속모델을 나타내었다. 슬롯내의 누설자속은 치의 측면으로 즉 수직면으로 흐르고 있다고 가정하고 누설 퍼미언스를 도출한다. 이 누설 퍼미언스는 좌우 중의 도체(권선) 동방·동위상의 전류가 흐르고 있다고 가정한다. 따라서, 한슬롯당의 슬롯 누설 퍼미언스는 식(3)으로 정리된다.

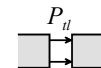
$$P_{sl} = 4\mu_0 w \left(\frac{h_t - l_c}{3w_s} + \frac{h_t}{w_{sl}} \right) \tag{3}$$



(a) 집중권PM-LSM의 측면도



(b) 집중권 PM-LSM의 상면도



(c) 치단의 누설 퍼미언스

<그림 1> PM-LSM의 전기자권선에서 발생하는 각 누설 퍼미언스

2.2 코일 단에서 발생하는 누설 퍼미언스

코일 단에서 발생하는 누설 퍼미언스를 그림1(b)에 나타내었다. 그림 1(b)에 표시한것과 같이 코일 단에서 발생하는 누설자속은 화살표처럼 흐르고 있다고 가정한다. 코일 단에서의 누설자속의 자기회로는 매우 복잡하기 때문에 오랜 고찰을 통해서 얻어진 근사식을 이용한다. 코일 단 누설 퍼미언스 P_{cl} 을 식(4)에 나타낸다. 또한, 오버행길이 l_b 는 슬롯폭 w_s 및 치폭 w_l 을 이용하여 식(5)와 같이 정리할 수 있다. 오버행 직경 d_o 는 권선의 단면적 S_w 으로부터 식(6)을 이용하여 구한다.

$$P_{cl} = \frac{2.3\mu_0}{2\pi} \left(\log \frac{l_b}{d_o} - 0.5 \right) l_b^2 \tag{4}$$

$$l_b = w_l + w_s \tag{5}$$

$$d_o = \sqrt{\frac{4nS_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4S_w}{\pi}} \tag{6}$$

2.3 치 단에서 발생하는 누설 퍼미언스

그림 2에 치 단에서 흐르는 자속 흐름의 상세도를 나타낸다. 그림2의 치 단 누설 퍼미언스 P_{tl} 는 각 도체의 전류에 의해 발생하는 퍼미언스에 의하여 구한다. 치 단에서는 그림 2에 나타난 자속 경로로 자속이 흐르기 때문에 치 단면적 및 슬롯 폭에 의하여 누설 퍼미언스를 구할 수 있다. 따라서, 치 단에서 발생하는 누설 퍼미언스 P_{tl} 는 식(7)과 같다.

$$P_{tl} = \mu_0 w \left(\frac{l_c}{w_{sl}} + 0.264 \right) \tag{7}$$

2.4 전기자 상단에 의해 발생하는 air-gap외의 누설 퍼미언스

air-gap외의 누설 퍼미언스에 대해서 검토한다. 가동자와 전기자가 비대항시의 누설자속 자로는 그림1(a)중의 air-gap외 누설 퍼미언스 P_{gl} 로 나타난 경로로 흐른다. 따라서, 전기자 상단의 캡상부 중앙으로부터 옆에 위치하는 캡상부 중앙까지의 누설 퍼미언스를 구한다. 식(8)에 air-gap외의 누설 퍼미언스 도출식을 나타낸다.

$$P_{gl} = \frac{4\mu_0 w}{\pi} \log \left(1 + \frac{w_c}{w_{sl}} \right) \tag{8}$$

2.5 1차측 전기자와 2차측 가동자가 대항시 발생하는 누설 퍼미언스

다음으로 가동자가 전기자와 대항시 발생하는 누설 퍼미언스에 대하여

검토한다. 가동자가 전기자와 대항시 발생하는 누설 퍼미언스는 그림 1(a)에 나타낸 P_{gm} 이다. 따라서, 가동자가 전기자와 대항시 발생하는 누설 퍼미언스 P_{gm} 은 식(9)을 이용하여 구할 수 있다.

$$P_{gm} = \frac{\mu_0 w \tau_p}{2(g_k + t_m)} \quad (9)$$

이상의 산출 식으로부터, 식(1)을 이용하여 인덕턴스 L_a 을 계산한다. 여기에서의 계산은 한상분에 해당되며, 가동자와 전기자가 비대항시의 인덕턴스 L_a 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$L_a = n^2 (P_{sl} + P_{cl} + P_{tl} + P_{gl}) \frac{S}{M} K_l \quad (10)$$

또한, 2차측 가동자가 1차측 전기자와 대항하고 있을 시의 인덕턴스 L_a' 는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$L_a' = n^2 \left(P_{sl} + P_{cl} + P_{tl} + P_{gl} + P_{gm} \frac{PM}{S} \right) \frac{S}{M} K_l \quad (11)$$

식(10), (11)에 대입된 식인 식(3)~(9)의 각 누설 퍼미언스 외에 고려되지 않은 누설 퍼미언스가 존재한다. 이러한 누설 퍼미언스들을 고려하기 위하여, 인덕턴스 보정계수 K_l 를 사용하였다.

다음으로, 권선저항 $R_a[\Omega]$ 을 구한다. 식(12)에 권선저항 $R_a[\Omega]$ 의 계산식을 나타낸다. 그리고, 식(13)에 코일의 평균 길이 $l_a[m]$ 산출 식을, 식(14)에 코일의 단면적 $S_c[mm^2]$ 을 나타낸다.

$$R_a = n \rho \frac{l_c}{S_c} \quad (12)$$

$$l_c = 2(w + w_t + 2d_o) \quad (13)$$

$$S_c = \frac{d_c^2}{4} \pi \quad (14)$$

이상으로 계산된 유도전압 e_0 , 권선저항 R_a , 동기리액턴스 x_s 의 산출 값을 이용하여 전원용량 V_{rms} 을 계산한다. 그림 3에 집중권 PM-LSM의 가속시의 벡터도를 나타낸다. 권선 전류 I_{rms} 를 d-q축 전류 i_d 및 i_q 로 고려할 경우, $i_d=0[A]$ 에서는 I_{rms} 와 i_q 는 동상이 된다. 따라서, 그림 3의 권선 전류 I_{rms} 와 유도전압 e_0 는 동상으로 간주할 수 있다. 이러한 이유로, 전원용량 V_{rms} 는 유도전압 e_0 및 저항강하 $R_a * I_{rms}$ 와 리액턴스 강하 $x_s * I_{rms}$ 의 벡터합으로 구해진다. 전원용량 V_{rms} 의 산출식은 이하와 같다.

$$V_{rms} = \sqrt{(e_0 + R_a I_{rms})^2 + (x_s I_{rms})^2} \quad (15)$$

3. 전원용량 산출법의 유효성 검토

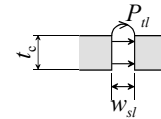
전원용량 산출법의 유효성을 검토하기 위해 집중권 PM-LSM을 제작하여 비교 분석하였다. 제작한 PM-LSM의 전기자는 9슬롯으로 구성하였고 가동자에는 8극의 영구자석을 자로강판에 배치하였다. 식(15)에 나타낸 것과 같이 PM-LSM의 전원용량 V_{rms} 은 속도기전력 e_0 , 동기리액턴스 x_s 의 총합, 권선저항 R_a 로부터 산출되기 때문에 속도기전력, 인덕턴스, 한상분의 권선저항을 측정하여 본 연구에서 제시한 설계값과 비교를 행하였다.

먼저, 속도기전력 정수에 대하여 측정을 행한다. 측정방법은 전기자와 가동자를 일치시킨 후, 가동자를 일정속도로 주행시켜 이 때 발생하는 속도기전력으로부터 속도기전력 정수를 구하였다. 측정조건은 air-gap을 3~5[mm]로 변화시켜 발생하는 속도기전력을 관찰하였다. 그림 4에 속도기전력 정수의 실측값과 계산값을 나타낸다. 속도기전력 정수의 실측값과 설계값을 비교한 결과, 설계값에 대한 실측값의 차가 -1.58~0.88[%]임이 확인되었다.

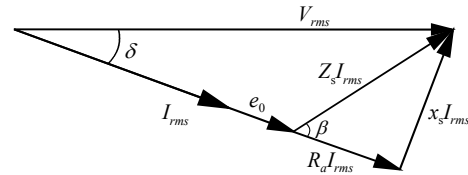
다음으로 전기자 한상분의 저항 및 인덕턴스의 측정을 행하였다. 그림 5에 전기자 한상분의 저항 및 인덕턴스의 실측값과 계산값을 나타낸다. 전기자 한상분의 저항 및 인덕턴스의 실측값과 계산값을 비교한 결과, 한상분의 저항은 0.43[%], 인덕턴스는 1.2[%]차가 발생하였으나, 그 차가 작음이 판명되었다.

4. 결 론

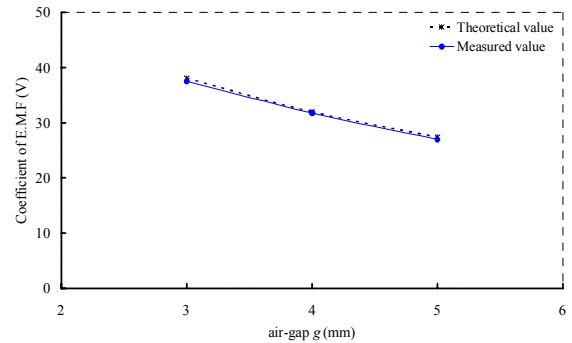
본 논문은 반송 시스템 구동용으로 사용되는 영구자석 선형 동기 전동기의 전원용량 산출에 관하여 검토를 행하였다. 영구자석 선형 동기 전동기는 고정자와 가동자가 유한장이기 때문에 회전 모터에 비하여 누설 자속이 큰 단점을 가지고 있어, 보다 정확한 설계 및 용량을 선정하기 위해서는 선형 전동기에서 발생하는 누설자속을 고려해야 한다. 이에 본 연구에서는 보다 정확한 전원용량을 산출하기 위하여, 권선저항 산출



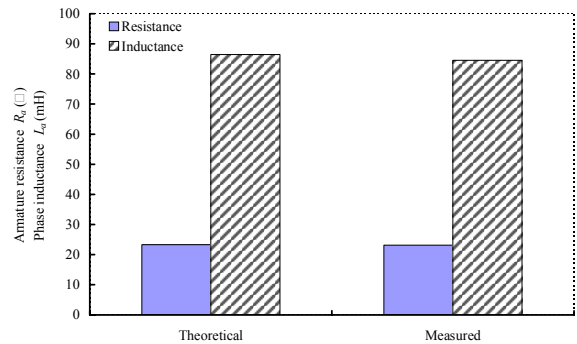
<그림 2> 치 단 누설자속의 상세도



<그림 3> 집중권 PM-LSM의 가속시의 벡터도



<그림 4> 속도기전력 정수



<그림 5> 전기자 한상분의 저항 및 인덕턴스

법 및 전기자측에 의존하는 누설 퍼미언스인 슬롯부에서 발생하는 누설 퍼미언스, 코일 단에서 발생하는 누설 퍼미언스, 치 단에서 발생하는 누설 퍼미언스, 전기자 상단에 의해 발생하는 air-gap 외의 누설 퍼미언스, 전기자와 가동자가 대항시 발생하는 누설 퍼미언스로 나누어 각 누설 퍼미언스의 계산방법 도식화 하였다. 또한, 속도기전력 정수, 한상분의 저항, 인덕턴스의 설계값과 실측값을 비교한 결과, -1.58~1.2[%]의 오차범위에서 발생함이 확인되었다.

—**감사의 글**—

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2011-0005388)

[참고 문헌]

[1] M. Karita, "Present Status of Linear Drives for Industry Applications in Japan", Proc. IEEJ conf. Linear Drives for industry applications, pp. 462-467, 2001.
 [2] Jack F. Gieras, Zbigniew and J. Piech, "Linear Synchronous Motor : Transportation and Automation System", CRC press, 1999.
 [3] I. Muraoka, H. J. Kim, M. Watada, S. Torii and D. Ebihara., "Study on the Design of the Linear Synchronous Motor for Rope-less Elevator", The Papers of Technical Meeting on Linear Drives, IEE JAPAN, LD-95-43, pp.1-8, 1995. (in Japanese)