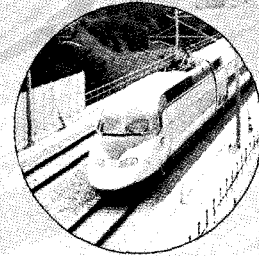
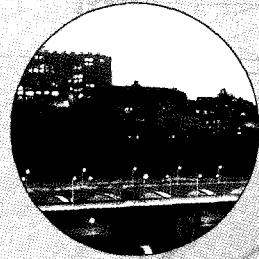


특별Session

철도차량을 위한 선형유도전동기의 설계

박도영 _ 한국기계연구원



철도차량을 위한 선형유도전동기의 설계

Design of Linear Induction Motor (LIM) for Transit Applications

박 도영*
Park, Doh Young

김 봉섭*
Kim, Bong-Seup

김 동성*
Kim, Dong-Sung

남 용윤*
Nam, Yong Yun

ABSTRACT

Outline of design procedures of Linear Induction Motor (LIM) for transit vehicle applications are presented. The design steps are based on the classical design method. Constrains specific for transit applications are discussed. Heuristic data obtained from the various LIMs are utilized to streamline the presented design steps.

1. 서론

선형유도전동기는 회전형 견인전동기에 비해 차상고를 낮게 할 수 있고, 경사 등판능력이 좋으며, Self-Steering 보기에 적용할 수 있는 장점이 있어서 이미 자기부상차량이나 일부 경전철 등에서 회전형 견인전동기를 대신하여 사용되고 있다.

본 논문에서는 고전적인 유도전동기 설계기법을 활용하여 철도차량의 견인전동기로 사용되는 선형유도전동기의 설계를 수행하는 과정을 소개한다. 설계과정에서 기존에 개발된 선형유도전동기에서 획득한 Heuristic Knowledge를 사용하여 최대한 신속하고 간략하게 설계하는 방법을 채용하였다.

설계는 사용자가 요구하는 Operational Requirements로부터 시작하여 선형유도전동기의 요구사양을 도출하고, 이에 따라 Performance Requirements를 작성하는 일반적인 순서를 따라 시작된다. 설계과정에서 철도차량에 적용하기 때문에 고려해야 하는 제한조건을 소개하고, 일반 전기기계 설계 시에 고려해야 할 사항 중에서 선형유도전동기의 설계에 적용해야 하는 항목도 소개한다.

2. 제한조건 및 Guideline

철도차량에 적용되는 선형유도전동기의 설계 시에는 제한조건이 있다는 것을 고려해야만 하는데, 대표적인 제한조건은 다음과 같다.

- 1차측과 2차측과의 간격
- 구동 인버터와 전동기의 직·병렬 조합
- 가용 공간
- 중량 제한

* 한국기계연구원 자기부상열차실용화사업단
E-mail: dypark@kimm.re.kr
TEL: (042)868-7988 FAX: (042)868-7477

- 가용 전원
- 최대 허용가능한 수직성분의 힘

또한 일반 회전기 설계 시에 적용되는 허용 가능한 도체 최대 전류밀도와 자성체의 자속밀도 등의 사항도 고려해야 한다.

3. 설계순서

그림 1은 설계순서를 개략적으로 나타내고 있다. 사용자가 요구하는 철도차량에 대한 Operational Requirements에서 차량의 제원을 도출하고, 여기서 선형유도전동기의 요구사항을 결정한다. 이에 따라 기본설계를 수행하고 그 결과를 이용하여 성능해석을 실시하고 상세설계를 수행한다. 본 논문은 그림 1에 나타난 설계절차에서 기본설계(Preliminary Design)를 하는 방법을 소개한다.

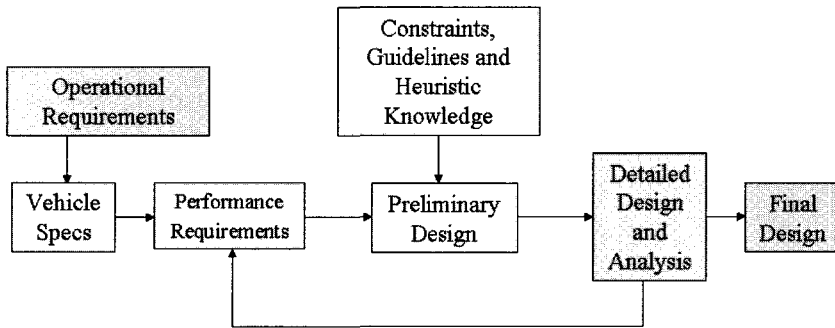
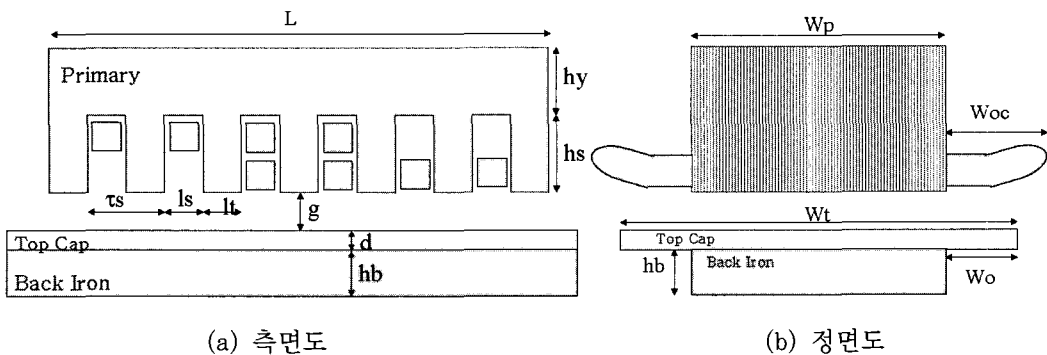


그림 1. 철도차량용 선형유도전동기 설계절차

4. 선형유도전동기 설계

그림 2는 선형유도전동기의 개략도이다. 이번 절에서는 그림 2에 나타난 치수를 포함한 설계변수를 결정하는 과정을 소개한다.



(a) 측면도

(b) 정면도

그림 2. 선형유도전동기 개략도

4.1 최대추력

차량당 요구되는 최대 추력은 승객수와 공차중량을 고려한 최대 차량 중량과 가속도 및 구배를 고려한다. 전동기의 최대 추력은 차량에 탑재된 전동기가 차량에 요구되는 최대 추력을 균등하게 분담하도록 설정한다. 차량의 주행저항을 R , 최대중량을 m , 중력가속도를 g , 경사도를 θ , 그리고 차량당 전동기의 수를 N_{Lim} 이라고 하면, 전동기의 최대추력 F_m 은 식 (1)과 같이 결정한다.

$$F_m = \frac{R + ma + mgsin\theta}{N_{Lim}} \quad (1)$$

4.2 전력 용량

전동기 운전의 Breakpoint 속도는 그림 3의 운전곡선에서 구할 수 있으며, 전동기의 최대 파워는 최대추력과 Breakpoint 속도의 곱으로 표시된다. 전동기에 공급해야 하는 전력 용량은 최대파워와 효율 및 역율을 이용하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 식 (2)에서 P_{max} 는 최대파워, η 는 효율, $\cos\phi$ 는 역율, F_m 은 최대추력, V_{bp} 는 Breakpoint 속도이다.

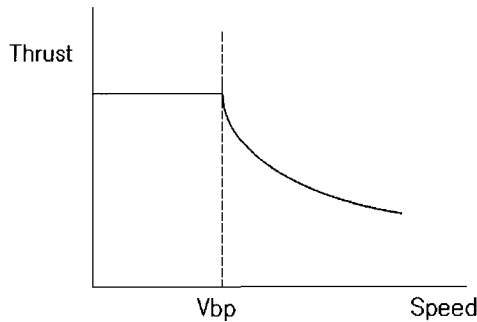


그림 3. Breakpoint 속도

$$S = \frac{P_{max}}{\eta \cdot \cos\phi} = \frac{F_m \cdot V_{bp}}{\eta \cdot \cos\phi} \quad (2)$$

전동기와 이를 구동할 인버터와의 직병렬 조합과 공급 전압에 따라 식 (2)를 이용하여 전동기의 입력전류 I 를 구한다.

4.3 극간격

선형유도전동기는 일반 유도전동기에 비해 큰 슬립을 가지는 운전점에서 운전을 하게 된다. 그림 3에서 설정한 Breakpoint 속도에서의 공급 주파수를 f_{bp} 라고 하고 슬립을 s_p 라고하면 극간격 τ 는 식 (3)과 같이 설정할 수 있다.

$$\tau = \frac{V_{bp}}{2f_{bp}(1-s_p)} \quad (3)$$

4.4 권선계수

전동기의 상수를 m , 매극매상당 슬롯수를 N_{pp} , 코일 간격당 슬롯수를 N_{cp} 라고 하면 극당 슬롯수 N_p 는 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 슬롯 간격 τ_s 는 식 (5)에 의해 정할 수 있으며, 코일 간격 τ_c 는 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$N_p = m \cdot N_{pp} \quad (4)$$

$$\tau_s = \frac{\tau}{N_p} \quad (5)$$

$$\tau_c = N_{cp} \cdot \tau_s \quad (6)$$

분포권 및 단절권을 사용하게 되면 권선계수 k_w 는 분포계수 k_d 및 단절계수 k_p 에 의해 식 (7)과 같이 정해진다.

$$k_w = k_d \cdot k_p \quad (7)$$

4.5 전동기 1차측 폭

전동기의 1차측 유효 면적(Active Area)은 극수, 극 간격, 그리고 폭의 곱으로 생각할 수 있다. 몇 종류의 선형유도전동기들은 대략적으로 식 (8)과 같은 관계를 가지고 있어서 설계 시에 이를 활용하면 설계절차를 간소화 할 수 있다. 식 (8)에서 B_g 는 공극 자속밀도이다.

$$\frac{F_m}{B_g^2 \cdot (\text{Active Area})} \approx 45 \times 10^3 \quad (8)$$

4.6 2차 도체판 (Top Cap) 두께

기 개발된 선형유도전동기들에서 2차 도체판의 유효 체적 V_t , 최대추력 F_m , 극 간격 τ , 공극 자속밀도 B_g 사이에는 대략적으로 식 (9)와 같은 관계를 가지고 있으므로 이를 활용하면 2차 도체판의 유효 체적 V_t 를 설정할 수 있다. 한편 1차측 철심의 폭 W_p 를 적절하게 설정하면 2차 도체판 (Top Cap) 두께 d 는 식 (10)과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{F_m}{\tau \cdot B_g^2 \cdot V_t} \approx 64 \times 10^6 \quad (9)$$

$$d = \frac{V_t}{p \cdot \tau \cdot W_p} \quad (10)$$

4.7 전류밀도

해석의 편이를 위해 전동기 1차측 권선의 전류를 Current Sheet로 가정하고 이의 크기 J_m 을 식 (11)에 의해 구한다. 여기서 g 는 공극의 길이, σ_a 는 2차측 도체판의 도전율이다.

$$J_m = B_g \sqrt{\left\{ \frac{\pi(g+d)}{\mu_o \cdot \tau} \right\}^2 + \left\{ \sigma_a \cdot d \cdot s_p \frac{V_{bp}}{(1-s_p)} \right\}^2} \quad (11)$$

4.8 슬롯 치수

슬롯 폭 l_s 를 슬롯 간격의 1/2~3/4 정도로 설정하면 슬롯 폭 l_s 는 식 (12)와 같이 정해진다. 슬롯에 도체가 채워지는 비율인 Fill Factor F_f 를 적절하게 선정하고 도체의 최대 전류밀도 J_c 를 냉각방식 및 운전조건에 따라 정하면 슬롯 깊이 h_s 는 식 (13)에 따라 결정할 수 있다.

$$l_t = \tau_s - l_s \quad (12)$$

$$h_s = \frac{J_m}{J_c \cdot F_f} \frac{\tau_s}{l_s} \quad (13)$$

4.9 전동기 1차측 길이

전동기 1차측의 길이 L 은 식 (14)와 같이 결정되는데, 여기서 전동기 양단에 치 반개씩의 길이 여유를 두도록 한다.

$$L = (p \cdot N_p + N_{cp})\tau_s + l_s \quad (14)$$

4.10 상당 직렬 턴수

매 슬롯의 도체 수 N_c 는 식 (15)와 같이 결정할 수 있으며, 이층권을 사용하므로 짝수가 되어야 한다. 상당 턴수 N 은 식 (16)에 의해 구할 수 있다.

$$N_c = \frac{J_m \cdot \tau_s}{\sqrt{2} I} \quad (15)$$

$$N = \frac{N_c \cdot p \cdot N_{pp}}{2} \quad (16)$$

4.11 1차측 철심 높이, 2차 Back Iron 두께, Top Cap 폭

1차측 철심의 포화 계수를 F_y 라고 하면 1차측 철심의 높이 h_y 는 식 (17)과 같이 정할 수 있다. 또한 2차측 Back Iron의 포화계수를 F_b 라고 하면 2차측 Back Iron의 두께 h_b 는 식 (18)에 의해 구할 수 있다.

$$h_y = \frac{2N_p \cdot l_t}{\pi F_y} \quad (17)$$

$$h_b = \frac{2N_p \cdot l_t}{\pi F_b} \quad (18)$$

2차측 도체판 Top Cap의 폭 W_t 는 오버행의 폭 W_o 를 정하면 식 (19)에 따라 구해진다.

$$W_t = W_p + 2W_o \quad (19)$$

4.12 기타 전동기 설계 파라미터

전동기의 권선이 다이아몬드형이라고 생각하면 코일의 길이를 구할 수 있으며, 도체의 면적과 저항율을 이용하여 1차 권선 저항 R_1 을 식 (20)에 의해 구할 수 있다. 또한 권선의 무게도 구할 수 있다. 그리고 1차측 철심과 슬롯의 치수에서 철부분의 무게를 구할 수 있으며, 권선 무게와의 합으로 전동기 무게를 알 수 있다.

$$R_1 = \frac{2NN_c(2\sqrt{(\frac{\tau_c}{2})^2 + W_{oc}^2} + W_p)}{\sigma_c h_s l_s F_f} \quad (20)$$

전동기의 상당 공극전압(RMS line-to-neutral airgap voltage) $V_{gap(l-n)}$ 은 식 (21)과 같이 구할 수 있으며, 일반 전동기에 비해 큰 누설 리액턴스를 고려하면 입력단 전압을 결정할 수 있다.

$$V_{gap(l-n)} = 4.44f_{bp}k_w NB_g \tau_c W_p \quad (21)$$

참고문헌

1. Boldea and Nasar, Linear Motion Electromagnetic Systems, Wiley International
2. J. F. Gieras and Z. J. Piech, Linear Synchronous Motors, CRC Press
3. Liwshitz-Garik and Gentilini, Winding Alternating Current Machines, Datarule Publishing Company Inc.