

선형유도전동기의 고효율 운전을 위한 슬립주파수 제어

*임 달 호, **김 규 탁, *박 승 찬, *권 오 문
*한양대학교 전기공학과, **창원대학교 전기공학과

SLIP FREQUENCY CONTROL FOR HIGH EFFICIENCY DRIVE OF SINGLE-SIDED LINEAR INDUCTION MOTOR

Dal-Ho Im, Gyu-Tak Kim, Seung-Chan Park, O-Mun Kwon
Department of Electrical Engineering, Hanyang Univ.

ABSTRACT

In this study, slip frequency control for a single-sided linear induction motor(SLIM) is discussed. We adopted variable slip frequency pattern in stead of constant slip frequency pattern under V/f constant mode, which is effective in improving driving efficiency of SLIM.

And the dynamic characteristics are analyzed by using equivalent circuit during the accelerating time.

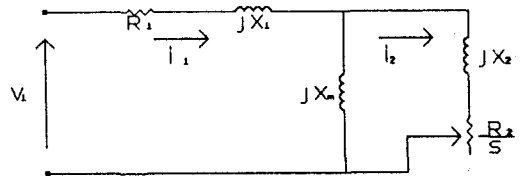


그림 1. SLIM의 동가 회로도
Fig. 1. Equivalent circuit

1. 서 론

자기 부상 열차 및 저상 경량화 전철 등의 추진 시스템으로 사용되는 선형 유도 전동기는 긴 stroke 를 운행하는 Power machine으로서[1] 통상 가속, 정속, 감속의 3단계 동작을 빈번히 하게 되기 때문에, 각 단계 별로 효율의 증대 방안이 요구된다. 특히, 자기 부상 열차뿐만 아니라 저상 경량화 전철 같은 경우에는 역 과 역 사이의 구간이 짧기 때문에 가속과 감속 시의 효율 증대화 방안이 요구된다. 선형 유도 전동기의 가, 감속 제어로 현재 일반화 되어 있는 방법중의 하나는 슬립 주파수를 제어 입력으로 사용하는 방법이다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 슬립 주파수 형태의 제어 입력은 주로 주력, 수직력 등에 중점을 두어 선정된다. 이 때, V/f 일정 모우드 하에서 일정 슬립 주파수를 제어 입력으로 사용하게 되는데 전반적으로 효율 특성이 좋지 않으며, 특히 저속 구간에서 현저하다.

따라서 본 연구에서는 일정 슬립주파수 제어가 갖는 효율상의 단점을 극복하기 위하여 V/f 일정 모우드 하에서 가변 슬립 주파수를 제어 입력으로 사용하는 제어법을 제시하였다. 이 때 원하는 슬립 주파수를 구하기 위하여 맥스웰 방정식에 기초한 간이 동가 회로를 사용하였다. 여기서 제어 입력을 구하기 위하여 정상 특성치에서 효율의 최대치와 최대 효율의 90% 되는 영역을 구하고, 주력, 수직력, 역률 등도 고려하였다.

2. 선형유도전동기의 정상 특성 해석 및 슬립 주파수 산정

1) 정상 특성 해석

선형 유도전동기의 정상 특성 해석을 위해 본 연구에서는 단위 효과를 고려한 동가회로를 구성하였다. 이 동가회로에서의 고유 파라미터들은 맥스웰의 전자 방정식을 기초로하여 2차원 해석으로부터 구한 것으로서 그 결과 식은 다음과 같다.

$$x_1 = 16mfh \frac{(kwNph)^2}{p} \times 10^{-7} \times \left\{ \frac{k_{x1}}{kw^2} \frac{20}{mq} \left(\frac{d_{2s}}{w_s} + \frac{d_{1s}}{3w_s} \right) + \frac{4}{h} (2l_{e2} + l_{e1}) \right\} \quad (1)$$

여기서 d_{1s} , d_{2s} , l_{e1} , l_{e2} 는 그림 2. 에 표시된 값이며, $K_{x1} = 1/4 (3\beta + 1)$, $w_s = K_t t_s$, $t_s = \tau/mq$ 이다.

$$r_{2e} = K_{e1} \cdot k_a \frac{\sin^2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta_2}{\cosh^2 \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 a_2) - \cos^2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta_2} \quad (2)$$

$$x_{2e} = K_{e2} \cdot k_a \frac{\sinh^2 \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 a_2)}{\cosh^2 \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 a_2) - \cos^2 \frac{\pi}{\tau} d_2 \beta_2} \quad (3)$$

$$x_m = K_a \coth \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2 l_2') \quad (4)$$

여기서 $K_a = 8mf f_1 \mu_0 (kwNph)^2 / p$ 이고, K_{e1} 과 K_{e2} 는 단위 효과를 보정하기 위한 보정 계수이다. [2]

위의 회로 정수를 사용하여 본 연구실에서 보유하고 있는 SLIM의 정상특성을 해석한 결과들을 그림 3. 에 나타내었다. 계산된 회로정수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.199 & [\Omega] \\ X_1 &= 0.017f_1 & [\Omega] \\ X_m &= 0.038f_1 & [\Omega] \end{aligned} \quad (5)$$

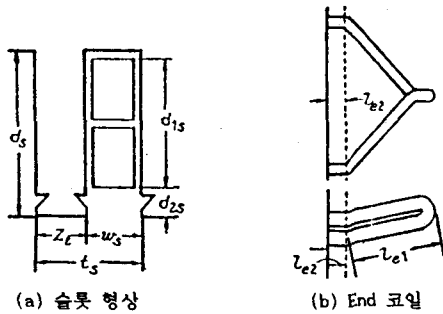


그림 2. 슬롯 및 End 코일의 형상
Fig. 2. Configuration of Slot and End coil

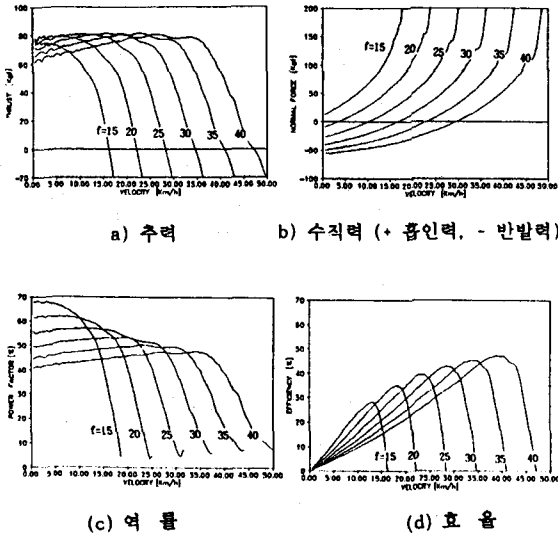


그림 3. 정상 특성 해석 그래프
Fig. 3. Characteristic analysis of steady state

그림 3. a)는 속도 - 추력의 정상 특성 그래프로, 저 주파수 영역에서 등가 2차 저항이 크기 때문에 V/f 를 변화 시킬 때의 추력 특성은 권선형 유도 전동기에 비교적 큰 외부 2차 저항을 삽입한 경우의 수하특성이 되고, 또한 V/f 의 비가 일정하기 때문에 공극자속이 일정하게 되어 최대 추력 발생점이 주파수의 증가에 따라 일정하게 되는 비례 추이를 나타낸다.
b)는 속도 - 수직력 그래프로 저 주파수에서의 흡인력이 고주파수로 갈수록 Reaction plate의 와류 증가에 의해 고슬립 영역에서 반발력이 됨을 알 수 있다. c)는 속도 - 효율 그래프로 속도 증가와 더불어 최대 효율점이 증가됨을 보이고 있다. d)는 역률을 보인 것으로, 인버터 용량 문제등을 고려하기 위해 도시 하였다. 그리고, 단부 효과를 고려한 위 해석 결과의 양들은 슬립 0 부근의 값이 적정하지 않아 슬립 1 에서 0.1 까지를 표시한 것이다.

2) 슬립 주파수 산정법

슬립주파수를 산정함에 있어서 제한조건으로서 정격 추력은 60[Kgf]로, 수직력은 정격추력의 1.5배 까지 제한한 90[Kgf]로 선정하였고, 효율은 최대 효율점과 $0.9 \times \eta_m$ 을 각각 선정하여 그림 4.에 나타내었다.

그림 3. a)와 같이 본 연구에서 상정하고 있는 모터의 정상 특성치가 수하 특성에 가깝게 되어서, 정격 추력 이상 발생하는 영역은 그림 4.에서 정격 추력 하한선 이상의 슬립 주파수에서 발생하게 된다. 또한, 1.5배의 수직력 제한선이 추력

제한선 아래에 존재하게 되어 정격 추력 제한선 이상에서는 정격 추력 이상을 발생 가능하고, 또한 수직력을 추력의 1.5배 이하의 값으로 제한 하는 것이 가능하다.

차량용 선형 유도 전동기의 관점에서 효율의 증대는 중요하기 때문에 효율의 관점에서 슬립 주파수를 보면, 최고 효율을 발생하게 하는 슬립 주파수 영역은 추력 제한선과 수직력 제한선 내에 존재하기 때문에 정격 추력을 발생하지 못한다. 따라서, 최고 효율점에서의 슬립 주파수 운전은 부족한 추력에 의해 일정 가속을 하지 못하게 된다. 따라서, 효율의 제한선을 최고 효율의 90 [%]까지 확장하여 효율 증대를 위한 영역을 표시한다. 이 경우 약 20 [km/h] 이전까지의 저속 영역을 제외한 전 영역에 걸쳐 정격 추력 이상이 발생되게 된다. 또한, 수직력 제한선도 전 영역에 걸쳐 최고 효율의 90[%] 이상 대역내에 있다.

이와 같은 조건하에서 슬립주파수를 산정하면, 저속영역내에서는 정격 추력 제한선이 최대 효율의 90[%] 효율 제한선 안에 존재하지 않기 때문에 정격 추력을 위하여 슬립 주파수를 8 이상의 영역에서 구하게 된다. 속도가 20[km/h] 이상에서는 최고 효율의 90[%] 영역 내에 존재하기 때문에 효율, 추력, 수직력을 고려하여 구하면 된다. 이와 같은 산정법에 의해 고효율 운전을 위한 슬립 주파수 패턴을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} sf &= 8.0 & (V2 \leq 20[\text{Km/h}]) \\ sf &= 0.113 \times V2 + 5.74 & (V2 > 20[\text{Km/h}]) \end{aligned} \quad (6)$$

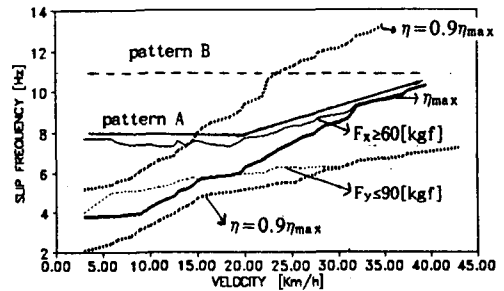


그림 4. 슬립 주파수 패턴 산정
Fig. 4. Slip frequency pattern

3. 동특성 해석

본 연구에서는 soft starting을 갖는 V/f 일정 운전하에서 SLIM의 슬립주파수 일정 제어[pattern B]와 가변 슬립주파수 제어[pattern A]에 관하여 동특성 해석을 하였다. 이때 SLIM의 동작은 운동방정식에 의해 시뮬레이션 되었다. 만일 역행중인 차량의 속도를 v_i [km/h], 운전중인 시간을 t_i [s] 라 하면, 가속도 $A(v_i)$ [km/h/s]는 다음과 같이 주어진다. [3]

$$A(v_i) = (F_x(v_i) - R(v_i)) / 28.35W \quad (7)$$

여기서, W 는 차량의 중량[ton], F_x 는 추력[kgf], R 는 주행 저항[kgf]이다. 차량의 주행저항 R 은 다음식으로 계산할 수 있다.

$$R(v_i) = (3 + 0.03v_i + 0.00168v_i^2) \times (W + F_y(v_i)) \quad (8)$$

여기서, F_y 는 흡인력[tonf]이다.

또한 매우 짧은 시간 Δt 초 동안 차량의 가속운동이 일정하다고 가정하면 Δt 초 후의 속도 v_{i+1} 와 시간 t_{i+1} 은 다음과 같이 된다.

$$v_{i+1} = v_i + A(v_i)\Delta t \quad (9)$$

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t \quad (10)$$

본 연구에서는 차량의 중량을 1[ton], $\Delta t = 0.07[s]$ 로 하여 시뮬레이션 하였다. 그림 5는 각각 슬립주파수 일정 제어[pattern B]와 가변 슬립주파수 제어[pattern A]인 경우의 동특성을 나타낸 것이다. pattern A인 경우 전반적으로 pattern B보다 효율이 약 1.5[%] 증가됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 SLIM의 추력 일정 제어를 위하여 V/f 일정 모드하에서 슬립주파수 일정 제어 패턴과 가변 슬립 주파수 제어 패턴을 결정후 동특성 해석을 하였다. 그 결과 가변 슬립 주파수 제어 패턴에서 슬립주파수 일정제어 패턴보다 효율이 증대되는 특성을 얻을 수 있었다.

따라서, 이와 같은 가변 슬립주파수 패턴이 자기부상열차와 도시 전철의 추진시스템 제어에 응용이 된다면 매우 유용하리 라고 생각된다.

5. 참 고 문 헌

- [1] S.A.Nasar, I.Boldea, "Linear Motion Electric Machines", Wiley, 1976.
- [2] 野中作太郎, "片側式リニアインダクションモータの近似特性計算式について", 電氣學會論文誌, 57-B69, pp.565-572
- [3] Sakutaro Nonaka, Nobuo Fujii, "Dynamic characteristics of Urban Transit LIM with Feed-Back Speed Control", Maglev '89, pp.327 - 332, 1989.
- [4] Sakutaro Nonaka, Tsuyoshi Higuchi, "On the Reduction of Energy Consumption of Linear Induction Motors for Urban Transit", Maglev '89, pp.333 - 338, 1989.
- [5] 野中作太郎, 藤井信男, 小島安信, "新都市交通用リニア誘導モータのV/f一定運轉時の動特性", 電學論 D 109, pp.493 - 499, 1989.

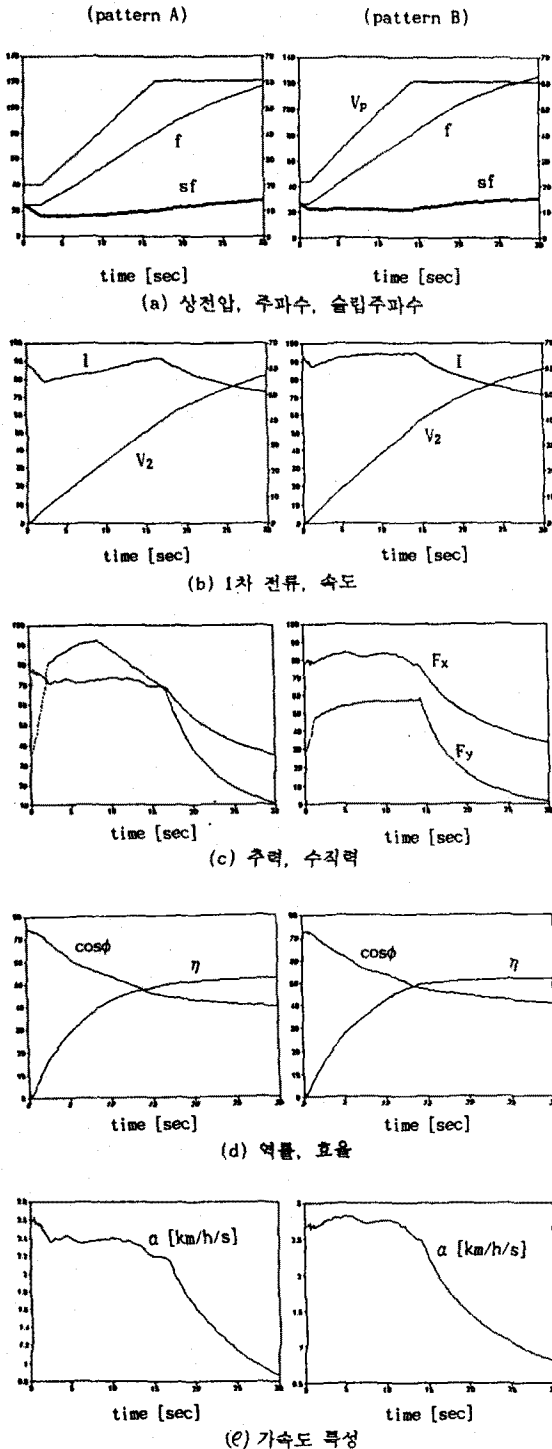


그림 5. 동특성

Fig. 5. Dynamic characteristics