

# 유한요소법을 이용한 자기부상용 선형유도기의 운전 특성 분석법

김기찬\*

<sup>1</sup>한밭대학교 전기공학과

## Analysis on Driving Performance of Linear Induction Motor for Maglev System by Finite Element Method

Ki-Chan Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Hanbat National University

**요약** 본 논문에서는 유한요소법을 사용하여 자기부상열차용 선형 유도 전동기의 효율적인 운전곡선 도출 방법을 제안한다. 긴 시간의 동특성 해석을 위해 선형유도기 모델을 선형에서 회전형 타입으로 변환하고, 제어시 필요한 슬립 파라미터를 전장장 해석을 통하여 효과적으로 도출하였다. 견인용 선형유도전동기는 인버터에 의해 저속의 정토크 영역에서는 전압/주파수 (V/f) 일정제어를 수행하고, 고속에서의 정출력 영역에서는 전압을 고정시키고 주파수를 증가시키면서 제어한다. 따라서 논문에서는 정토크 및 정출력 영역의 운전 특성을 도출하기 위해 각 구간에서 일정한 스텝으로 슬립특성 곡선을 도출하고, 차량의 운전 상태에 따른 슬립 및 주파수를 특성곡선의 보간법에 의해 결정한다. 본 방법을 이용하면 차량의 임의의 부하상태에 따라 최적의 운전 지령을 제시할 수 있다.

**Abstract** This paper proposes a novel analysis method on the driving performance of LIM (linear induction motor) by FEM (finite element method). First, a linear model was converted with a rotation model to perform the dynamic analysis for a long time. Through the FEM model, the slip parameter for the control algorithm could be induced effectively. The LIM for the traction system was performed at a constant V/f in the region of constant torque, and a constant V and variable f in the region of constant power. Several slip characteristic curves according to the voltage and frequency were calculated by FEM in advance. The driving performance was then induced by interpolating the slip characteristic curves according to the load of the vehicle.

**Key Words** : Finite elements method, Linear induction motor, Slip curves, Voltage by Frequency control

### 1. 서론

산업화의 고도화에 따라 직선 운동을 필요로 하는 시스템 증가로 선형전동기의 사용빈도가 나날이 증가하고 있다. 일반적인 회전형 타입으로 선형구동시스템을 대신할 경우 회전운동에서 직선운동으로 변환하는데 부수적인 동력변환 장치가 필요하기 때문에 시스템 구성이 복잡해지고, 손실, 소음, 진동 등이 발생하여 비효율적이다. 선형 유도전동기는 일반 회전형 유도전동기를 선형적으로 펼친 형태로 기본 구동 원리는 동일하다[1-3].

일반적으로 유도전동기의 설계시 등가회로를 사용하여 토크, 출력, 전류, 전압, 역률, 효율을 구하고 제어시 파라미터 또한 계산했으나, 선형 유도전동기는 기계적 공극이 크고 입구단과 출구단이 존재하기 때문에 단부효과에 의한 누설 자속 영향이 크므로 단순히 등가회로에 의한 수학적 계산으로 운전특성을 분석하는 것이 어렵고 오차 또한 크다[4,5]. 따라서 자속의 비선형성을 고려할 수 있는 유한요소법을 이용하여 선형유도전동기를 해석하는 방법이 진행되었고, 최근 컴퓨팅 속도의 증가로 해석시간 또한 단축할 수 있었다[6-11].

\*Corresponding Author : Ki-Chan Kim(Hanbat National Univ.)

Tel: +82-42-821-1090 email: kckim@hanbat.ac.kr

Received February 21, 2014

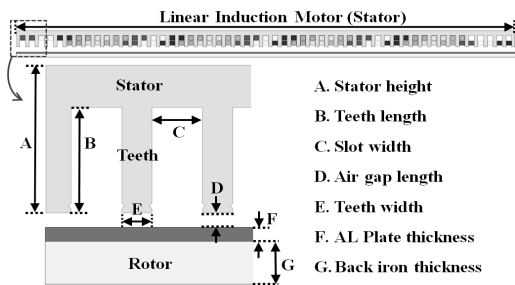
Revised March 10, 2014

Accepted July 10, 2014

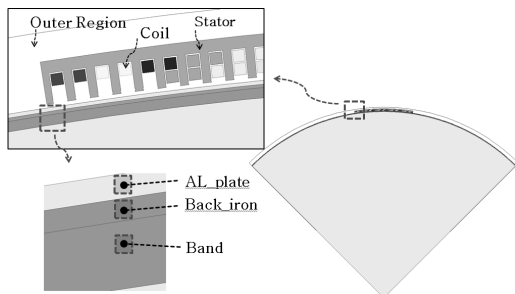
본 논문에서는 자기부상열차용 선형유도전동기의 다양한 운전특성을 고려한 제어 파라미터를 산출하기 위해 유한요소법을 이용하여 선형유도전동기의 슬립 특성 곡선들을 주파수와 전압에 따라 구현한 다음, 그래프 보간을 통하여 특정 운전 패턴에 따른 제어 지령 및 운전 특성을 분석하는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 기본모델링

Fig. 1은 자기부상열차용 선형유도 전동기의 유한요소 모델과 설계 파라미터들을 보여준다. 선형유도기의 직선형 모델을 이용하여 동특성 해석시 과도상태를 지나 정상상태에 도달하기 위해 고정자가 이미 해석 영역을 벗어나므로 해석이 어렵다. 따라서 Fig. 2와 같이 직선형을 등가적으로 회전형으로 모델링하여 주기 경계조건을 이용하면, 일반 유도전동기를 해석하는 방법으로 선형유도전동기를 해석할 수 있다. 그림에서와 같이 해석시간을 단축하기 위하여 1/4 모델을 주기경계조건을 이용하고 최종 해석 결과에서 산출된 토크 및 전압 값은 다시 1/4 값으로 조정하였다. 회전형 모델을 이용하므로 해석의 오차를 줄이기 위하여 회전자의 직경을 최대한 크게 해주어 선형에 가까운 레일 구조를 표현하고자 하였다.



[Fig. 1] Linear model of Linear Induction Motor



[Fig. 2] Rotation model of Linear Induction Motor

## 2.2 슬립 계산법

회전형 유도기의 슬립은 식 (1)을 사용하여 계산하지만, 선형 유도전동기는 식 (2)로 슬립을 계산하므로 회전자계 속도와 차량의 속도(고정자 속도)를 선형 운동의 단위인 미터/초(m/s)로 환산하여야 한다. 이 때 회전자계의 선속도는 Fig. 3과 같이 산출하고, 차량의 선속도는 Fig. 4와 같이 계산한다.

$$S_{LM} = \frac{N_s - N}{N_s} \tag{1}$$

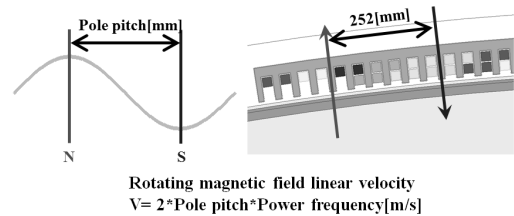
$$S_{LIM} = \frac{V_s - V}{V_s} \tag{2}$$

$S_{LM}$  : 유도기 슬립,  $N_s$  : 회전자계 속도[rpm]

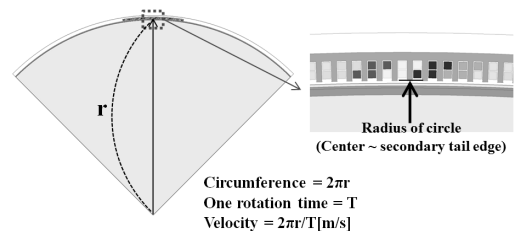
$N$  : 로터 회전속도[rpm]

$S_{LIM}$  : 선형 유도전동기 슬립

$V_s$  : 회전자계 선속도[m/s],  $V$  : 차량 선속도[m/s]



[Fig. 3] Transformation to line speed of magnetic rotating field



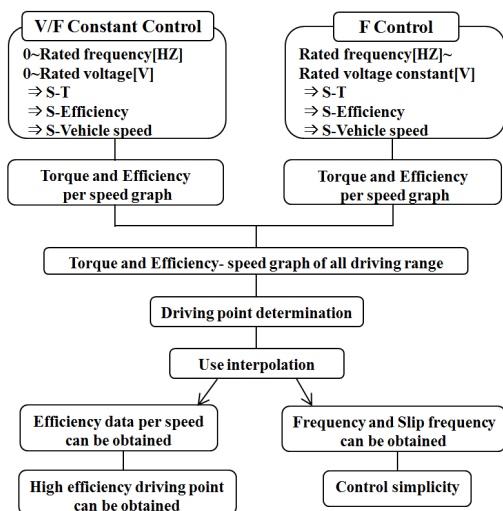
[Fig. 4] Transformation to vehicle speed

## 3. 운전곡선 도출

### 3.1 운전특성 분석을 위한 과정

자기부상열차의 선형유도기의 운전영역은 크게 정토크 구간과 정출력 구간으로 분리된다. 제어기법에서는 정토크 구간에서 V/f 일정 제어를 수행하고 정출력 구간

에서는 전압을 고정시키고 주파수만 증가시키는 제어를 한다. 따라서 운전특성을 분석하기 위해 Fig. 5의 흐름도와 같이 각각의 제어구간에서 전압과 주파수의 크기를 스텝으로 증가시키면서 선형유도전동기의 슬립에 따른 효율, 전류, 역률, 출력 특성 곡선을 도출한 다음, 운전 부하에 따른 특성값을 슬립특성 곡선의 보간을 통하여 산출하는 방법을 제시한다. 제안된 해석법을 사용하면 각 운전 특성에 따른 토크, 효율, 역률 계산이 용이하고, 제어에 필요한 슬립 주파수를 쉽게 도출할 수 있다.



[Fig. 5] Flowchart for driving performance analysis

### 3.2 V/F 일정제어 구간의 슬립특성 곡선 해석

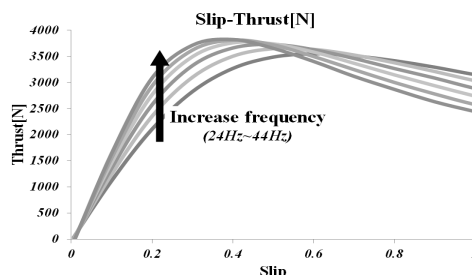
Fig. 6과 같이 주파수를 24[Hz]에서 44[Hz]까지 4[Hz] 간격으로 나누고, V/f 비율이 일정하도록 전동기의 상전압을 86.6[V]에서 158.77[V]까지 올리면서 유한요소법의 입력 조건을 주고, 슬립에 따른 차량 속도[m/s], 슬립주파수, 상전류, 추력, 효율에 대한 데이터를 산출하였다. 이를 이용하여 Fig. 7에는 슬립에 따른 추력 곡선을, Fig. 8에는 차량속도에 따른 추력 특성 곡선을, Fig. 9에는 차량속도에 따른 효율 곡선을 각각 나타내었다.

슬립에 따른 추력 곡선에서 보듯이 동일한 추력을 발생시킬 때 주파수가 감소하면 슬립은 커지며, 반대로 동일한 슬립조건에서 주파수가 증가하면 추력 또한 증가함을 알 수 있다. 속도에 따른 추력곡선과 속도에 따른 효율 곡선은 입력주파수 변화에 따라 일정한 간격을 유지하기 때문에, 임의의 운전 속도에 따른 추력 값이나 효율 값을 선형보간을 이용하여 도출할 수 있다. V/f 일정제어

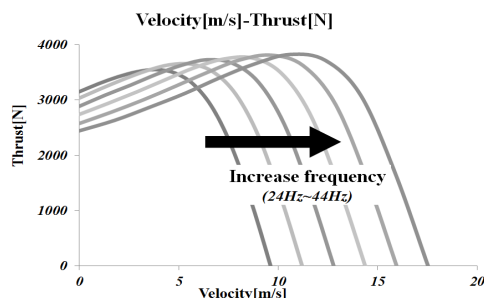
는 정토크 구간에 해당되는 차량 속도의 운전특성에 이용되므로, 고속 구간의 운전 특성을 분석하기 위해서는 정출력 구간의 특성해석도 수행하여야 한다.

Frequency-24Hz 86.6V					
Slip	Speed [m/s]	Slip frequency	Phase Voltage[V]	Thrust [N]	Efficiency
0	9.65	0	86.60	-38.34	0.05
0.1	8.68	2.4	86.60	1118.52	0.56
0.2	7.72	4.8	86.60	2106.02	0.58
0.3	6.75	7.2	86.60	2825.93	0.52
0.4	5.79	9.6	86.60	3269.03	0.44
0.5	4.82	12	86.60	3487.46	0.36
0.6	3.86	14.4	86.60	3549.87	0.28
0.7	2.89	16.8	86.60	3511.35	0.20
0.8	1.93	19.2	86.60	3418.34	0.13
0.9	0.96	21.6	86.60	3294.61	0.06
1	0	24	86.60	3150.62	0

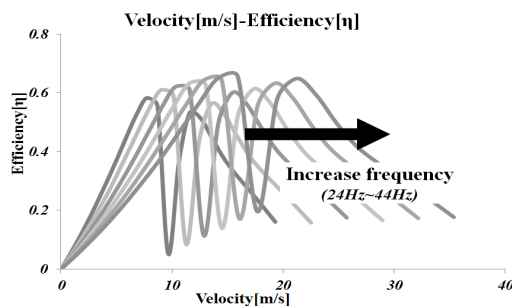
[Fig. 6] Characteristics according to frequency and voltage



[Fig. 7] Thrust-slip curves according to frequency.



[Fig. 8] Thrust curves according to vehicle velocity



[Fig. 9] Efficiency curves according to vehicle velocity

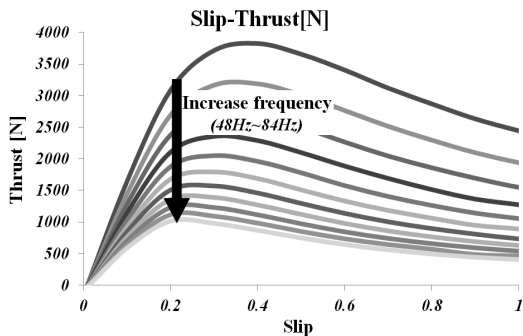
### 3.3 주파수 제어 구간의 슬립특성 곡선 해석

전원주파수를 44[Hz]에서 88[Hz]까지 4[Hz]간격으로 나누어, 슬립에 따른 차량속도, 슬립 주파수, 상 전압, 추력, 효율에 대한 해석결과를 Fig. 11에 나타내었다. 이를 이용하여 Fig. 12에는 슬립에 따른 추력 곡선을, Fig. 13에는 차량속도에 따른 추력 특성 곡선을, Fig. 14에는 차량속도에 따른 효율 곡선을 각각 나타내었다.

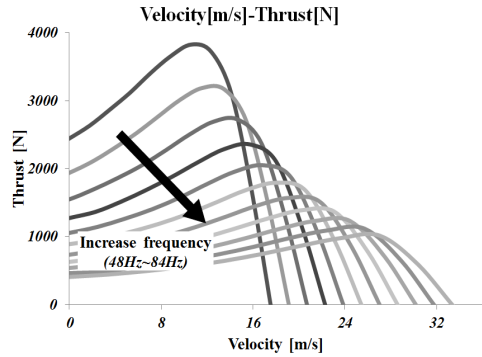
주파수 제어에서는 주파수가 일정한 간격으로 변동하는 반면 정출력 구간이기 때문에 전압은 일정하다. 이런 경우에는 Fig. 7에 나타난 그래프와 같이 동일 슬립일 때 주파수가 증가함에 따라 추력 값이 감소하는 특성을 나타낸다. 주파수 제어 구간에서도 속도에 따른 추력 곡선이나 속도에 따른 효율 곡선에서는 주파수가 동일한 간격으로 변화함에 따라 일정한 간격을 두고 그래프의 양상이 변화하기 때문에 이때에도 구하고자 하는 속도구간에서 추력 값이나 효율 값을 선형 보간으로 도출할 수 있다.

Frequency-48Hz						
Slip	Speed [m/s]	Slip frequency	Phase Voltage[V]	Thrust [N]	Efficiency	
0	19.30	0	158.77	-144.33	0.21	
0.1	17.37	4.8	158.77	1442.31	0.67	
0.2	15.44	9.6	158.77	2692.97	0.66	
0.3	13.51	14.4	158.77	3165.91	0.57	
0.4	11.58	19.2	158.77	3187.13	0.47	
0.5	9.65	24	158.77	3012.63	0.38	
0.6	7.72	28.8	158.77	2764.75	0.29	
0.7	5.79	33.6	158.77	2514.83	0.20	
0.8	3.86	38.4	158.77	2295.93	0.13	
0.9	1.93	43.2	158.77	2096.80	0.06	
1	0	48	158.77	1938.48	0	

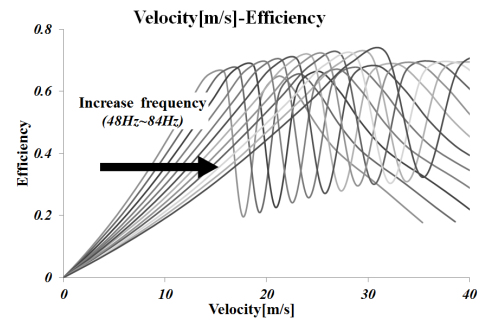
[Fig. 10] Characteristics according to frequency



[Fig. 11] Thrust-slip curves according to frequency.



[Fig. 12] Thrust curves according to vehicle velocity

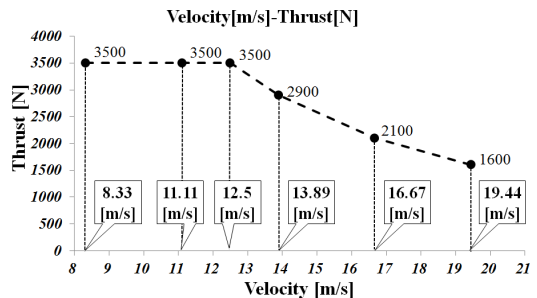


[Fig. 13] Efficiency curves according to vehicle velocity

### 3.4 운전 부하 결정

Fig. 14는 분석하고자 하는 임의의 운전 부하곡선을 차량속도에 따른 추력 곡선으로 나타낸 그림이다. V/f 일정 제어 구간과 주파수 제어 구간에서 각각 3 점을 선택하여 운전점을 결정하였다.

Table 1과 같이 정격속도를 45[km/h]로 결정하고 나머지 운전점들은 10[km/h] 간격으로 지정하였다. 각각의 속도에서 필요한 추력값은 실제 자기부상열차의 만차시 차량에 요구되는 추력값을 지정하였다.



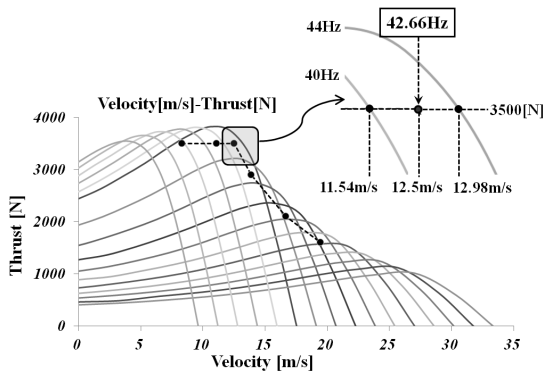
[Fig. 14] Driving Load Curve and Points

[Table 1] Velocity and thrust according to diving points

V[km/h]	V[m/s]	Trust
30	8.33	3500
40	11.11	3500
45	12.50	3500
50	13.89	2900
60	16.67	2100
70	19.44	1600

### 3.5 보간법을 이용한 운전 특성

보간법을 이용하기 위해 앞 절에서 구한 전체 운전 구간 내의 속도에 따른 추력 곡선을 유한요소법을 이용하여 도출한 다음, 분석하고자 하는 운전 부하 곡선을 동일 그래프에 구현하였다. Fig. 15와 Fig. 16은 각각 V/f 일정 제어 구간의 운전 점과 주파수 제어 구간의 운전 점을 보간하는 방법을 나타낸 그림이다. 운전점이 다음과 같이 두 주파수에서의 특성 곡선 사이에 존재할 때, 데이터 값을 이용하여 각각의 주파수에 해당하는 속도나 추력 값을 찾아낸다. 여기서 구한 데이터는 운전 점에 해당하는 속도나 추력 값을 보간하는 데 이용된다. Fig. 15는 추력 3,500[N]에 해당하는 두 주파수의 속도 값을 찾아내었고 운전 점의 속도와 비교하여 선형으로 운전 점 주파수 42.66[Hz]를 구할 수 있다. Fig. 16에서도 동일한 방법으로 운전 점 양단에 해당하는 주파수의 추력값을 구한 다음, 운전 점의 주파수 값을 보간하는데 이용한다.



[Fig. 15] Frequency interpolation at V/f constant region

### 3.6 결과 비교 분석

그래프 보간을 이용하여 6개의 운전 점에 해당하는 전원 주파수를 찾으면 운전 점에서의 전원 주파수와 차량의 속도 데이터를 이용해 각각의 슬립이나 슬립 주파수를

구할 수 있다. Table 2와 같이 보간으로 찾은 주파수들로 각 운전 점에서의 슬립을 나타내었고, 그 슬립의 데이터 정보를 가지고 시뮬레이션 한 결과 값을 비교한 것이다. 추력에서 a는 분석하고자 하였던 운전 점의 추력값이고 b는 보간을 이용하여 찾은 각 운전 점에서의 슬립과 주파수를 가지고 시뮬레이션 한 결과 값이다. 두 값을 비교 해 보면 약 2% 미만의 오차를 나타내고 이는 본 제안 방법이 타당함을 나타내는 것이다.

[Table 2] Analysis Results for Verification of Proposed Method.

Frequency [Hz]	Velocity [m/s]	Slip	Thrust[N]		Error rate
			a	b	
32	8.33	0.35	3500	3538.84	1.097535
38.8061	11.11	0.29	3500	3533.23	0.940499
42.6591	12.5	0.27	3500	3561.22	1.719074
49.9161	13.8889	0.31	2900	2958.23	1.968407
58.9066	16.6667	0.3	2100	2127.85	1.308833
67.1065	19.4444	0.28	1600	1624.91	1.533008

## 4. 결론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 선형유도전동기의 운전부하에 따른 특성을 도출하는 새로운 해석 방법을 제안하였다. 해석의 편리함을 위해 선형 모델을 회전형 모델로 변환하였으며 운전구간을 V/f 일정제어구간과 주파수 제어구간으로 구분하여 운전구간 분석시 필요한 해석을 수행하였다. 각 속도에 따른 추력이나 효율 곡선을 산출하여 분석하고자 하는 운전 점에서의 주파수를 그래프 보간을 이용하여 구하였다. 보간된 슬립과 주파수를 이용하여 시뮬레이션 한 결과 본 제안 방법의 타당성을 검증할 수 있었다. 이와 같은 방법으로 운전부하에서의 효율 역시 구할 수 있다.

그래프 보간을 이용하면 운전특성을 쉽게 분석할 수 있기 때문에 제어 시 필요한 슬립 주파수를 산출할 수 있고 속도에 따른 최적 효율 운전 영역도 결정할 수 있다.

## References

[1] A.A. Pourmoosa, M. Mirsalim, "Equivalent circuit of Linear Induction Motor based on coupled-circuit model and

optimization design using Imperialist Competitive Algorithm", *IEEE Conference on Power Electronics*, pp. 349-354, Feb, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PEDSTC.2013.6506731>

[2] Zhang Qingjie, Zhang Yanqing, "Scheme design of high performance converting control of linear induction motor used for electromagnetic launch", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Launch Technology (EML)*, pp. 1-4, May, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EML.2012.6511067>

[3] Junfei Han, Yaohua Li, Yumei Du, Wei Xu, Nengqiang Jin "Dynamic characteristics study of single-sided linear induction motor with finite element method", *IEEE Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 439-444, July, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/AIM.2008.4601701>

[4] Zurong Zhang, T.R. Eastham, Graham E. Dawson, "Peak thrust operation of linear induction machines from parameter identification ", *IEEE Conference on Industry Applications Conference*, pp. 375-379, Oct, 1995.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IAS.1995.530324>

[5] J. Jamali, "End effect in linear induction and rotating electrical machines ", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, pp. 440-447, Sept, 2003.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2003.815853>

[6] Jia Zhao, Wei Zhang, Jin Fang, Zhongping Yang, T.Q. Zheng, Youmei Liu, "Design of HTS Linear Induction Motor using GA and the Finite Element Method", *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 527-531, June, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIEA.2010.5517100>

[7] D. Hall, J. Kapinski, M. Krefta, O. Christianson, "Transient Electromechanical Modeling for Short Secondary Linear Induction Machines", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 789-795, Sept, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2008.926060>

[8] Wei Xu, Jian Guo Zhu, Yongchang Zhang, Zixin Li, "Equivalent Circuits for Single-Sided Linear Induction Motors", *IEEE Transactions on Applications Industry*, pp. 2410-2423, Nov.-Dec, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2010.2073434>

[9] K.-W. Lee, K.-H. Um, "A Study on the Deterioration Process of 22kV Power Cables in Operation", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol. 13, No. 3, pp. 127-133, 2013.

[10] B.-S. Shin, J.-H. Park, C.-W. Moon, H.-S. Ahn, "Design of a Model Based Controller with Safety", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and*

Communication, Vol 13, No 2, pp. 9-14, 2013.

[11] D. Nam, "Planning of Barrier Free Pedestrian Safety Devices", *Journal of The Institute of Webcasting, The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol 13, No 2, pp. 217-223, 2013.

---

## 김기찬(Ki-Chan Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (전기공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2005년 1월 : 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원
- 2008년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (전기공학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 교수

<관심분야>  
전기기기, 전기제어