

# 전기자동차의 가속성능 개선을 위한 전력시스템의 특성분석

최옥돈\*,김진식\*,이재문\*,이달해\*\*  
현대중공업 마북리연구소\* 영남대학교\*\*

## Charateristic Analysis of Electrical Power System for Acceleration Performance Improvement of EV

UD-CHoi\*, JS-Kim\*, JM-Lee\*, DH-Lee\*\*  
Hyundai Heavy Industries Co.Ltd.,\* Yeoungnam University\*\*

### 1 초 록

전기자동차의 구동장치는 모터, 인버터, 감속기 및 차동기어 등으로 구성되는데 모터는 주로 유도전동기와 영구자석형 동기전동기, 브러쉬리스 전동기 등이 사용되고 있다. 본 연구에서는 이 중에서 가격과 내구성 면에서 이점이 있는 유도전동기를 적용한 전기자동차의 전력시스템의 특성분석과 가속성능에 대해 다루었다. 축전지, 유도전동기, 인버터로 구성된 전력시스템을 각각 모델링하고, 가속성능 개선을 위해 고속에서의 최대토크 알고리즘과 고전적 방법인 속도에 반비례 하도록 자속을 제어하는 방식에 대해 각각 적용하여 차량의 가속성능을 예측, 분석하고 이를 원차시험을 통해 시험결과와 비교 제시하고자 한다. 본 연구에서는 주행 중에 축전지 전압 변동에 따라 유도전동기의 고속 운전 영역 즉, 약계자 영역에서 전기자동차의 가속 특성이 어떻게 나타나는지를 고찰 하였다.

### 2 서 론

환경문제와 대체 에너지문제가 크게 대두되면서 내연기관 차량의 배기가스가 도시에서의 대기공해

의 주원인이 되고 있다. 이를 해결하기 위한 방안의 일환으로 미국의 경우 캘리포니아에서는 저공해 자동차 판매에 대한 법안이 제정되어 2003년부터 적용할 예정이다. 따라서 세계적으로 저공해 자동차개발에 많은 나라들이 참여하고 있으며 그 중에서 가장 실현 가능성이 높은 전기자동차의 개발이 활발이 이루어지고 있다. 우리나라에서도, 국책과제로 전기자동차 개발을 추진 중에 있으며 당사에서도 개발에 참여하고 있다. 본 연구에서는 전기자동차의 여러 가지 충족 요건 중 가속특성의 개선을 위해 전기자동차의 전력시스템을 축전지, 모터, 인버터로 나누어 모델링하고 각 서브시스템은 다음의 향상된 모델에 적용하기 위해서 2단자 모델로 만들었다.<sup>[1]</sup> 전기자동차는 운전영역에 따라 축전지 전압이 변한다. 이로 인하여 유도전동기 고속운전에서 약계자 제어방식에 따라 차량의 가속성능특성이 달라진다. 여기서는 일반적으로 잘 알려진 회전자 속도에 반비례한 자속제어 방식과 고속에서 최대토크를 낼 수 있는 최대토크 제어알고리즘을 이용하여 실제차량에 적용할 경우 그결과를 비교 하였다.<sup>[4][5]</sup> 시뮬레이션 상에서의 가속특성

을 예측, 분석하고 실제 차량에서의 실험 데이터와 실제 차량과 같은 조건하에서의 시뮬레이션 데이터에 대해서 비교 분석하였다.

### 3 전기자동차 전력시스템 모델링

#### 3.1 축전지시스템

축전지 모델은 축전지의 비선형적인 특성, 즉 충방전시 단자전압과 용량 특성이 히스테리시스 곡선을 그리는 특성과 방전전류에 따라 축전지용량과 단자전압이 달라지는 특성을 나타낸 회로모델이다<sup>[3]</sup>. 이 회로 모델의 파라미터는 주어진 축전지의 충방전 데이터에 의해 결정할 수 있다. 축전지 모델은 그림 1과 같다.

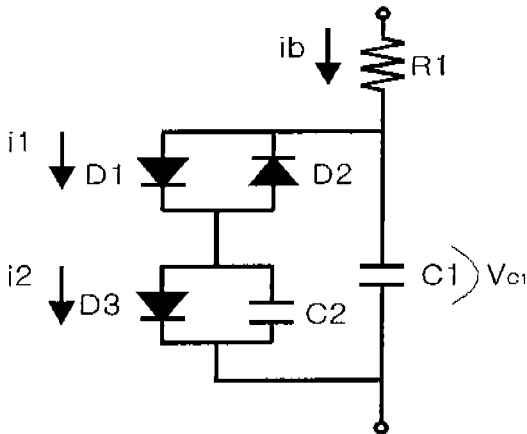


그림 1 축전지 모델

#### 3.2 구동시스템

구동시스템은 유도전동기와 전압형 인버터로 구성 되어있으며, 인버터의 모델은 공간 전압벡터 제어 형태로 하였다. 구동시스템에서 입력은 자동차의 운전자에 의한 Accel. 및 Brake 지령치인 기준토크 신호와 직류단 전압 즉 추진용 축전지의 단자 전압이며, 출력은 직류단 전류와 자동차의 속도이다. 구동시스템은 시뮬레이션 하고자 하는 용도에 따라 세 단계 즉 exact model, average model, functional model로 나누어 지며, 본 연구에서는 이

들 세가지 모델을 모두 적용 검토 하였으나, 시뮬레이션 시간과 동적인 특성을 고려해서 여기서는 average 모델을 사용하였다. Average 모델은 그림 2와 같다.<sup>[2]</sup>

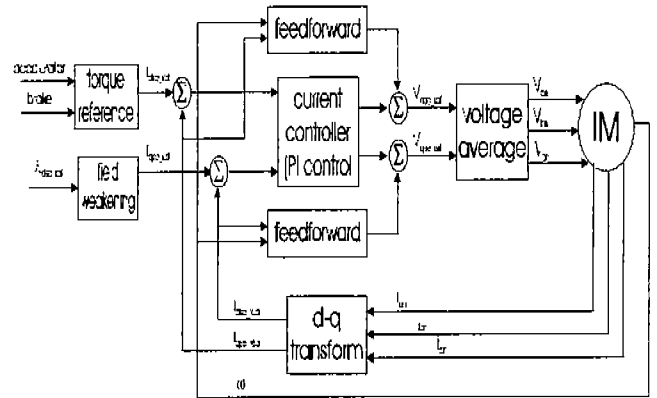


그림 2 average 모델

##### 3.2.1 최대토크 제어 알고리즘<sup>[4][5]</sup>

최대토크 제어 알고리즘은 전동기 및 인버터의 상수와 물리적인 제한조건들을 고려하여 제어기에서 제어 가능한 영역에서 전동기의 출력토크를 최대로 발생할 수 있는 조건으로 운전하는 알고리즘이다. 회전자 자속기준 벡터제어에서 정상상태에서의 전동기의 전압을 나타내면 다음과 같다.

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \omega_e L_{\sigma} i_{ds}^e \quad (1)$$

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e - \omega_e L_{\sigma} i_{qs}^e \quad (2)$$

식(1),(2)를 고속운전영역에서 고려해 보면 고정자 저항에 의한 전압 강하성분은 역기전력 성분에 비해 아주 작아서 무시할 수 있다. 즉 이식을 다시 전개하면 다음과 같다.

$$v_{qs}^e \approx \omega_e L_{\sigma} i_{ds}^e \quad (3)$$

$$v_{ds}^e \approx -\omega_e L_{\sigma} i_{qs}^e \quad (4)$$

위와 같은 전압 조건에서 인버터가 전동기에 인가

할 수 있는 최대 상전압  $v_{smax}$ 는 공간 전압벡터 PWM방법을 이용하였을 경우  $v_{dc}/\sqrt{3} \times 0.9$ 이다. 여기서 0.9는 데드타임으로 인한 전압의 손실이 약 10%임을 의미한다. 전기자동차용 인버터의 경우는 직류 입력전압이 운전조건과 주행거리에 따라 축전지의 전압이 변동하며, 이에 따라 인버터에서 전동기에 인가해 줄 수 있는 최대 전압도 크게 변동하게 된다. 최대토크 제어를 위한 전압 제한조건은 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$v_{smax}^2 \geq v_{ds}^2 + v_{qs}^2 \quad (5)$$

식(3)과 (4)를 식(5)에 대입하면 다음과 같다.

$$v_{smax}^2 \geq (\omega_e L_s i_{ds}^{e*})^2 + (\omega_e L_s i_{qs}^{e*})^2 \quad (6)$$

또한 전류 제한조건은 다음과 같다.

$$i_{smax}^2 \geq (i_{ds}^{e*})^2 + (i_{qs}^{e*})^2 \quad (7)$$

인버터의 조건과 전동기의 상수를 고려하여 계산한 정격운전 주파수( $\omega_{base}$ ) 및 제 2약계자가 시작되는 주파수( $\omega_1$ ), 최대 슬립주파수는 다음과 같다

$$\omega_{base} = \frac{v_{smax}}{\sqrt{(L_s I_{ds,max})^2 + L_s^2 (i_{smax}^2 - I_{ds,max}^2)}} \quad (8)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L_s^2 + L_\sigma^2}{2L_s^2 L_\sigma^2}} \cdot \left(\frac{V_{smax}}{i_{smax}}\right) \quad (9)$$

$$\omega_{slip-max} = \frac{i_{qs}^{e*}}{T_r i_{ds}^{e*}} = \frac{1}{T_r \sigma} \quad (10)$$

위의 전압조건과 전류조건을 모두 고려하면서 전동기의 출력토크를 최대로 할 수 있는 자속지령 조건을 구하면 다음과 같다.

1)  $\omega_e < \omega_{base}$  인 경우

$$i_{ds}^{e*} = I_{ds-rate} \quad (11)$$

$$i_{qs-max}^e = \sqrt{i_{smax}^2 - i_{ds-rate}^2} \quad (12)$$

2)  $\omega_{base} \leq \omega_e < \omega_{base}$  인 경우

$$i_{ds}^{e*} = \sqrt{\frac{(V_{smax}/\omega_e)^2 - (L_\sigma i_{smax})^2}{L_s^2 - L_\sigma^2}} \quad (13)$$

$$i_{qs-max}^e = \sqrt{i_{smax}^2 - i_{ds-rate}^2} \quad (14)$$

3)  $\omega_e > \omega_1$  인 경우

$$i_{ds}^{e*} = \frac{V_{smax}}{\sqrt{2} L_s \omega_e} \quad (15)$$

$$i_{qs-max}^e = \frac{V_{smax}}{\sqrt{2} L_\sigma \omega_e} \quad (16)$$

### 3.3 전체 시스템 구성

전기자동차의 가속성능 특성에 대한 분석을 위해 적용한 전체 전력시스템은 그림3과 같고, 크게 구동시스템, 축전지시스템, 속도와 도로정보로 구성 되어있다.<sup>[2]</sup> 주어진 가속 패턴에 대해 축전지의 전압변화와 입력전류의 변화, 구동시스템의 출력토크와 모터의 운전영역, 자동차의 속도등에 대해 시뮬레이션을 통해 나타내었다.

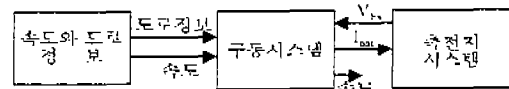


그림 3 전체 전력시스템 구성도

chassis 무게	1489.8 kg
payload 무게	217.5 kg
전면 공기 저항비	0.845
전면 투영 면적	1.95 m*m
타이어 구름 저항 계수 (Co)	2.96 kgf
타이어 반지름	0.290 m
감속 기어비	8 : 1
공기 저항 계수	0.345

표1 실험에 사용된 전기자동차 파라미터

전지종류	납산전지
모듈당 공칭전압	12V
사용수량	26모듈
전지용량	18.6kWh(312V,59.6Ah)
최대방전전류	300A
무게	520Kg

표2 추진용전지 사양

표1은 실험에서 사용된 전기자동차의 파라미터이고, 표2는 차량에 탑재된 추진용전지의 사양이다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실제 차량 실험 비교분석

##### 4.1 최대 가속성능 시뮬레이션

시뮬레이션에서 축전지의 초기 전압은 321.6 V이고, 도로조건은 평지이며, 차량의 진행방향 및 축종이 없는 조건하의 정지상태에서 100 km/h까지 도달 하는 가속시간을 알아보기 위해 시스템 모델은 average 모델을 이용하였다. 그림 4는 자동차의 가속특성을 나타낸 것으로 가속시간은 약 20초이다. 그림에서 A영역은 정토크, B영역은 정출력(제1약계자 영역)이고, C는 break down 영역(제2약계자 영역)이다. 제 2약계자 영역에서 가속성능이 급격히 떨어지는 것을 알 수 있으며, 이 구간에서 위쪽그래프는 최대토크 제어알고리즘을 적용한 결과이며, 아래 그래프는 1/ω로 자속을 제어한 것이다. 그림 5는 가속시 축전지로 들어가는 입력전류이고 그림 6은 축전지의 전압변화를 나타낸다

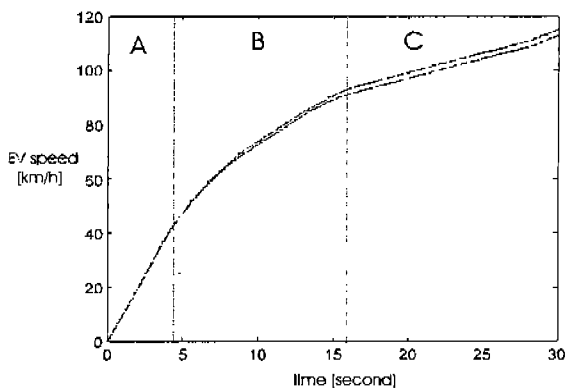


그림 4 EV의 가속특성 시뮬레이션결과

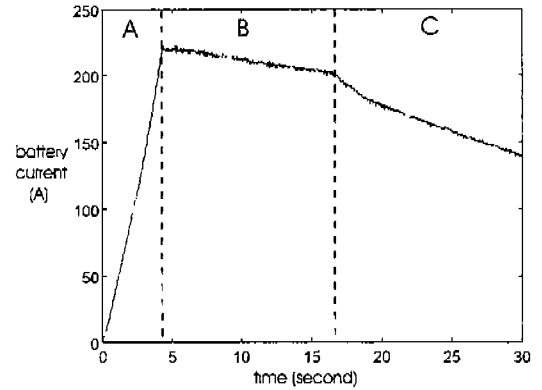


그림 5 축전지 입력 전류

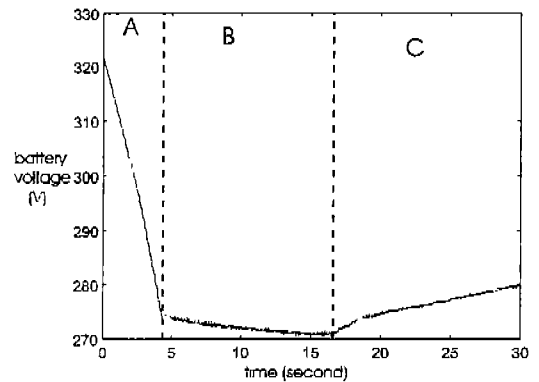


그림 6 축전지 전압

##### 4.2 현차시험과 시뮬레이션의 비교

현차시험은 시험주행 도로의 여건 때문에 최대 가속실험을 완벽하게 행하지는 못하였다. 그림7은 그림8의 B와 같은 가속지령으로 가속할 경우의 가속특성실험 결과이며, 여기서 가속특성이 30초 이상 소요 되는데도 100km/h에 도달하지 않는 것은 그림8의 A와 같은 최대 토크지령을 인가하지 않았기 때문이다. 그림 8의 B는 실제 차량실험에서 인가된 지령과 출력토크 그래프이다. A는 시뮬레이션 결과이고 B는 실제 실험 결과이다. 그림 9는 전기자동차 모터의 속도(rpm)를 실측치와 계산치를 비교한 것이다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 다소 다른 이유는 주행 저항 모델이 실제 상황과 다르기 때문이다. 그러나 모터의 출력토크에 대한 결과는 일치하는 것을 볼 수 있다.

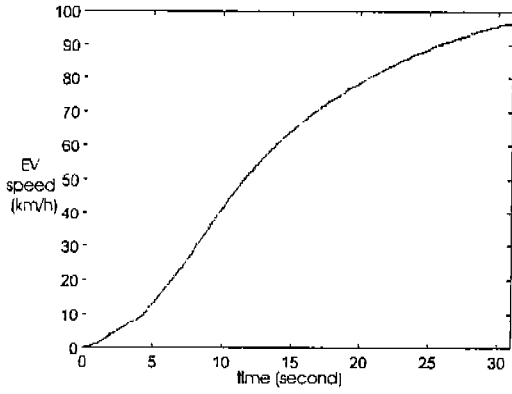


그림 7 실제 차량의 가속특성

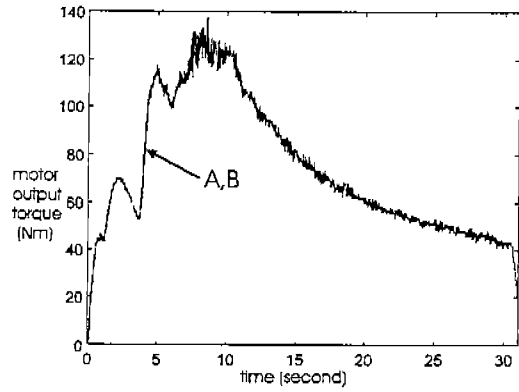


그림 10 모터 출력토크 그래프

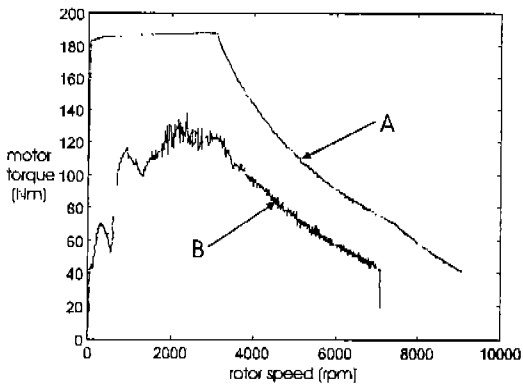


그림 8 가속지령 토크와 속도 그래프

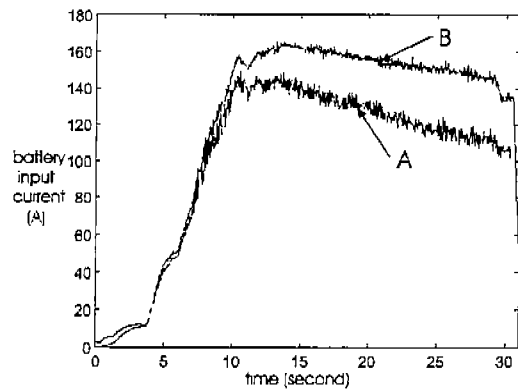


그림 11 축전기 입력 전류 그래프

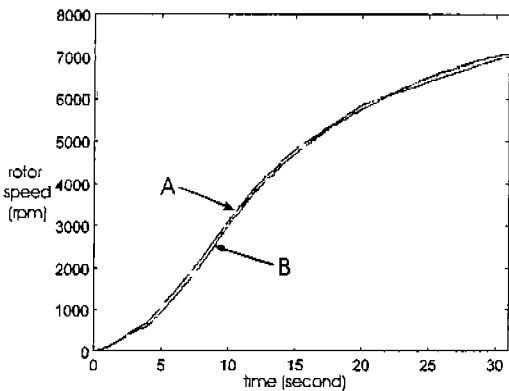


그림 9 가속시 모터의 실제속도(B)와 시뮬레이션결과(A)

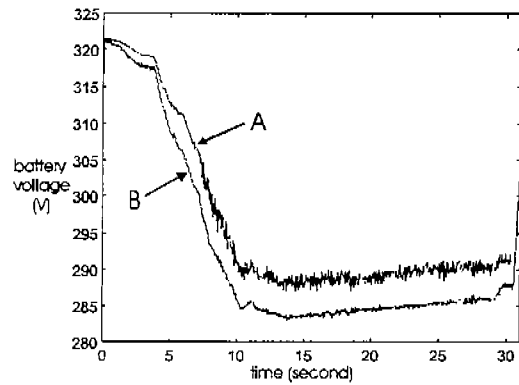


그림 12 축전기 전압 그래프

그림 10은 현차시험시 운전자의 Accel.지령(A)과 실측된 모터의 출력 토크를 나타낸 것으로 거의 일치함을 알 수 있다. 그림11은 축전지로 들어가는 전류 즉 구동시스템이 소비하는 전류이다. 실제 실

험에서 더 많이 나온 이유는 시뮬레이션 모델에서 인버터손실과 모터의 철손에 대한 항이 모델링시 포함되지 않았기 때문이다. 차량의 주행시 소비 전류가 더 커질수록 축전지의 전압은 더 떨어지며

이것은 모터의 출력토크에도 영향을 미치게 된다. 그림 12는 가속시 축전지의 전압변동에 대한 것으로 A는 계산치이고 B는 실험치를 나타내고 있다. 전압역시 손실분이 고려 되지 않았기 때문에 실험치의 전압강하가 크게 나타났다.

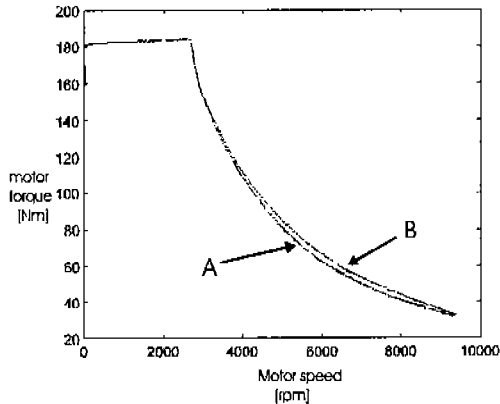


그림 13 제어방식에 따른 속도-토크특성

그림 13은 본 연구에서 적용한 전기자동차용 유도전동기를 고속에서의 토크제어 방식에 따라 큰 속도 토크에 대한 특성을 나타낸 것으로 정토크 영역에서는 출력토크가 동일하고 고속에서는 최대토크 제어방식(B)이 기존의 방식(A)보다 다소 큰 출력토크를 얻을 수 있음을 나타낸다.

## 5 결 론

전기자동차용 전동기는 일반 전동기보다 경격대비순시토크값이 약4배 이상이며, 내연기관 차량과는 달리 하나의 고정된 기어로 전속도 구간을 운전해야 하므로 차량설계시 목표사양을 만족 시키기 위해서 차량의 모든 파라미터를 고려하여야 한다. 특히 전동기는 저속에서 고속까지 전구간 차량의 가속성능을 만족 할 수 있도록 설계 해야 하나 전지의 전압변동을 고려하여 고속에서도 충분한 최대토크를 출력하도록 설계 해야한다. 본 연구에서는 가속성능 개선을 위해 고속시 제2 약계자 영역에서 파변조기법을 적용하고, 최대토크제어 알고리즘과 기존의 방식을 시뮬레이션에 의해 비교 하였다.

그러나 현차 시험시 시험장소의 제한조건에 의해 이상적인 시험이 어려워 정확한 비교가 어려웠으며, 시뮬레이션상 두방식을 차량에 적용하여 특성을 파악 하였다. 향후 chasis dynamo에 의한 시험을 통해 정확한 결과를 도출할 계획이다. 실제 차량 실험과 시뮬레이션 결과를 비교해 보면 모터의 출력토크 특성은 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 일치하는 것을 볼 수 있었고 구동시스템의 소비 전류중 인버터손실과 모터의 철손에 의한 소비 전력이 큰 것을 알 수 있다. 향후 구동시스템 모델에서 인버터손실, 모터의 철손, 동력축에 대한 기계적손실을 고려한 모델을 적용할 계획이다.

## 참고 문헌

- [1] Bo H. Cho, " Modeling and Analysis of Spacecraft Power System ", IEEE PESC, 1985.
- [2] 이재문, 조보형, " 전기자동차 전력시스템의 모델링 및 시뮬레이션 ", 대한전기학회 추계학술대회 1996. 11월.
- [3] H.G. Zimmerman, R.G. Peterson, "An Electrochemical Cell Equivalent Circuit for Storage Battery Power System Calculations by Digital Computer", IECEC 1970 Proceedings, Vol 6, pp. 6.33~6.39.
- [4] 김 상훈, 약계자 영역에서 유도전동기의 최대토크 운전, 서울대학교 대학원 전기공학과 공학 박사학위 논문, 1994년 8월
- [5] Uk-Don CHoi, Jin-Sik Kim etc., "Induction motor drive system for Electric Vehicle Using a Robust on-line Tuning of the Rotor Time Constant", ICEE 1996.