# 회전자 슬롯치수에 따른 견인용 유도전동기 특성에 관한 연구

구대현, 강도현, 하회두, 박정우, 이재봉, 김종무
한국전기연구소 전기자동차 개발팀

# A Study on Characteristics of Traction Induction Motor According to Rotor Slot-parameters

Dae-hyun Koo, Do-hyun Kang, Hoi-doo Ha, Jung-woo Park, Jae-bong Lee, Jong-mu Kim
K.E.R.I E.V. Team

**Abstract**

In this study, design and analysis of 3-phase induction motor are as follows.

- Motor characteristics analysis by equivale-nt circuit
- Motor characteristics analysis according to variation of rotor slot-tip
- Motor characteristics analysis according to variation of rotor slot-mouse
- Motor characteristics analysis according to variation of rotor slot-opening

## 1. 서 론

철도 차량용 견인전동기로 최근 대용량 고전압 반도체 소자인 GTO, Thyristor등의 기술진보와 제어기술의 발달에 의하여 교류전동기인 3상 유도전동기가 철도관련 추진시스템에 새로이 채택되는 추세에 있다.

특히 전동기가 대형화가 될 경우 소형전동기와는 달리 슬롯형태가 직사각형의 개방슬롯형태로 이루어지고 대형 전동기의 경량화를 위하여 전류밀도 및 치부분의 자속분포 특성등을 고려하면 회전자의 슬롯의 형태가 deep-bar형태로 되는등 소형기와는 다른 특성들이 많이 나타난다.

본 논문은 이러한 철도 차량용 견인용 유도기를 장하 분배법으로 설계를 한 다음 등가회로도법으로 해석을 하였다.

고정자는 사각권선을 감아야 하는 관계로 슬롯의 변화를 줄 여지가 많이 없지만 회전자는 slot의 tip, mouse, 개구폭등의 변화의 여지가 많이 있다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 회전자 slot의 tip, mouse, 개구폭등의 치수를 변화시켜 가면서 1, 2 차측의 누설 퍼미언스와 reactance, 효율, 역률값 등의 변화를 분석하여 전동기의 효율 및 역률 특성에서 최대값을 얻을 수 있는 회전자 치수를 구하므로서 견인용 유도전동기 최적화 설계의 기틀을 마련하였다.

## 2. 등가회로도법에 의한 전동기특성분석

장하분배법에 의해 설계된 견인용 유도전동기의 사양을 다음 표 1에 나타내었으며 설계 정격출력은 1,200 [kW] 급으로 하였다.

표 1. 견인용 유도전동기 기본사양

| 파 라 미 터 | 단 위 | 설 계 치 |
|---|---|---|
| 정격 출력 | kVA | 1,200 |
| 선간 전압 | V | 1,430 |
| 극 수 | | 4 |
| 정격 주파수 | Hz | 90 |
| 상 수 | | 3 |
| 코일당 턴수 | | 4 |
| 사 용 도 체 | cm | 1.4×0.45 |
| 고정자 슬롯수 | | 36 |
| 고정자 Slot-개구폭 | cm | 1.78 |
| 고정자 Slot 상단폭 | cm | 1.78 |
| 고정자 Slot 하단폭 | cm | 1.78 |
| 고정자 Slot-tip | cm | 0.3 |
| 고정자 총 슬롯깊이 | cm | 4.42 |
| 고정자 yoke 길이 | cm | 10.3 |
| 고정자 외경 | cm | 77.44 |
| 고정자 내경 | cm | 48 |
| 기계적 공극 | cm | 0.22 |
| 회전자 외경 | cm | 47.56 |
| 회전자 슬롯수 | | 45 |
| 회전자 슬롯 개구폭 | cm | 0.3 |
| 회전자 Slot 상단폭 | cm | 1.3 |
| 회전자 Slot 하단폭 | cm | 1.3 |
| 회전자 Slot-tip | cm | 0.3 |
| 회전자 총 슬롯깊이 | cm | 2.5 |

### 2.1 회전자 슬롯치수 변경에 따른 전동기 특성

회전자 슬롯의 사양은 SO = 3 [mm], SM = 0 [mm], ST = 3 [mm]로 설계되었다. 이러한 설계 기준 Data를 가지고 그림 1의 회전자의 slot-mouth(SM), 회전자 slot-tip(ST), slot-opening(SO) 부분을 변화 시켰을 경우 전동기 특성을 분석해 보면 다음과 같다.

#### 2.1.1 Slot-tip (ST) 변화

회전자 slot-opening(SO)=3[mm],회전자 slot-mouth(SM)=0[mm]일 때 slot-tip(ST)부분을 변화 시켰을 경우 전동기 특성을 분석한 결과를 다음 표 2와 그림 2, 3, 4에 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 회전자 slot-tip부분을 증가

시키면 1차측 slot permeance=3.58, 1차측 end-leakage permeance=5.43, 1차측reactance는 X1=0.16으로 변화가 없으며 그림 1의 2차 reactance성분만 회전자 slot-tip부분에 비례하여 증가하는데 이의 주성분은 거의가 2차측 slot-reactance성분으로 그림 3에서와 같이 함께 증가함을 알 수가 있다. 이와 더불어 역률도 그림 4에서와 같이 회전자 slot-tip부분이 증가할 수록 역률값이 나빠짐을 알 수 있다. 그러므로 회전자 slot-tip부분은 최대한 작게 설계하는 것이 전동기의 역률향상에 기여함을 알 수가 있었다. 하지만 회전자 slot-tip부분의 치수가 너무 작으면 이부분에서 자속밀도의 포화가 우려되므로 포화를 방지할 수 있는 정도의 크기는 유지해야 된다.

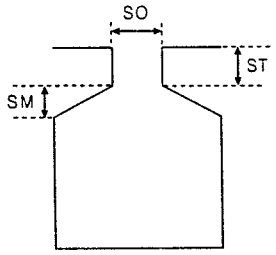


그림 1. 회전자 슬롯형상

표 2. 회전자 slot-tip 부분을 변화시켰을 경우 전동기 특성 ( SO=3 [mm], SM=0[mm] )

| 구 분 | Rotor Slot Tip 부분 [mm] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2차측 Slot-permeance | 2.93 | 4.0 | 5.1 | 6.2 | 7.3 |
| 2차측 End-permeance | 0.96 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |
| Zig-zag permeance | 3.04 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |
| Belt permeance | 1.28 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |
| X1 [Ω] | 0.16 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |
| X2 [Ω] | 0.095 | 0.11 | 0.121 | 0.133 | 0.15 |
| XM [Ω] | 5.14 | 5.14 | 5.14 | 5.13 | 5.13 |
| 출 력 [kW] | 1217 | 1216 | 1213 | 1210 | 1208 |
| 전 류 [A] | 571 | 572 | 574 | 575 | 576 |
| 효 율 [%] | 94.7 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |
| 역 률 [%] | 90.8 | 90.4 | 90.1 | 89.8 | 89.5 |
| Carter 계수 | 1.388 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |

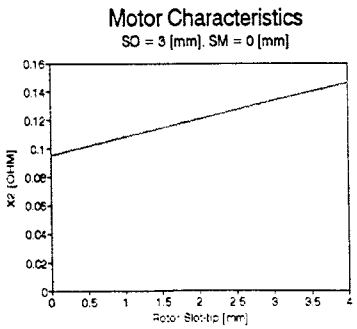


그림 2. 2차측 reactance 특성

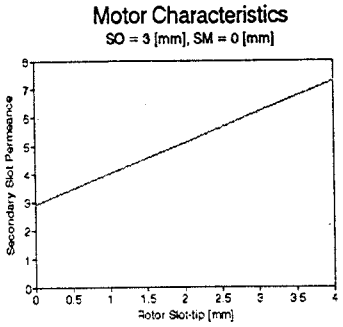


그림 3. 2차측 slot-permeance특성

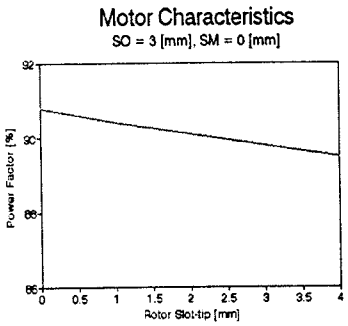


그림 4. 역률 특성

### 2.1.2 Slot-mouth(SM) 변화

다음은 회전자 slot-opening (SO) = 3[mm], 회전자 slot -tip(DR)=3[mm]일 때 slot-mouth (SM)부분을 변화 시켰을 경우 전동기 특성을 분석한 결과를 다음 표 3과 그림 5,6,7에 나타내었다. 이 표3과 그림5에서 알 수 있는 바와 같이 앞의 회전자 slot-tip부분과 마찬가지로 회전자 slot-mouth부분이 커질수록 2차 reactance가 커지게 된다. 이 2차 reactance 주성분은 거의가 2차측 slot-permeance성분으로 그림 6에서와 같이 회전자 slot-mouth부분이 커질수록 함께 증가를 하였다. 이와 더불어 역률도 그림 7에서와 같이 회전자 slot-mouse부분이 증가할 수록 역률값이 나빠지게 되므로 회전자 slot-mouth부분도 회전자 slot-tip 부분과 마찬가지로 최대한 작게 설계하는 것이 전동기의 역률향상에 기여함을 알 수가 있었다. 그러므로 회전자 slot-mouth 부분과 slot-tip부분은 서로 병행하여 설계가 되어야 할 것으로 판단된다.

표 3. 회전자 slot-mouth부분을 변화시켰을 경우 전동기 특성 ( SO=3 [mm], ST = 3 [mm] )

| 구 분 | Rotor Slot Mouse 부분 [mm] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 2차측 Slot-permeance | 5.1 | 5.694 | 6.287 | 6.88 | 7.473 |
| 2차측 End-permeance | 0.96 | 0.962 | 0.967 | 0.971 | 0.973 |
| Zig-zag permeance | 3.04 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |
| Belt permeance | 1.28 | 1.276 | 1.274 | 1.272 | 1.27 |
| X1 [Ω] | 0.155 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |
| X2 [Ω] | 0.120 | 0.128 | 0.135 | 0.14 | 0.149 |
| XM [Ω] | 5.135 | 5.13 | 5.12 | 5.1 | 5.1 |
| 출 력 [kW] | 1,213 | 1,212 | 1,212 | 1,211 | 1,210 |
| 전 류 [A] | 573.6 | 574.5 | 575.4 | 576.3 | 577 |
| 효 율 [%] | 94.7 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |
| 역 률 [%] | 90.1 | 89.9 | 89.7 | 89.5 | 89.4 |
| Carter 계수 | 1.388 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |

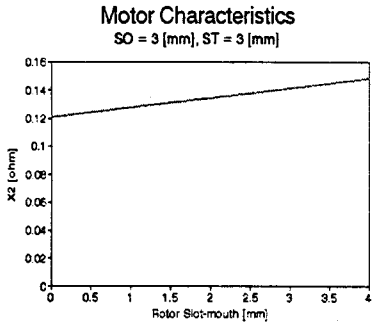


그림 5. 2차측 reactance 특성

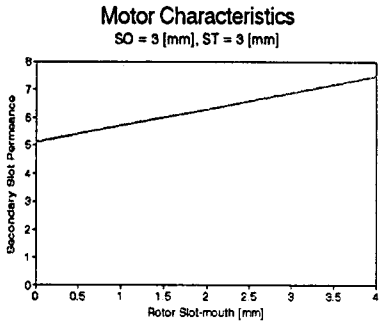


그림 6. 2차측 slot-permeance특성

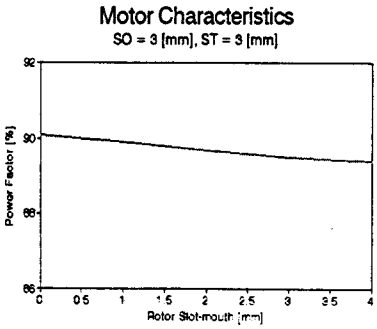


그림 7. 역률 특성

### 2.1.3 Slot-opening(SO) 변화

회전자 slot-mouth(SM)=0, 회전자 slot-tip =3[mm]일 때 slot-opening (SO)부분을 변화시켰을 경우 전동기 특성을 분석한 결과를 다음 표 4과 그림 8에서 그림13까지 나타내었다. 회전자 slot-opening을 증가하면서 변화시켰을 경우 앞에서 나타낸 회전자 slot-tip, mouse를 변화시켰을 경우와는 달리 zig-zag, belt permeance (그림 8)가 많이 감소됨을 알 수가 있었으며 그림 9의 2차측 누설 reactance 와 그림 10의 1차측 누설 reactance도 이의 영향으로 함께 감소됨을 알 수 있었다. 그림 11는 2차측 slot permeance를 나타낸 그림으로 slot-opening이 증가할수록 감소하는 현상을 볼 수가 있는데 2차측 누설reactance가 감소하는 주원인 factor이다. 그림 12는 전동기 역률 특성을 나타낸 그림으로 앞의 그림 8,9의 누설 reactance가 slot opening(SO)이 증가할수록 감소하는 관계로 opening (SO)이 1~2[mm]까지는 역률값이 1.5 [%]증가하나 그 이후로는 포화현상을 보이고 있다. 이러한 slot opening을 무작정 크게 하는 것은 그림 13에서 알 수 있는 바와 같이 slot opening을 크게 할수록 Carter계수가 증가하여 철손 증가의 원인이 된다. 그러므로 slot-opening(SO)값이 4[mm]이상 설계하는 것은 전동기 특성상 결코 좋은 현상을 얻을 수 없을 것으로 판단된다.

표 4. 회전자 slot-open 부분을 변화시켰을 경우 전동기 특성 ( ST=3 [mm], SM=0 [mm] )

| 구 분 | Rotor Slot Open 부분 [mm] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2차측 Slot-permeance | 11.6 | 6.73 | 5.1 | 4.29 | 3.8 |
| 2차측 End-permeance | 0.96 | 좌동 | 좌동 | 좌동 | 좌동 |
| Zig-zag permeance | 3.26 | 3.15 | 3.04 | 2.92 | 2.82 |
| Belt permeance | 1.3 | 1.3 | 1.28 | 1.26 | 1.24 |
| X1 [Ω] | 0.16 | 0.157 | 0.155 | 0.154 | 0.15 |
| X2 [Ω] | 0.2 | 0.14 | 0.12 | 0.11 | 0.1 |
| XM [Ω] | 5.24 | 5.2 | 5.14 | 5.06 | 4.97 |
| 출 력 [kW] | 1199 | 1206 | 1199 | 1202 | 1204 |
| 전 류 [A] | 580 | 573 | 564 | 568 | 569 |
| 역 률 [%] | 88.2 | 89.7 | 90.1 | 90.2 | 90.3 |
| Carter 계수 | 1.36 | 1.37 | 1.39 | 1.41 | 1.44 |

## 3. 결 론

유도전동기 특성에 가장 민감한 부분중의 하나인 회전자 슬롯을 변화하여 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 회전자 slot-tip부분과 slot-mouse부분은 최대한 작게 설정하면 2차측 reactance를 감소시킬 수 있어 전동기의 역률을 향상시킬 수 있다.
- 회전자 slot-opening부분을 크게 하면 역률은 향상되지만 4[mm]이상은 Carter계수가 증가하

여 전동기 철손증가의 원인이 되므로 본 논문의 전동기의 경우 slot-opening 은 약 3[mm]가 가정 적당한 것으로 판단된다.

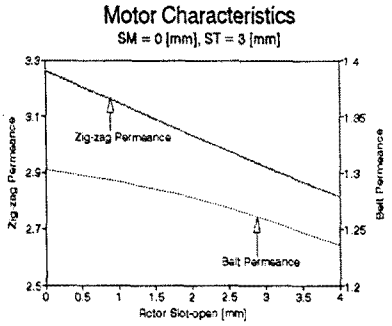


그림 8. Zig-zag, belt permeance변화

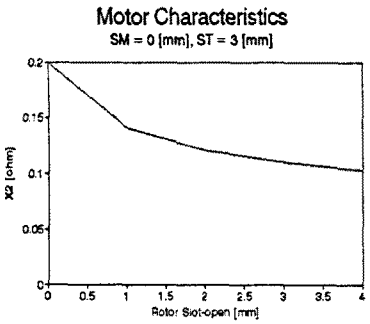


그림 9. 2차측 reactance 특성

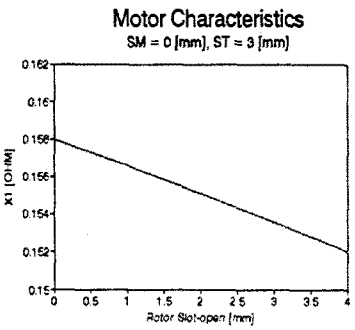


그림 10. 1차측 reactance 특성

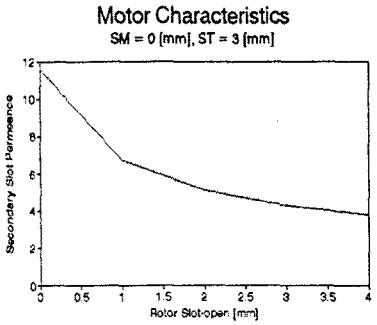


그림 11. 2차측 slot-permeance특성

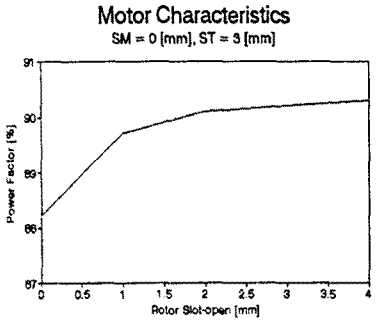


그림 12. 역률 특성

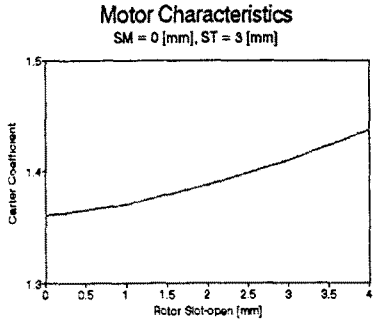


그림 13. Carter-coefficient

## 참고문헌


1. P. L. Alger, "The Nature of Induction Machines", Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., New York, 1965.

2.J.H.Kuhlmann,"Design of ElectricalApparatus" .3rd.ed.,John Wiley & Sons, Inc., New York,1950.