

# 3상 유도전동기에서 고 기동TORQUE 특성을 위한 회전자 SLOT 형상에 관한 연구

김 병 하 , 오 정 장·식 , 송 준 호  
금성기전 주식회사 주관연구소

## A Study Of Rotor Slot Shape For The High Starting Torque Performance On Three Phase Induction Motor

Kim Byung Ha , Jeong Jang Sik , Song Jun Ho  
GoldStar Electric Machinery Co., Ltd.

### ABSTRACT

A design method of three phase induction motors that have characteristics of low starting current and high starting torque is proposed. This design method is based on the traditional theory related to the skin effect and the gap saturation effect.

The starting performances and the analysis method are explained in short.

Finally, comparison of example design data on electric hoist motor with standard motor is shown.

### 1. 서론

유도전동기는 구조가 간단하고, 견고하며, 고장이 적을 뿐만 아니라 값이 싼 장점 때문에 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 그러나 기동시에는 정상 운전상태에 비해 높은 전류가 흐르기 때문에 기동 및 정지를 수시로 반복하는 경우나, 부하의 높은 관성 MOMENT로 인하여 기동시간이 길어지는 경우에 있어서 과열이 발생하게 된다.

본 연구는 상기의 관점에서 기동시에는 전류를 제한하면서 높은 TORQUE를 얻을 수 있고, 운전시에는 높은 효율을 유지하도록 하는 회전자 SLOT의 형상에 대한 설계방법을 제시하는데 그 목적이 있다.

### II. 본론

#### 1. 3상 유도전동기의 동가회로와 기동특성

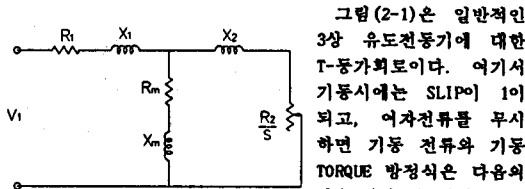


그림 (2-1) 3상 유도전동기의 T동가회로 된다.

$$I_{st} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad \text{--- (2-1)}$$

$$T_{st} = \frac{3 \cdot \text{극수} \cdot R_2 \cdot V_1^2}{9.8 \cdot 4\pi f [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]} \\ = \frac{3 \cdot \text{극수} \cdot R_2 \cdot I_{st}^2}{9.8 \cdot 4\pi f} \quad \text{--- (2-2)}$$

식 (2-1)에서 기동시  $R_2$ 를 증가시키고,  $X_2$ 를 감소하도록 하면서 그 비율이 1st가 일정하게 유지하도록 할 수 있다면 전류는 원하는 수준으로 유지할 수 있게 된다. 이러한 가정하에 식 (2-2)에서 보면 전류는 일정하게 되나  $R_2$  (2차 저항)이 증가 하였으므로 TORQUE는 높아지게 된다. 그러나 정상 운전시에는  $R_2$ 가 크면 2차 손실이 커서 효율이 낮게 되므로, 높은 효율을 얻기 위해서는  $R_2$ 가 작아지도록 하여야 한다.

상기와 같이 기동시와 정상 운전시에 따라 2차 회로상수를 변화시킬 수 있도록 회전자 SLOT 형상을 설계하게 되면 COMPACT한 전동기의 설계가 가능하게 된다.

#### 2. 동가회로 상수의 구성요소

##### 가) 1차 저항 ( $R_1$ )

##### 나) 1차 누설 리액턴스 ( $X_1 = X_{1oa} + X_{1ob} + X_{1c} + X_{1da} + X_{1db}$ )

- 슬롯 누설 리액턴스 (Slot Leakage Reactance:  $X_{1oa}$ )  
-> Slot Opening부 ( $X_{1ob}$ )  
-> Slot Bottom부 ( $X_{1c}$ )
- 코일단 누설 리액턴스 (Coil-End Leakage Reactance:  $X_{1da}$ )
- ZigZag 누설 리액턴스 (ZigZag Leakage Reactance:  $X_{1db}$ )
- Belt 누설 리액턴스 (Belt Leakage Reactance:  $X_{1ob}$ )

##### 다) 상호 (Mutial) 저항 ( $R_1 = R_{111} + R_{112} + R_{121} + R_{122} + R_{1pp}$ )

- 고정자 및 회전자 Teeth부 철손의 동가저항 ( $R_{111}, R_{112}$ )
- 고정자 및 회전자 Yoke부 철손의 동가저항 ( $R_{121}, R_{122}$ )
- Surface-Pulsation 손실의 동가저항 ( $R_{1pp}$ )

##### 라) 상호 (Mutial) 리액턴스 ( $X_1 = X_{111} + X_{112} + X_{121} + X_{122} + X_{1pp}$ )

- 고정자 및 회전자 Teeth부 여자분 ( $X_{111}, X_{112}$ )
- 고정자 및 회전자 Yoke부 여자분 ( $X_{121}, X_{122}$ )
- 공기 (Air-Gap) 여자분 ( $X_{1pp}$ )

##### 마) 2차 저항 ( $R_2 = R_{2a} + R_{2r}$ )

- 회전자 Bar부의 저항 ( $R_{2a}$ )
- 회전자 Ring부의 저항 ( $R_{2r}$ )

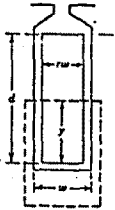
##### 바) 2차 누설 리액턴스 ( $X_2 = X_{2oa} + X_{2ob} + X_{2c} + X_{2da} + X_{2db}$ )

- 슬롯 누설 리액턴스 (Slot Leakage Reactance:  $X_{2oa}$ )  
-> Slot Opening부 ( $X_{2ob}$ )  
-> Slot Bottom부 ( $X_{2c}$ )
- 코일단 누설 리액턴스 (Ring-End Leakage Reactance:  $X_{2da}$ )
- ZigZag 누설 리액턴스 (ZigZag Leakage Reactance:  $X_{2db}$ )
- Belt 누설 리액턴스 (Belt Leakage Reactance:  $X_{2ob}$ )
- Skewed 누설 리액턴스 (Skewed Leakage Reactance:  $X_{2oa}$ )

3. 기동현상과 기동특성 계산

1) 표피 효과(Skin Effect)

2차 저항이 구속시에는 크고, 속도가 증가하면서 감소하는 현상은 'Boucherot'에 의해 처음 발견되었고, 이러한 현상을 'Deep Bar 효과' 또는 '해교 주파수에 따른 저항의 변동'이라 하기도 한다.



그림(3-1) DEEP-BAR 회전자

그림(3-1)과 같이 농형 회전자 Bar가 폭이 좁고 길이가 길다고 하자. 여기서 Bar의 아래부분은 윗부분에 비하여 해교자속이 많게 되고, 이러한 해교자속의 차이에 따라 아래부분에 추가되는 리액턴스는 부분적으로 전류를 제한하게 된다. 따라서 전류는 Bar의 윗부분으로 몰리게 되고, 상대적으로 유도저항을 증가시키게 된다. SKIN EFFECT에

대하여 일반화된 계산하기 위하여 DC성분에 대한 임피던스비(저항의 변화율을  $K_R$ , 리액턴스의 변화율을  $K_X$ )를 이용하는 방식을 많이 사용되고 있다.

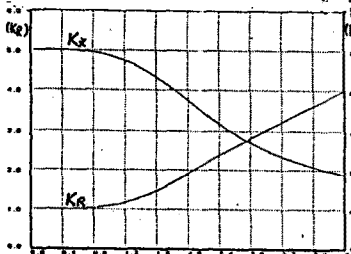
우선 직선 Bar의 형태에서 구해보면 식(3-1), (3-2)와 같이 된다.

$$K_R = \frac{\alpha d (\sinh 2\alpha d + \sin \alpha d)}{(\cosh 2\alpha d - \cos 2\alpha d)} \quad (3-1)$$

$$K_X = \frac{3}{2\alpha d} \frac{(\sinh 2\alpha d - \sin \alpha d)}{(\cosh 2\alpha d - \cos 2\alpha d)} \quad (3-2)$$

단)  $\alpha = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\rho}}$  d : Bar의 길이  
r : Bar의 폭/Slot의 폭

$\rho$  : Bar의 도전율  $\omega = 2\pi f$  (f: 슬립주파수)

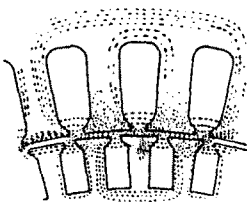


그림(3-2)  $\alpha d$ 에 따른 임피던스의 변화율

의 변화율은 그림(3-2)와 같이 된다.

그러나 실제 응용설계에 사용되는 회전자 Bar의 형태는 경사형태의 심구(Deep Slot)형과 두개의 Bar를 상부 및 하부로 연결한 이중농형(Double-Cage)이 주로 사용되고 있으며, 또한 그에 따른 수식적 해석 방법은 일반화된 수식으로 유도하기가 곤란하게 된다. 따라서 직선 Bar가 가정한 침투깊이를 적용하여 일반화된 계산식을 유도하는 방식과, 다수의 Bar로 나누어진 병렬회로로 가정하여 계산식을 유도하는 방식이 널리 쓰이고 있다.

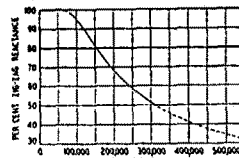
2) GAP 자속 포화 효과(Gap-Saturation Effect)



그림(3-3) 기동시 Gap 자속

그림(3-3)과 같이 기동시에는 2차 전류가 전부하시에 비해 많은 양이 흐르게 되고, 이러한 전류는 유도작용에 의해 Gap에서 ZigZag 누설자속을 증가시키게 된다. 또한 이러한 누설자속의 증가는 고정자 및 회전자 Slot의 Opening부

에 자기포화(Saturation)를 일으키게 되고, 따라서 Slot 누설 리액턴스를 감소시키게 된다. 본 연구의 해석이론은 'HORACE M. NORMAN'의 연구논문을 이용하여 계산 수식을 수립하였다.



그림(3-4) Percent ZigZag 리액턴스 CURVE

우선 임의의 AirGap 자속 밀도값을 BL이라 하면, 이에 따른 Percent ZigZag 리액턴스는 그림(3-4)의 CURVE가 된다.

$K_{BL}$  : Slot Belt 누설계수  
 $K_P$  : 단절계수  
 $K_D$  : 분포계수  
 $E_g$  : 상당 GAP전압  
 $E$  : 상당 무부하전압

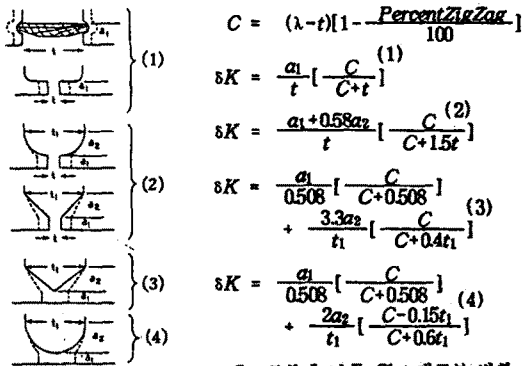
$$\alpha = \frac{\text{Single AirGap}}{1차 Slot 피치 + 2차 Slot 피치}$$

$$\beta = 2.5 \cdot \sqrt{\alpha} + 0.64$$

$$BL = \frac{\text{Ampere} \cdot \text{Turn}}{0.628 \cdot \text{Single AirGap} \cdot \beta}$$

$$\text{AmpereTurn} = \text{도체당 전류} \cdot \sqrt{2} \cdot \text{Slot당 도체수} \cdot \sqrt{(K_{BL} + K_P + K_D) \cdot \frac{S_1}{S_2}} \cdot \sqrt{\frac{E_g}{E}}$$

Slot의 Opening부의 누설감소는 그림(3-5)와 같이 Slot의 Opening부가 커진 것으로 동가해석이 가능하게 된다.



그림(3-5) Slot 동가해설

C : 포화에 따른 Slot 개구부 변화  
 $\lambda$  : AirGap에서의 Slot 피치  
 $\delta K$  : Slot 상부의 변화율

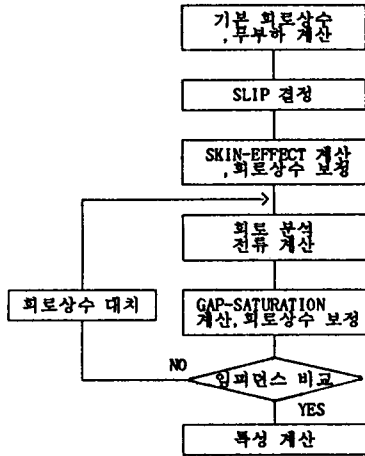
$$\text{Percent Slot 누설변화} = \left(1 - \frac{\delta K}{\text{Normal Slot 상수}}\right) \cdot 10\%$$

3) 기동현상에 따른 회로상수의 변화

항목	표피효과	Gap포화효과
$R_i$		
$X_i$	$X_{i200}$	감소( $K_{i2}$ )
	$X_{i20}$	
	$X_{i10}$	
	$X_{i5}$	감소( $K_{i1}$ )
	$X_{i2}$	
$R_e$		
$X_e$		
$R_e$	$R_{e2}$	증가( $K_e$ )
	$R_{e1}$	증가(무시)
$X_e$	$X_{e200}$	감소( $K_{e2}$ )
	$X_{e20}$	감소( $K_e$ )
	$X_{e10}$	감소(무시)
	$X_{e5}$	감소( $K_{e1}$ )
	$X_{e2}$	감소(무시)

좌측 도표는 표피효과와 Gap 포화효과에 따른 회로상수의 변화에 대한 것으로, 2차 저항은 증가하고, 1차 및 2차 누설 리액턴스는 감소하게 됨을 알 수 있다. 따라서 운전시의 요구 특성을 유지하면서, 기동현상을 이용하여 회전자 형상을 설계하면 식(2-1)과 식(2-2)에서 검토한 바와 같이 기동전류를 제한하면서, 높은 기동TORQUE를 낼 수 있는 유도전동기 설계가 가능하게 된다.

4) 기동특성을 고려한 유도전동기 특성해석 FLOW



4. 전동 HOIST에서의 고 기동TORQUE 설계 적용에

1) 전동 HOIST의 운전조건과 전동기 요구특성

HOIST의 운전모드는 일반적으로 부하시간율이 25~40%(시동횟수:250~400회/시간)로 사용되고 있다. 따라서 기동 및 정지의 횟수가 많고, 연속 운전시간이 짧은 특징을 갖고 있으며, 또한 전동기 측면에서는 운전시보다 기동시의 발열에 대처하여 설계가 이루어져야 한다.

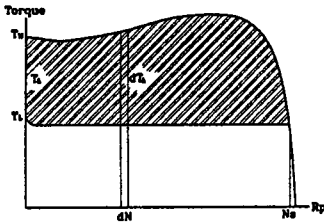


그림 (4-1) Speed-Torque Curve

기동시 발열을 최소화 하기 위해서는 기동전류를 줄임으로써 발열이 최소화 되도록 하는 방법과 기동시간을 최소화 하여 발열되는 시간을 줄이는 방법이 있다. 그림 (4-1)에서 전동기와 부하의 TORQUE를 각각  $T_n$ 과  $T_r$ 이라 하고, 가속 TORQUE를  $T_a$ 라 하면  $T_r = T_n = T_a$ 인 가속 TORQUE 로 기동하여  $T_n = T_r$ 이 되는 점까지 속도가 증가하게 되고, 이때까지 소요되는 시간을 기동시간이라 하며, 식 (4-1)에 의해 구할 수 있다.

$$\Delta Time = \frac{GD^2}{4} \frac{2\pi}{60} \frac{1}{9.8} \frac{\Delta N}{\Delta T}$$

$$Time = \frac{GD^2}{375} \int_0^{N_r} \frac{dN}{dT} \quad \text{--- (4-1)}$$

(단)  $GD^2$ : 전동기와 부하의 전체 관성 MOMENT

식 (4-1)에서 보면 가속 TORQUE( $T_a$ )가 클수록,  $GD^2$ 가 작을수록 기동시간이 짧아지게 된다. 따라서 HOIST용 전동기 측면에서는 기동 및 최대 TORQUE를 최대한 높게 되도록 설계하는 것이 바람직하게 된다. 또한 전동기에서의 발열은 손실에 비례하고, 또한 손실은 전류의 제곱에 비례하게 되므로 기동시 전류를 최소화 설계하는 것이 바람직하게 된다. 일반적으로 HOIST 전동기의 경우 기동시간은 3~5초 이내 및 기동전류는 전부하 전류 대비 5.5~6.5배 수준을 유지하고 있다.

2) 5분 HOIST의 경우에서의 설계응용 사례 (전동기규격:7.5KW 4POLE 60Hz 220V)

가) 기동 및 운전시의 회로상수 변화

운전 항목	회로상수					
	$R_s$	$X_s$	$R_m$	$X_m$	$R_2$	$X_2$
정상 운전시	0.029	0.049	0.032	1.948	0.059	0.065
기동시(무보정)	0.029	0.049	0.039	1.948	0.059	0.054
기동시(보정)	0.029	0.046	0.039	1.948	0.065	0.045

# 상기 회로상수는 단위법에 의한 값임.  
# 회로상수는 열시 기준임.

나) 기동 및 운전 특성의 비교

구분 특성	운전 특성					기동 특성		비고
	$I_{rn}$	EFF.	P.F	SLIP	$T_{rn}$	$T_{sr}$	$I_{sr}$	
HOIST용	25.7	85.0	90.1	7.47	4.39	12.6(287%)	147(572%)	무보정
						14.2(324%)	148(578%)	보정
표전형	26.6	87.5	84.8	2.59	4.17	11.5(276%)	185(696%)	보정

# 특성치는 열시 기준임.

III. 결론

본 논문에서는 3상 유도 전동기에서 기동시 발생하는 현상에 대하여 이론적 해석 방법과 이러한 현상을 이용하여 기동 전류를 제한하면서, 높은 기동 TORQUE를 갖는 전동기를 설계하기 위한 방법을 제시하여 보았다. 또한 HOIST용 전동기를 대상으로하여 실제 설계 적용 사례를 보였다. 그러나 지면 관계상 회전자 Slot 형상에 따른 상세한 해석이론과, 이를 이용한 특성해석 Program 및 설계과정은 생략한 바, 좀더 상세한 자료를 필요로 하는 경우를 대비하여 참고문헌에 이를 기술하였다.

앞으로의 연구과제는 좀더 정확한 자속 분포와 전류 분포를 계산하기 위하여 유한 요소법을 이용하여 해석하는 기술 및 Program 개발에 대한 연구가 필요하다.

IV. 참고 문헌

1. THE NATURE OF INDUCTION MACHINES  
- " Philip L. Alger " , GORDON AND BREACH SCIENCE PUBLISHERS LTD. (1955)
2. POLYPHASE INDUCTION MOTORS (Analysis, Design, and Application)  
- " Paul L. Cochran " , Marcel Dekker, INC. (1989)
3. DOUBLE AND TRIPLE SQUIRREL-CAGE FOR POLYPHASE INDUCTION MOTOR  
- " Philip L. Alger " , AIEE (1952)
4. PERFORMANCE CALCULATION OF DOUBLE-CAGE INDUCTION MOTORS  
- " S. L. Chang , C. H. Crouse " , AIEE (1952)
5. SKIN EFFECT BARS OF SQUIRREL-CAGE ROTOR  
- " M. Liwshitz Garik " , AIEE (1954)
6. COMPUTATION OF SKIN EFFECT IN BARS OF SQUIRREL-CAGE ROTOR  
- " M. Liwshitz Garik " , AIEE (1955)
7. INDUCTION MOTOR LOCKED SATURATION CURVE  
- " Horace M. Norman " , AIEE (1934)
8. SATURATION EFFECT ON LEAKAGE REACTANCE  
- " Sheldon L. Chang , I. C. Lloyd " , AIEE (1949)
9. EFFECT OF SATURATION ON AIRGAP FLUX DISTRIBUTION  
- " N. F. Tsange " , AIEE (1955)