

### 3상 유도 전동기의 기동 특성 향상을 위한 Part winding 해석 및 설계

김광수, 김기찬, 이성구, 이주  
한양대학교 전기공학과

#### Analysis and design of part winding to improve start-up characteristics

K.S.Kim, K.C.Kim, S.G.Lee, J.Lee  
HANYANG UNIVERSITY

**Abstract** - This paper covers start-up characteristic of three phase induction motor. When three phase induction motor is started, the inrush current occurs. There are several ways of reducing starting current of a three phase motor. In this paper will explain and propose the types of part windings in order to reduce the starting current.

#### 1. 서 론

3상유도 전동기에 직접 전원전압(정격 전압)을 인가하면 기동 시 전류는 전부하 전류의 약 550-700%의 전류가 흐르고, 기동 토크는 약 60-150%정도 발생한다. 유도 전동기는 1차 측에 직접 정격 전압을 공급하면 큰 기동 전류가 흘러 권선을 소손할 우려가 있을 뿐 아니라, 전체 시스템에도 영향을 주게 된다. 이와 같은 큰 기동 전류는 전동기의 권선을 과열시키고, 전동기가 구동하는 부하에 큰 기계적 충격을 준다. 따라서 적당한 시동방식을 선택하여 기동특성을 개량할 필요가 있다.

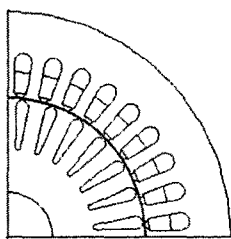
기동 전류를 줄이기 위해, 저항, 변압기, 전력소자 시스템을 사용할 수 있다. 이들 소자들의 사용은 전반적인 가격의 상승을 초래한다. 그래서 단순하고 경제적인 이유에서 wye-delta 결선이 많이 사용된다. 하지만 이는 wye에서 delta로 전환하는 시간동안 전원 공급이 차단되는 현상을 초래한다. 그래서 delta에 전원이 다시 공급되기 전까지 회전자의 속도가 감소하는 등의 기동특성이 좋지 않게 나타난다.

그 대안으로, 본 논문에서는 기동 방식 중 가격이 싸고, 전원이 차단되지 않고 기동되는 part winding의 특성과 part winding의 형태에 따른 기동 특성에 대해 살펴본다.

#### 2. Part winding model

##### 2.1 해석 모델

본 논문에 사용된 모델은 3상 농형 유도전동기로 고정자 36슬롯, 회전자 28슬롯을 가진 저전압/대전류 전동기이다. 이에 대한 모델의 1/4단면도와 구체적인 사양은 그림 1에 보여주고 있다.



a. 1/4 단면도

항목	제원	
고정자	슬롯수	36개
	외경	170 mm
	상당 권선수	36 turn
회전자	결선	LAP
	극 수	4 pole
정격	외경	104.2 mm
	정격 출력	6.7kW
	입력 전압	28 V
	정격 속도	2332 rpm
	정격 토크	27 Nm

b. 해석모델 사양

<그림 1> 해석 모델과 사양

##### 2.2 Part winding의 특징

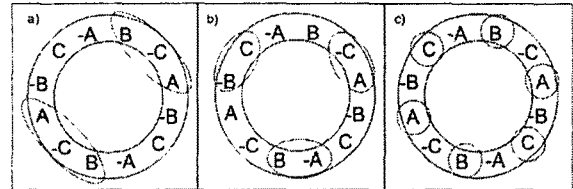
Part winding 전동기는 병렬로 동작하게 동일한 두 권선을 가진 특수 농형전동기이다. 이 전동기의 권선은 외부에서 병렬로 연결한다.

Part winding의 특징

- 기동전류가 정상의 60-75%정도
- 기동전류가 매우 낮음(정상의 50%)
- 권선에서의 발열이 심함

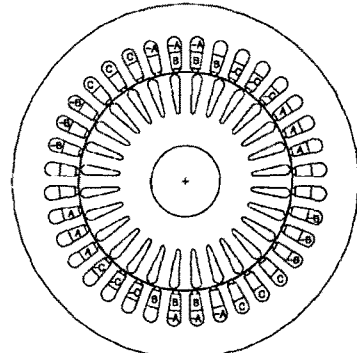
Part winding의 두 가지 장점으로는 첫째, 구형 시에 가격 싸고, 둘째, 전동기가 성공적으로 기동된 후 운전 권선으로 전환된 후에도 wye-delta 결선과는 달리 전원이 차단되지 않는다는 것이다. 그러나 고정자의 한 부분의 권선만을 사용하여 기동하기 때문에 진동이 심하고, 기동토크를 감소시키는 큰 구조파가 공극 자속에 발생시키는 문제점을 가지고 있다.

Part winding 권선을 감는 여러 방법이 있다. 두 권선으로 나누는 방법에 따라 기동특성이 다르게 나타난다. 4극 36슬롯을 가진 모터에 대한 권선은 일반적으로 그림과 같이 동일한 두 1/2권선으로 나눌 수 있다.



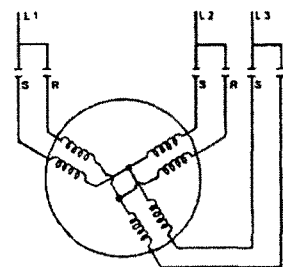
<그림 2> 4극에 대한 1/2 권선

그림 2는 3상 4극 12그룹을 가진 기기에서의 1/2 권선을 나타낸 그림이다. 일반적으로 a, b, c의 방법이 일반적으로 권선을 나누는 방법이다. 그 영역을 표시된 부분이 1차 권선이고, 나머지 부분이 2차 권선이다.



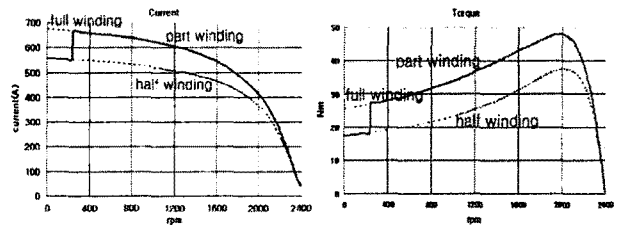
<그림 3> a의 1/2 권선

그림 3은 코일 피치가 7인 전동기에서 a의 1/2권선을 나타낸 그림으로, 나머지 b, c도 같은 방법으로 권선을 감을 수 있다. Part winding의 고정자 결선은 delta-delta 결선이나 wye-wye결선을 사용한다. 본 논문에서는 그림 4와 같은 wye-wye 결선을 사용하였다.



<그림 4> Part winding connection

##### 2.3 Part winding 동작특성 분석



<그림 5> 속도-전류/토크 곡선

그림 5는 등가 회로 분석을 통하여 병렬 wye 결선으로 연결된 part winding의 일반적 동작특성을 나타낸 그래프이다. 그림 5에서 실선이 part

winding의 동작 곡선이다. 기동전류가 일반 병렬회로보다 680A에서 560A로 약 110A정도 감소되어 기동된다. 그리고 240 rpm정도에서 2차 권선을 연결하면서, 전류가 증가하여 일반 권선의 전류감소 곡선을 따라 감소하고 있다. 그림 5의 속도-토크곡선에서는 일반 병렬회로의 25Nm에서 part winding 기동 시 17Nm로 감소하고 있다. 전류 곡선과 같이 2차권선 연결 후에는 일반 병렬회로의 곡선을 따라 변화한다.

다음은 기동전류와 기동토크에 관한 식을 나타낸 것이다.

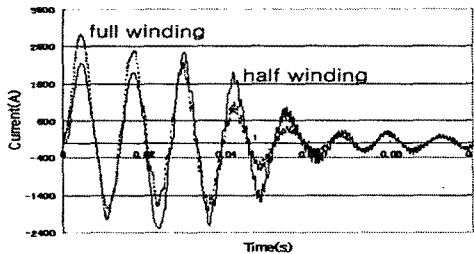
$$I_{1s} = \frac{V_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (1)$$

$$T_{st} = \frac{3I_{1s}^2 r_2'}{9.8 \frac{4\pi f}{P}} \quad (2)$$

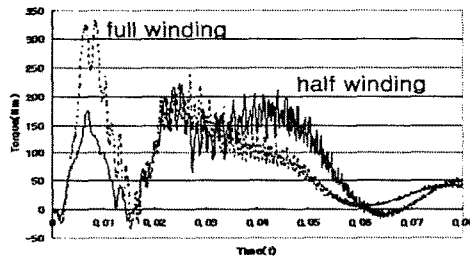
기동 전류는 식(1)에서 보듯이, 임피던스에 의해서 결정된다. 그림 5에서 보는 것처럼 하나의 권선으로 기동하게 되면서 저항이 병렬회로에서의 저항보다 두 배 커져, 기동전류가 감소하고, 2차 권선이 연결되면 저항이 다시 작아져 전류가 그림과 같이 증가하는 그림을 보여준다. 그림 5의 기동토크도 식(2)와 같이 기동 전류의 감소와 증가에 따라 그림과 같이 변화를 보여준다.

### 2.4 Part Winding의 과도상태 분석

유한요소해석을 이용하여 기동 시에 나타나는 각 part winding의 기동전류와 토크에 관한 과도상태를 분석하였다. 스위칭 시간은 0.02 초로 짧은 시간 내에서의 특성을 분석하였다.

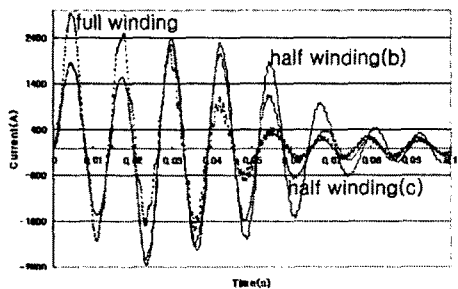


<그림 6> 기동 시 입력 전류(a)

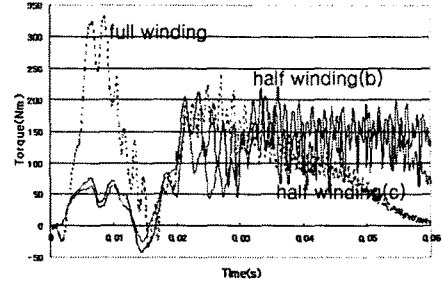


<그림 7> 기동 시 토크(a)

그림 6과 그림 7은 그림 2에서의 a의 1/2 권선의 기동 특성을 분석한 그래프이다. 그림 6의 경우 점선으로 된 일반 병렬회로의 경우보다 실선의 part winding이 약 일반 권선의 70% 정도의 작은 기동 전류를 가진다. 그리고 0.02초 후 2차 권선을 연결하게 되면, 병렬로 연결되어 있기 때문에 전체 임피던스가 작아져 전류가 증가한다. 그림 5에서와 같이 연결 후 일반 권선의 전류 감소추이에 따라 감소하는 현상을 보인다. 그림 7의 기동 토크는 초기 기동 시에 일반 병렬회로의 56%정도이고, 0.02초 후 나머지 권선을 연결한 후, 기동전류가 증가함에 따라, 토크도 증가하는 현상을 보여준다. 그리고 일반 병렬권선과 같이 추이로 감소한다.



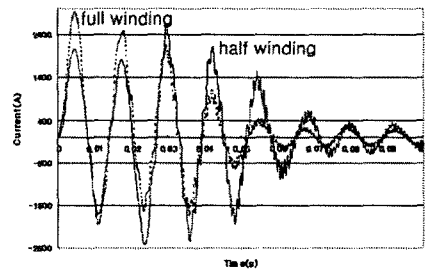
<그림 8> 기동 시 입력 전류(b, c)



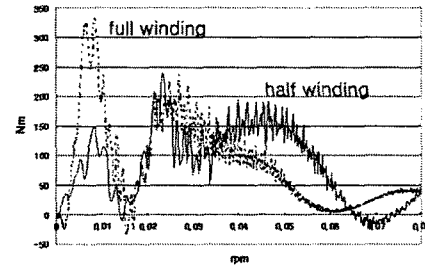
<그림 9> 기동 시 토크(b, c)

그림 8, 그림 9은 그림 2에서의 b와 c의 전류와 토크를 나타낸 그래프이다. 같은 1/2 권선의 경우에서도 형태에 따라 기동전류와 기동 토크가 다르게 나타난다. 권선의 형태에 의해 저항은 같지만, 극의 분포차이에 의한 누설 임피던스의 차에 의해 a의 경우 전류와 토크가 조금 감소하는 반면, b와 c는 전류와 토크가 크게 감소하고 있다.

이 외에도 2층권 구조를 다시 나누어 각 2층권, 즉 4층권의 구조로 만들어 part winding을 이루는 형태도 있다.



<그림 10> 4층권 구조를 가진 part winding의 입력 전류



<그림 11> 4층권 구조를 가진 part winding 기동 시 토크

<표 1> 1/2 권선에 따른 기동특성

	Full winding	a	4 layer	b	c
기동전류(A)	1678.71	1322.74	1285.26	1174.58	1147.89
기동토크(Nm)	105.55	61.83	47.71	21.45	25.17

### 3. 결 론

본 논문에서는 등가회로해석을 통해 일반적인 part winding의 동작특성에 대해 살펴보고, 유한요소해석을 통해 기동 시에 part winding의 기동특성에 대해 분석하였다. 권선을 나누는 방법에 따라 기동 전류와 기동 토크의 감소율이 다르게 나타났다. 기동전류를 감소시키는 만큼의 기동토크도 감소하게 되어, 전동기의 사용 특성에 따라 기동전류와 기동토크에 맞는 part winding의 형태 고려해야한다. 또, 2차 권선의 스위치를 닫는 지점에서, 기동전류가 충분히 감소하지 못한 상태에서 전류가 상승하는 현상을 나타내고 있다. 이는 권선의 순시 정격과 기동 전류를 고려해 스위치 시간에 대한 고찰이 필요하다. Part winding 기동 시 리플이 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 리플을 감소시킬 수 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 논문은 산자부에서 시행한 부품 소재 기술 사업으로 지게차 AC 제어 장치 및 구동 전동기 개발 사업으로 수행되었음

#### [참고 문헌]

- [1] Stermecki, A.; Ticar, I.; Zagradsnik, I.; Kitak, P, "FEM-Based Design of an Induction Motor's Part Winding to Reduce the Starting Current", IEEE Transactions, Volume 42, Issue 4, April 2006
- [2] Rajaraman, K.C., "Theory and design of part-winding starting", IEEE Transactions, Volume 14, Page(s):31 - 36, March 1999