

**crawling 현상 저감을 위한 단상 유도전동기의 skew를 이용한 토크 특성 분석**

임상현\*, 이하정\*, 감병국\*\*, 박관수\*  
 부산대학교\*, LG 전자\*\*

**Analysis of Torque Characteristics using Skew in Single Phase Induction Motor to Reduce Torque Crawling**

Sang-Hyeon Im\*, Ha-Jeong Lee\*, Byung-Kuk Kam\*\*, Gwan-Soo Park\*  
 Pusan National University\*, LG Electronics\*\*

**Abstract** - 최근 산업계에서 널리 사용되고 있는 유도전동기, 특히 단상 유도전동기는 고주파에 의한 영향으로 인하여 crawling 현상이 발생하기도 한다. 이러한 고주파에 의한 영향을 저감시키기 위하여 주로 skew를 적용시키고 있다. 본 논문에서는 crawling 현상 저감을 위하여 skew 값에 따른 각 차속별 고주파를 분석하고 양호한 토크 특성을 발생시키도록 연구되었다. 또한 2D 해석 및 샘플 제작을 통한 실험을 통하여 실제 모델에서의 skew에 의한 crawling 현상 저감을 확인하였다.

**1. 서 론**

유도 전동기는 산업 전반에 널리 사용되고 있으며, 크기 및 마력, 사용전원에 따라 다양한 Spec으로 필요한 특성에 맞도록 설계하여 사용하고 있다. 특히 단상 유도전동기는 가정용으로 많이 사용하고 있으며, 펌프, 팬, 컴프레서, 믹서기, 세탁기, 냉장고 등 그 사용용도는 아주 다양하다[1]. 단상 유도전동기의 토크 특성은 rpm에 따라 변화하며 rpm이 상승하면 토크는 증가하고, 일정수준까지 도달한 이후 입력 전원 주파수와 동기속도가 되면 토크는 0이 되는 특성이 있다.

특히 가정용 에어컨에 사용되는 압축기용 전동기는 영구콘덴서를 사용하여 기동 토크는 충분히 확보할 수 있으나, 기동 이후 Crawling 운전이 되지 않도록 설계 시 상당한 주의를 요한다.

단상유도전동기에서는 전동기 종류에 따라 다른 특성을 나타낸다. 주 권선 만을 가지는 단상 전동기는 기본파와 모든 고조파가 맥동하기 때문에, 0rpm을 기준으로 토크는 반대 특성을 나타내며, 3차 고조파 토크는 정역방향 모두 토크 Crawling 현상에 영향을 준다.

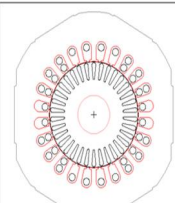
단상 전동기의 고조파를 감소시키기 위해 Skew를 사용하기도 하는데, Skew 유무에 따른 속도 특성은 일반적으로 Skew 적용 모델의 가속 성능이 조금 더 선형적이며, 전반적으로 토크 맥동이 저감된다. 회전자 도체 유도 전류는 Skew 적용 모델의 전류 분포가 Skew 비적용 모델보다 정현적인 분포를 나타내며, 이는 Skew를 적용하였을 때, 공극 자속 밀도의 분포가 조금 더 정현적임을 의미한다[2]-[3].

본 논문에서는 단상전동기의 Crawling 운전에 영향을 주는 고조파 감소, 양호한 토크 특성을 가지기 위해 FEM 2D 해석 방법인 Slice skew 방법을 사용하여 Skew값에 따른 토크 특성과 공극 자속 밀도의 고조파를 분석하였다[4]. 또한 실제 샘플을 제작하여 실험을 통한 결과 역시 확인하였다.

**2. 본 론**

**2.1 해석 모델 및 결과**

본 논문에서 다루어지는 해석 모델은 정격 2,600W 급 영구 커페시터용 단상유도전동기로 고정자 외경  $\Phi 139$ , 회전자 외경  $\Phi 71$ , 적층 105mm를 가지는 모델로 선정하였고, 주요 제원은 그림 2.1과 같다.

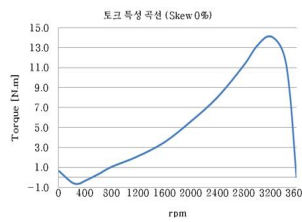
|   |              |                    |
|---|--------------|--------------------|
|  | Stator OD/ID | $\Phi 139/\Phi 72$ |
|   | Rotor OD/ID  | $\Phi 71/\Phi 26$  |
|   | 적층           | 105mm              |
|   | 전원/주파수       | 220V/60Hz          |
|   | Cr           | 45 $\mu$           |

**<그림 1> 해석모델**

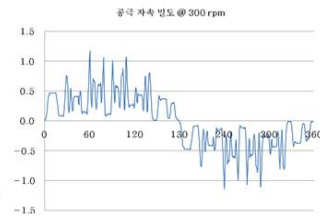
**2.1.1 토크 특성 곡선 분석 : Skew 0%**

그림 2.2는 Skew가 0%인 경우의 토크 특성을 나타내는 곡선이다. 특

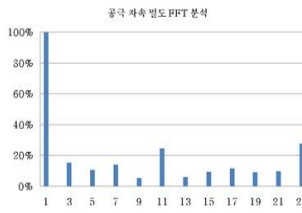
성곡선에서 알 수 있듯이 동기속도에서 최대 토크 지점을 지나 300rpm 부근에서 crawling 현상이 발생되었다. 문제점을 분석하기 위해 먼저, 전동기 공극 기저력을 예측하기 위해 그림 2.3과 같이 공극 자속밀도를 확인하였다. 또한 그림 2.4와 같이 공극자속밀도의 고조파 성분을 분석하고 그 중 영향이 큰 11차 고조파에 대한 토크를 그림 2.5와 같이 분석하여 토크 특성 곡선으로 나타내었다.



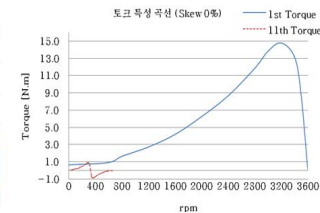
**<그림 2.2> 토크 특성**



**<그림 2.3> 공극 자속 밀도**



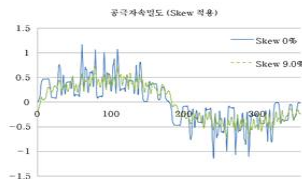
**<그림 2.4> 공극자속밀도 FFT 분석**



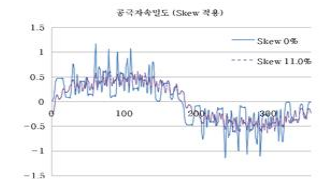
**<그림 2.5> 1,11차 고조파 토크 특성**

**2.1.2 토크 특성 곡선 분석 : Skew 적용**

FEM 2D 해석의 slice skew 방법을 통하여 본 모델에 대하여 해석을 진행하였고, 그림 2.6(a)와 (b)에서는 Skew 9%, 11% 일 때의 공극 자속 밀도를 나타내었다. 그림 2.7과 <표 1>은 Skew 수준에 따른 공극 자속 밀도의 고조파 성분 분석 결과로써 이를 통하여 Skew 값이 커질수록 공극 자속 밀도의 절대값은 감소되는 것을 알 수 있으나, Skew 15%에서는 23차수의 고조파 성분이 증가되는 것을 알 수 있었다.



**(a) Skew 9.0%**



**(b) Skew 11.0%**

**<그림 2.6> 공극 자속 밀도**

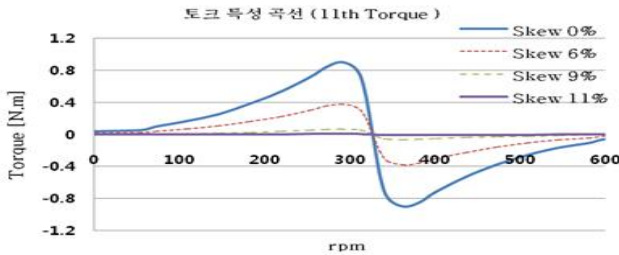


**<그림 2.7> Skew 적용 시 공극 자속 밀도 FFT 분석**

〈표 1〉 Skew 값에 따른 공간 고조파 성분

| 차수     | 1       | 3      | 5      | 7      | 9     | 11     | 23     |
|--------|---------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 0%     | 100.00% | 15.20% | 10.60% | 13.90% | 5.50% | 24.70% | 27.80% |
| 6.00%  | 99.70%  | 14.90% | 9.80%  | 12.00% | 4.20% | 16.60% | 1.10%  |
| 9.00%  | 99.20%  | 14.20% | 8.70%  | 9.20%  | 2.50% | 6.70%  | 8.30%  |
| 11.00% | 99.00%  | 13.90% | 8.00%  | 7.70%  | 1.70% | 2.30%  | 2.20%  |
| 15.00% | 98.10%  | 12.80% | 6.10%  | 3.70%  | 0.20% | 6.10%  | 22.40% |

이러한 각 고조파의 절대값을 이용하여 고조파 기생 토크를 그림 2.8과 같이 구할 수 있고, Skew 9.0% 이상일 경우 토크 값은 max 0.07Nm 수준으로 전동기 전체 토크 특성에 주는 영향이 감소될 것으로 예상할 수 있다.



〈그림 2.8〉 Skew 적용 시 11차 고조파 토크 특성 곡선

2.2 실험 결과 및 분석

전동기 제원과 해석결과를 바탕으로, Skew 6%, 9%, 11% 3개의 샘플을 그림 2.9와 같이 제작하여 토크 특성을 확인하였다. 특성은 161V 감전압 시험방법(연두색 곡선)으로 평가하여 얻은 결과이며, 파란색 곡선은 전류, 갈색은 입력, 회색은 출력, 붉은색은 토크, 초록색은 전동기의 효율을 나타낸다.



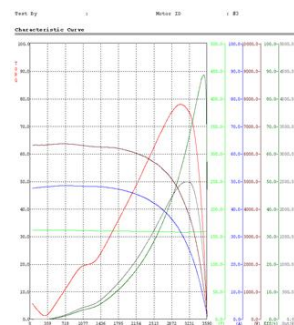
〈그림 2.9〉 실험용 샘플

| rpm | 6%   | 9%   | 11%  |
|-----|------|------|------|
| 500 | 0.42 | 1.17 | 1.22 |
| 400 | 0.13 | 1.05 | 1.09 |
| 300 | 0    | 0.93 | 0.99 |
| 200 | 0.16 | 0.84 | 0.87 |
| 100 | 0.44 | 0.76 | 0.74 |
| 50  | 0.63 | 0.72 | 0.66 |

〈표 2〉 Skew 따른 토크 측정값

2.2.1 Skew 6% 적용 모델 결과

Skew 6%인 경우 토크 특성은 300rpm 부근에서 토크 crawling 현상이 발생된 것을 확인할 수 있으며, 이는 11차 고조파 성분이 작용한 것으로 볼 수 있다. 그림 2.10과 〈표 3〉는 각각 측정된 토크 특성 곡선과 토크 측정값이다..



〈그림 2.10〉 Skew 6% 토크 특성

| rpm | Torque |
|-----|--------|
| 500 | 0.42   |
| 400 | 0.13   |
| 300 | 0      |
| 200 | 0.16   |
| 100 | 0.44   |
| 50  | 0.63   |

〈표 3〉 Skew 6% 토크 측정값

2.2.2 Skew 9% 적용 모델 결과

Skew 9%인 경우 고조파가 24.7%에서 6.7%까지 저감되었고, 그 결과로 인하여 300rpm 부근의 토크 crawling 현상이 제거된 것을 확인할 수 있다. 그림 2.11과 〈표 4〉는 각각 측정된 토크 특성 곡선과 토크 측정값이다..



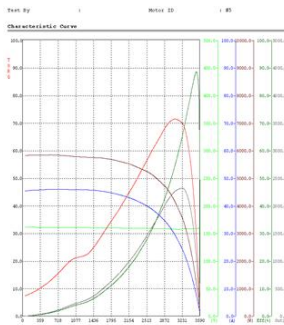
〈그림 2.11〉 Skew 9% 토크 특성

| rpm | Torque |
|-----|--------|
| 500 | 1.17   |
| 400 | 1.05   |
| 300 | 0.93   |
| 200 | 0.84   |
| 100 | 0.76   |
| 50  | 0.72   |

〈표 4〉 Skew 6% 토크 측정값

2.2.3 Skew 11% 적용 모델 결과

Skew 11%인 경우도 Skew 9%인 경우와 마찬가지로 crawling 현상은 발생되지 않으며, 유사한 특성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 그림 2.12과 〈표 5〉는 각각 측정된 토크 특성 곡선과 토크 측정값이다..



〈그림 2.12〉 Skew 11% 토크 특성

| rpm | Torque |
|-----|--------|
| 500 | 1.17   |
| 400 | 1.05   |
| 300 | 0.93   |
| 200 | 0.84   |
| 100 | 0.76   |
| 50  | 0.72   |

〈표 5〉 Skew 11% 토크 측정값

3. 결 론

본 논문에서는 단상유도전동기의 300rpm 부근에서 토크 crawling 현상이 발생된다는 것을 파악하고, 그 개선점을 도출하기 위하여 skew를 적용시켜 각각의 고조파에 대한 영향을 분석하였다.

skew를 적용할 경우에는 회전자 1개 Slot bar에 고정자 자속이 위상차를 가지며 분포되기 때문에 고조파 자속에 의한 유기전압이 상쇄되어, 고조파 자속에 의한 기생토크는 감소될 것을 예상하였고, 이를 토대로 대상 모델의 해석을 통하여 skew 값에 따른 공기 자속 밀도 및 고조파를 분석하여 고조파 기생토크의 저감을 확인할 수 있었다. 또한 샘플을 제작하고 토크 특성 곡선을 측정하여, 실제로 crawling 현상이 제거되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 몇 가지의 skew 값에 따른 각 차수별 고조파의 변화를 토대로 진행되었기 때문에 최적의 저감 방법이라고 할 수는 없다. 따라서 앞으로 각 모델에 따른 최적의 skew 값을 이론적 및 실험적으로 찾을 수 있는 연구가 필요할 것이다.

[감사의 글]

이 논문은 한국전력공사의 제원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : R14XA02-20)

[참 고 문 헌]

[1] P.C. Sen, "PRINCIPLES OF ELECTRIC MACHINES AND POWER ELECTRONICS", 1997  
 [2] 이원용, 김병택, "Skew slot을 가지는 단상 유도 전동기의 3차원 시간차분 유한요소 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 674-675, 2010  
 [3] Renyan W. Fei, Jerry D. Lloyd, Mark D. Dierkes, "An Experimental Study of Single-phase Induction Motor Starting Performance and Its Dependency on 'Winding Harmonics ", IEEE, 1995  
 [4] 장정환, "사구(斜溝)슬롯이 있는 콘텐서 구동형 단상 유도 전동기의 Radial Force Density 해석", 한양대학교 공학석사논문, 1996