

3.7kW 유도전동기 대체용 유도기동형 동기 릴럭턴스전동기의 특성해석 및 설계

오영진, 유성래, 이인우  
(주)효성 중공업 연구소

Characteristic Analysis & Design of Line-start Synchronous Reluctance Motor to substitute for Induction Motor

Oh Young Jin, Ryu Sung Lae, Lee In Woo  
R&D Center, Power & Industrial Performance Group, Hyosung Co.

**Abstract** - This study investigates Characteristic analysis of Line-start Synchronous Reluctance Motor to substitute for Induction Motor.

The results of machine characteristics are analyzed by simulation using Flux2D. Characteristic analysis result of Line-start Synchronous Reluctance Motor is confirmed by the Experimental result.

1. 서 론

산업용 전동기 분야에서 3상 유도전동기(3-Phase Induction Motor)는 경제적이고, 상용전원을 이용하여 구동이 가능하며, 기동특성이 우수하여 산업용 기기의 구동원으로 보편화되어 있다.

하지만 산업 기기 분야의 발달과 양적 팽창으로 환경 문제가 국내외적으로 대두됨에 따라 효율 측면의 규제가 강화되고 있고, 유도전동기는 슬립에 의해 발생하는 회전자 도체바의 전류로 인하여 손실이 발생하는 단점으로 인해 고 효율화에 많은 어려움이 있다.

3상 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기(3-Phase Line-Start Synchronous Reluctance Motor)는 3상 유도전동기의 회전자에 Flux barrier가 존재하는 구조로서, 정상상태에서 d-축과 q-축의 인덕턴스(또는 자기저항) 차에 의한 릴럭턴스 토크(Reluctance torque)를 이용하여 운전한다. 기동 시에는 도체바에 의한 유도 기동을 하므로 별도의 구동회로가 불필요하고, 정상 운전 시에는 동기 특성을 이용하므로 슬립에 의한 유도 현상이 없어 2차측 동손을 줄여 고효율이 가능하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 3상 유도전동기 대체용 3상 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기를 대상으로 설계 변수 변경에 따른 특성해석 및 구조해석을 수행하였고, 그 결과를 시험·평가 결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기 구조

유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기는 회전자에 Flux barrier가 있으며, 유도 기동토크를 얻기 위해 농형의 도체바가 삽입되어 있다. 또한 Flux barrier 끝단에는 자속의 누설을 방지하기 위한 회전자 림(Rib)이 존재한다. 고정자 권선은 일반적인 유도기와 동일한 권선을 사용한다. 그림 1은 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기의 구조 및 각 부분의 명칭을 나타낸 것이다.

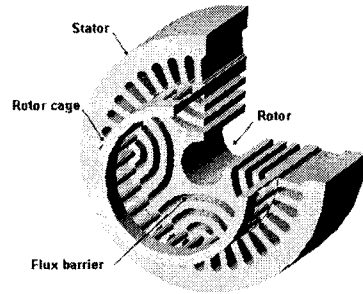


그림 1 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기 구조

2.2 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기 설계

2.2.1 설계 변수에 따른 특성해석

유도기 대체용으로서의 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기는 유도전동기와 동일한 사양의 고정자를 사용하므로 설계 변수에서 제외된다. 회전자의 경우 Flux barrier 개수, Kw, 도체바 직경 등의 다양한 설계 변수를 가지므로 회전자 관련 설계변수의 변경에 따른 특성해석이 이루어져야 한다. 설계 순서는 먼저 회전자 Rib 폭과 회전자 도체바 직경을 각각 0.3[mm], 5.8[mm]로 놓고 Kw에 따른 특성해석을 수행한 후, 회전자 도체바 직경과 회전자 Rib 폭의 변화에 따른 특성해석을 수행하였다. 그림 2는 회전자 관련 설계 변수를 나타낸 것이다.

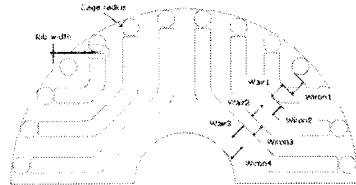


그림 2 회전자 설계변수 정의

1) Flux barrier 개수에 따른 특성해석  
본 논문에서는 Flux barrier 개수에 따른 특성해석을 제외하였다. 유도기동형의 경우 기존의 유도전동기의 도체바 개수를 유지하면서 설계가 이루어지므로 그림 2와 같이 Flux barrier 개수는 1극 당 3개로 고정하여 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계를 수행하였다.

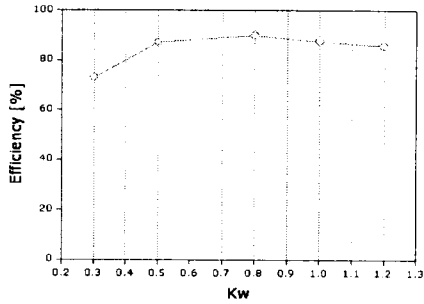


그림 3 Kw에 따른 특성

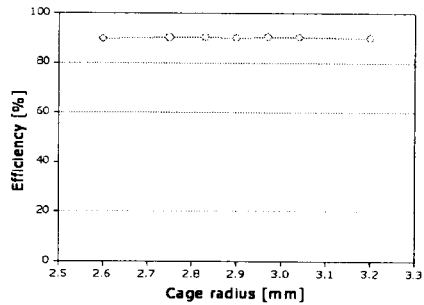


그림 4 도체바 직경에 따른 특성

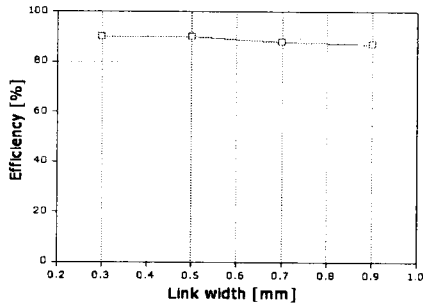


그림 5 Rib 폭에 따른 특성

2) Kw에 따른 특성해석

Kw는 전체 철심영역에 대한 Flux barrier 영역 폭의 비를 나타내는 것으로 그 정의는 식 2.1과 같다.

$$Kw = \sum (W_{air}) / \sum (W_{iron}) \quad (2.1)$$

여기서  $\sum (W_{air}) = W_{air1} + W_{air2} + W_{air3}$

$$\sum (W_{iron}) = W_{iron1} + W_{iron2} + W_{iron3} + W_{iron4}$$

Kw는 모두 5가지 경우로 나누어 특성해석을 수행하였고, 결과는 그림 3과 같다. 해석 결과 Kw가 0.8일 때 가장 높은 효율을 나타내었다.

3) 도체바 직경에 따른 특성해석

회전자 도체바의 직경에 따른 특성해석을 수행하였다. 도체바의 형상은 원형으로 결정하였으며, 특성해석 결과는 그림 4와 같다. 해석 결과 회전자 도체바 직경은 전 동기 효율특성에 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

4) 회전자 Rib 폭에 따른 특성해석

회전자 Rib의 폭에 따른 특성해석을 수행하였다. 특성 해석 결과 Rib의 폭이 증가할수록 자속의 누설성분이 증가하여 효율이 떨어지는 특성을 나타내었다. 해석 결과는 그림 5와 같다.

2.3.2 회전자 구조안정성 검토

설계 변수에 따른 특성해석 결과를 바탕으로 회전자의 구조 안정성 검토를 위한 Barrier 형상에 따른 구조 해석을 수행하였다. 해석을 위해 하중은 회전자 도체바에 균등하게 분포한다고 가정하였고 토크 크기는 안전계수와 충격계수를 고려한 값으로 하였다. 해석대상은 그림 7과 같이 2가지 type으로 선정하였다. 구조해석 조건은 표 1에 나타내었다.

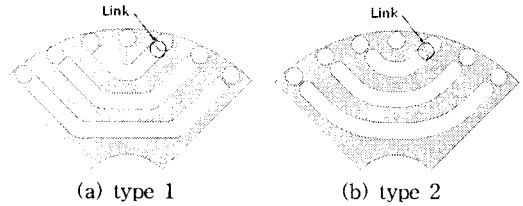


그림 7 해석대상 회전자 구조

표 1 회전자 구조해석 조건

토크 크기	390 [Nm] (안전계수 1.3 충격계수 3)
하중 부여	Rotor Cage의 중심
허용 응력	270 [MPa]

표 2는 구조해석 결과를 나타낸다. 해석 결과 type1에 비해 type2가 약 2.5배 높은 안전율을 나타내었다. 그림 8은 회전자 type에 따른 응력 분포를 나타낸 것이다. 구조해석 결과를 바탕으로 최종모델의 회전자를 type2로 선정하였으며 최종 설계모델을 대상으로 특성해석을 수행하였다.

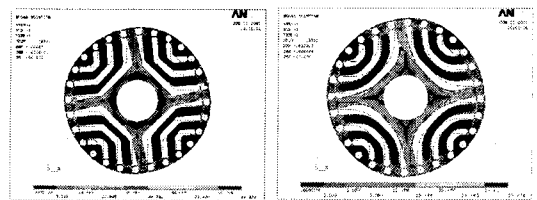


그림 8 회전자 type에 따른 응력분포

표 2 회전자 type에 따른 구조해석 결과

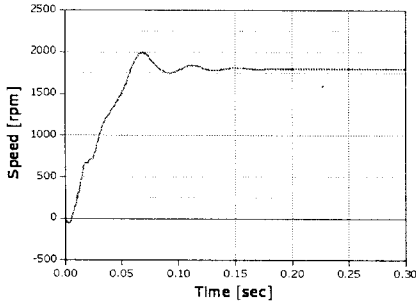
Item	type 1	type 2
최대 응력	66.13 [MPa]	27.24 [MPa]
발생 위치	슬롯 끝단	슬롯 중심
안전율	4	9.9

2.3 최종 설계모델 사양 및 특성해석

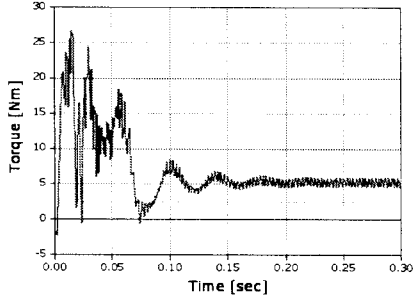
표 3은 최종모델의 사양을 나타낸 것이다. 정격 용량은 3.7[kW]이고 극수는 4, 정격속도는 1800[rpm]이다.

표 3 최종 설계모델 사양

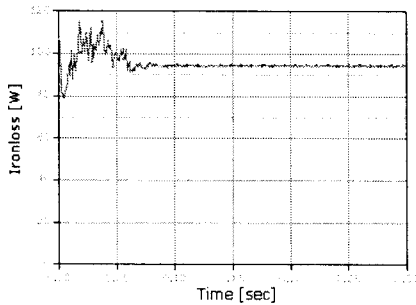
Item	Value
상수 및 극수	3Phase / 4Pole
정격 출력	3.7 [kW]
회전자 형식	Squirrel Cage
정격 속도	1800[rpm]
정격 토크	21.22 [[Nm]



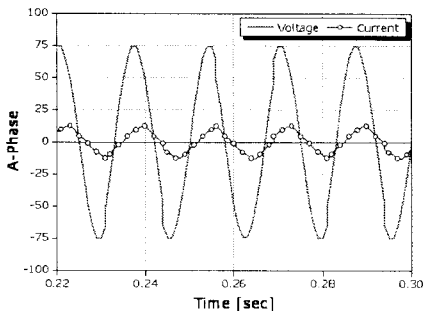
(a) 시간에 따른 속도 특성



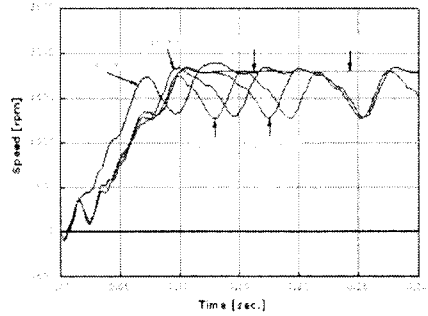
(b) 시간에 따른 토크 특성



(c) 시간에 따른 철손 특성



(d) 전류 및 전압 특성



(e) 최대토크 특성

그림 9 최종 모델의 특성해석 결과파형

표 4 최종 특성비교 결과

Item	IM	LSRM	
	실험치	해석치	실험치
정격 속도 [rpm]	1742.3	1800.0	1800.0
Slip [%]	3.2	-	-
정격 토크 [Nm]	21.2	21.2	-
정격 출력 [kW]	3.7	4.0	-
정격 입력 [kW]	-	4.61	-
정격 효율 [%]	83.2	86.8	85.8
정격 전류 [A <sub>rms</sub> ]	13.4	14.1	15.77
최대 토크 [Nm]	46.64	34.00	25.52

그림 9는 최종 모델의 특성해석 결과를 나타낸다. 그림 9 (a)의 속도특성을 보면 정격속도에서 회전하고 있으며, 속도 변동이 거의 없음을 알 수 있다. 표 4는 최종 설계된 3.7kW 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기의 특성 해석 결과를 시험결과 및 동일용량 유도기 특성과 비교한 것이다. 비교결과 정격효율은 2.6% 상승하였고 최대토크는 45% 감소하였다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 3.7kW 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기를 대상으로 특성해석 및 설계를 수행하였고, 그 결과를 시험결과와 비교하였고, 그 결과 동일 용량의 유도기보다 2.6%의 효율향상 효과를 나타내었지만, 최대토크는 45% 감소하였다. 따라서 유도기동형 동기 릴럭턴스 전동기는 기존 유도기에서 별도의 추가비용 없이 회전자의 형상 변경만으로 이러한 효과를 가지므로, 향후 다양한 분야에서 유도기를 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] T.J.E. Miller, "Synchronization of Line Start Permanent Magnet AC Motors", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 103, No. 7, 1984
- [2] E. S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machines", JOHN WILEY & SONS, 1994
- [3] Chee Mun Ong, "Dynamic simulation of Electric Machinery", Prentice Hall, 1998