

구동회로를 고려한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 극호와 스위칭 조건에 따른 역율과 효율 특성

박 종원, 김 윤현, 최 재학, 이주, 김 석태, 김 영태  
 한양대학교 전기공학과, 기술표준원, 국립원주대학교

Characteristic of efficiency and powerfactor according to condition by polearcs and switching angle for switched reluctance motor considering driving circuits

Jong Won Park, Youn Hyun Kim, Jae Hak Choi, Ju Lee, Suk Tae Kim, Young Tae Kim  
 Electrical Engineering, Hanyang Univ., Agency for Tech and Standard, Wonju College

**Abstract** - This paper investigates efficiency and power factor of Switched Reluctance Motor (SRM) using Finite Element Method considered driving circuit. The efficiency and power factor are calculated in Input terminal and Output terminal respectively. When calculating power factor, apparent power is obtained by effective voltage and current because SRM is operated by switching of driving circuit. Efficiency is calculated by mechanical output and active power. Finally, the characteristics of efficiency and power factor in three proposed models are compared due to the switching pattern.

1. 서 론

SRM은 간단한 구조를 가지고 있어 유지보수에 유리하고 환경에 강인하며 가격경쟁력이 높으므로 산업 분야 응용에 많은 이점을 가지고 있다[1]. 최근에 친환경적인 문제와 에너지 절약차원에서 고효율기기를 요구하기 때문에 효율개선에 대한 관심이 높아지고 있는데 특히 SRM은 직류기나 유도기에 비해 우수하여 차세대 모터로 각광 받고 있으나 성능 및 효율에 대한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 SRM의 세 가지 모델과 구동회로의 스위칭 조건을 달리하여 역율과 효율 및 토오크특성을 연구하여 분석하였다.

6/4 SRM의 역율과 효율 및 토오크특성을 비교하기 위해 형상적으로 토오크리플을 줄일 수 있는 모델과 일반적인 모델을 사용하였다[2]. 구동회로의 스위칭 조건을 달리하여 평활한 토오크를 얻을 수 있는 평활 전류를 흘리게 하는 턴온각과 이전, 이후 각에서 턴 온(Turn on)을 시키고, 부토오크가 발생하지 않도록 여유각을 주어 오프시켰다. 회로의 전압입력단과 출력단에서 특성을 각각 비교하였다.

SRM은 스위칭 방식으로 구동하기 때문에 직류모터처럼 단순히 인가전압과 전류의 곱으로 피상전력을 구할 수 없고 구동회로를 고려하여 전류와 전압의 실효값의 곱에 의해 피상전력을 구해야 하고 전압과 전류의 곱에 의한 적분으로 유효전력을 구한다. 따라서 역율은 위에서 구한 피상전력과 유효전력에 의해 얻어지며 효율은 토오크와 각가속도의 곱에 의한 기계적 출력과 유효전력으로 특성을 알 수 있다.

2. 본 론

2.1 해석모델

그림 1은 6/4 SRM의 일반적인 구조로서 회전자 극호와 고정자 극호를 각각  $\beta_s$  와  $\beta_r$  로 표현하였다. 본 논문에서는 역율과 효율의 특성을 고찰하기 위해 세 가지 모델( 모델 A:  $\beta_s = 30^\circ$ ,  $\beta_r = 30^\circ$ , 모델 B:  $\beta_s = 30^\circ$ ,  $\beta_r = 50^\circ$ , 모델 C:  $\beta_s = 45^\circ$ ,  $\beta_r = 45^\circ$ )을 사용하는데 모델 A는 6/4 SRM의 가장 일반적인 형상으로 최소 인덕턴스 구간과 상승, 하강 인덕턴스 구간이 각각  $30^\circ$ 를 가지고

최대 인덕턴스 구간은 존재하지 않는다. 모델 B는 고정자 극호가  $30^\circ$ 이고 회전자의 극호를  $50^\circ$ 로 넓힌 형상으로 토오크 리플을 줄이기 위한 모델이고 모델 C는 고정자와 회전자의 극호가 같으면서 모델 A보다 더 넓은 형상으로 최소 인덕턴스와 최대 인덕턴스 구간이 존재하지 않고 정토크가 발생하는 상승 인덕턴스 구간과 부토크 영역인 하강 인덕턴스 구간이  $45^\circ$ 인 모델이다 [2][3].

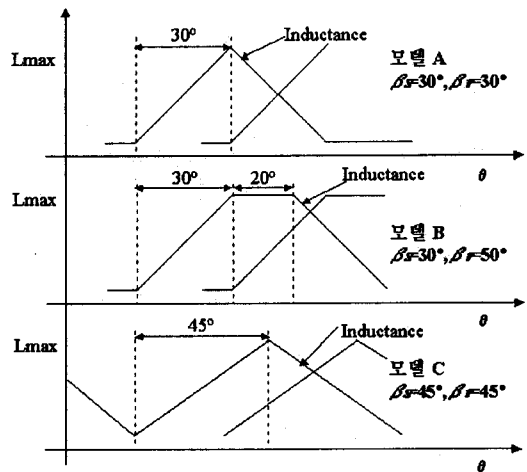


그림 1. 세가지 SRM 모델의 인덕턴스 프로파일

표 1. 모델 사양

항목	값	단위	항목	값	단위
정격전압	12	V	공극 길이	0.3	mm
정격전류	1	A	적층폭	40	mm
턴수 *	78/68	T/pole	코일 선경	0.7	mm
고정자 극수	6	poles	권선저항 *	0.6/0.5	$\Omega$
회전자 극수	4	poles	코어 재질	S18	
동작 속도	3000	rpm			

\* 모델 A,B/모델 C

2.2 역율과 효율

SRM은 스위칭 여자방식으로 구동하므로 피상전력은 직류기처럼 단순히 전압과 전류의 곱으로 구할 수 없고 한 주기의 전압과 전류 실효값의 곱으로 구해야 하며 식(1)과 같이 쓰고 T는 한주기의 적분구간을 나타낸다. 유효전력도 한 주기의 전압과 전류의 곱에 의한 평균값으로 식(2)와 같이 나타낸다. 역율은 식(3)과 같이 피상전력과 유효전력으로 구할 수 있고 효율은 토오크와 각가속도의 곱에 의한 기계적 출력과 유효전력의 비로써 식(4)와 같이 나타낸다.

$$P_a = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt} \quad (1)$$

$$P_r = \frac{1}{T} \int_0^T VI dt \quad (2)$$

$$\text{역율(PF)} = \text{유효전력}(P_r) / \text{피상전력}(P_a) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{효율} = \frac{\text{Torque} \times \omega}{P_a \times \text{PF}} \quad (4)$$

수치적분 계산법인 사다리꼴 적분을 이용하여 SRM의 피상전력과 유효전력을 구하여 특성을 해석하였는데 사다리꼴 적분법은 적분구간을 n개로 등분하여 x의 변화량과 함수 곡선 위의 두 점을 직선으로 연결시켜서 나온 사다리꼴 면적을 계산하는 방법으로써 본 논문에서는 한 주기를 100등분하여 오차를 줄이는 방법을 택하였다. 사다리꼴 적분을 위의 식에 적용하면 역율과 유효전력과 피상전력을 각각 식(5),(6),(7),(8)과 같이 쓸 수 있으며 이것은 출력단과 전원입력단에서 공통적으로 적용되며 전원입력단에서의 역율과 효율은 정상상태에서 구하였다. 그리고 변위 Δx는 각(angle)이며 단위는 radian이다.

$$P_a = \sqrt{\frac{1}{K} \frac{\Delta x}{2} \sum_{n=1}^K [V_n^2 + V_{n+1}^2]} \times \sqrt{\frac{1}{K} \frac{\Delta x}{2} \sum_{n=1}^K [I_n^2 + I_{n+1}^2]} \quad (5)$$

$$= \frac{1}{K} \frac{\Delta x}{2} \sqrt{\sum_{n=1}^K [V_n^2 + V_{n+1}^2]} \times \sqrt{\sum_{n=1}^K [I_n^2 + I_{n+1}^2]}$$

$$P_r = \frac{1}{K} \frac{\Delta x}{2} \sum_{n=1}^K [V_n I_n + V_{n+1} I_{n+1}] \quad (6)$$

$$\text{PF} = \frac{\sum_{n=1}^K [V_n I_n + V_{n+1} I_{n+1}]}{\sqrt{\sum_{n=1}^K [V_n^2 + V_{n+1}^2]} \times \sqrt{\sum_{n=1}^K [I_n^2 + I_{n+1}^2]}} \quad (7)$$

$$\text{효율} = \frac{\frac{\Delta x}{2} \sum_{n=1}^K [Torque_n + Torque_{n+1}] \times \omega}{P_a \times \text{PF}} \quad (8)$$

그림 2는 비대칭 브릿지 컨버터로서 상당 두 개의 IGBT와 다이오드를 가지고 있다. 이 컨버터는 각상의 전류제어가 독립적이어서 두 상의 전류중첩이 가능하다 [4]. 본 논문에서는 출력단과 전원 입력단에서 역율과 효율의 특성을 고찰하는데 출력단은 전류의 방향이 일정하고 스위칭에 따라 전원이 +Vd, -Vd로 바뀌게 되는데 각상이 독립적으로 동작하기 때문에 한상에서만 특성해석을 하였으며 전원 입력단에서는 전원이 일정하게 +Vd가 인가되고 전류는 턴 온 시 +Id 방향으로 턴 오프 했을 때는 -Id 방향으로 흐르게 되는데 여기서는 각 상의 전류가 중첩되므로 3상의 한 주기동안 특성을 연구하였다. 본 논문에서는 스위칭 조건에 따른 SRM의 특성을 해석하였다. 그림 3은 평활 전류를 흘려 리플이 적은 토오크를 얻을 수 있는 턴 온, 턴오프각(Case II)과 그 각을 기점으로 이전(Case I), 이후 각(Case III)을 나타낸 것이며 Case II는 전압방정식을 근거로 이론적인 수식을 풀어 구하였다[2].

### 2.3 시뮬레이션 해석결과

SRM의 동작원리상 구동회로가 필요하기 때문에 인버터 회로를 고려한 전압원 유한요소해석을 수행하여 세가지 모델의 스위칭 조건을 달리하여 역율과 효율 및 토오크 특성을 해석하였다.

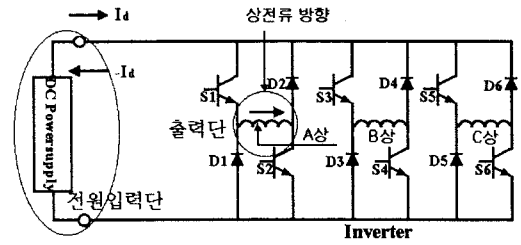


그림 2. 비대칭 브릿지 컨버터

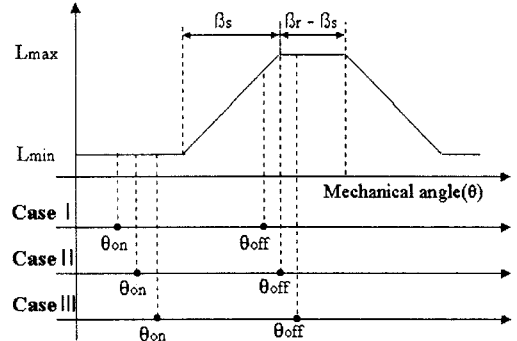


그림 3. 스위칭 조건에 따른 인덕턴스 프로파일

그림 4는 출력단에서 스위칭조건을 달리했을 때 모델 A의 전류 파형으로 전류가 턴 온될 때는 +Vd가 오프되면서 -Vd의 전압이 흐르게 되는데 이때의 전압과 전류로 역율과 효율을 계산할 수 있다. 그림 5는 출력단에서 스위칭 조건을 Case II에서 고정했을 때의 전류 파형이고, 그림 6은 스위칭 조건을 달리하여 전원 입력단에서의 전류와 전압파형으로 모델 A에 대한 전류와 전압파형이고 그림 7은 세 모델에 대한 파형이다. 그림 8과 그림 9는 스위칭조건과 각 모델에 대한 토오크 파형이다. 위의 결과를 토대로 표 2와 표 3에서 역율, 효율 그리고 토오크 특성을 정리하였다. 표 2는 역율과 효율특성 결과를 나타낸 표로써 출력단에서의 역율은 모델A의 Case I에서 스위칭했을 때 가장 우수하고, 효율은 모델A의 Case II에서 가장 우수하다. 전원 입력단에서의 역율은 모델 B의 Case I에서 가장 우수하고 효율은 모델 B의

표2. 역율과 효율 특성

스위칭조건	특성	출력단			전원입력단		
		모델A	모델B	모델C	모델A	모델B	모델C
Case I	역율(%)	41.64	39.9	29.33	48.86	57.44	39.37
	효율(%)	86.2	86.06	85.61	80.03	80.54	74.80
Case II	역율(%)	34.2	34.06	25.62	39.45	55.55	35.3
	효율(%)	88.53	87.85	86.57	80.25	81.03	75.58
Case III	역율(%)	26.5	26.13	21.61	29.67	41.19	30.42
	효율(%)	87.66	86.63	85.30	76.88	78.83	72.59

표 3. 토오크 특성

스위칭조건	특성	모델A	모델B	모델C
Case I	평균토오크(N-m)	0.0162	0.0188	0.0098
	토오크리플(%)	280.34	214.54	192.72
Case II	평균토오크(N-m)	0.0084	0.0131	0.0070
	토오크리플(%)	189.36	100.38	168.26
Case III	평균토오크(N-m)	0.0042	0.0075	0.0049
	토오크리플(%)	231.67	139.2	164.38

Case II에서 가장 우수하다. 표 3은 토오크 특성을 나타낸 표로써 모델 B의 Case I에서 평균토오크가 가장 높고 토오크리플은 모델 B의 Case II에서 가장 작았다.

### 3. 결 론

SRM의 세가지 모델을 이용해서 구동회로부의 스위칭 조건을 달리하여 역율과 효율 및 토오크 특성을 고찰하였다. 출력단에서의 역율은 세가지 모델에서 턴 온을 미리 하면 할수록 우수하였고 효율은 평활 전류를 흘리는 각에서 가장 우수함을 알 수 있었다. 전원입력단에서의 역율도 세가지 모델에서 턴 온을 빨리 했을 때 우수하였고 효율은 평활 전류를 흘렸을 때 가장 우수함을 알 수 있었다. 평균 토오크는 세 모델에서 턴 온을 미리 했을 때 높았고 토오크 리플은 전류를 평활하게 흘리는 각에서 가장 낮았다. 모델에 따라서는 모델 B가 역율과 효율 및 토오크 특성이 가장 우수하였고, 스위칭 조건에 따른 특성은 Case I에서 역율과 평균 토오크가 가장 우수하고 Case II에서 효율 및 토오크 리플이 가장 우수함을 알 수 있었다.

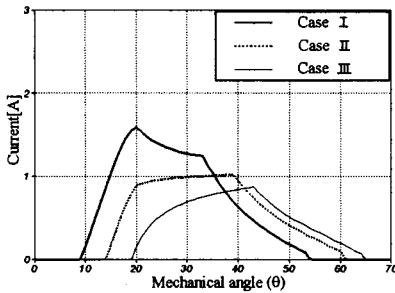


그림 4. 모델 B ( $\beta_s = 30^\circ, \beta_r = 50^\circ$ )의 출력단의 전류 파형

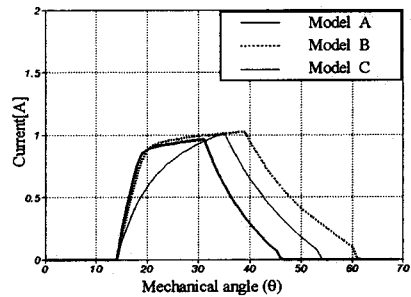


그림 5. Case II의 스위칭 조건에서 모델에 따른 출력단의 전류 파형

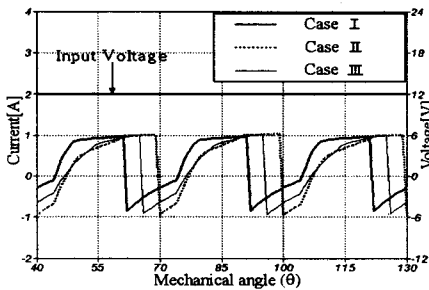


그림 6. 모델 B ( $\beta_s = 30^\circ, \beta_r = 50^\circ$ )의 전원입력단의 전류 파형

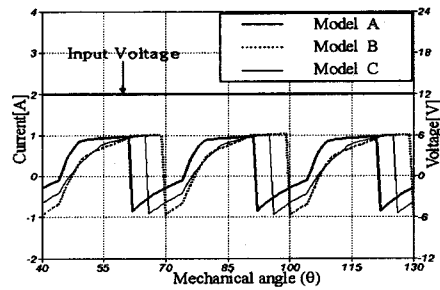


그림 7. Case II의 스위칭 조건에서 모델에 따른 전원입력단의 전류 파형

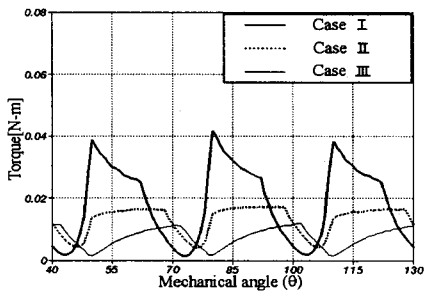


그림 8. 모델 B ( $\beta_s = 30^\circ, \beta_r = 50^\circ$ )의 토오크 파형

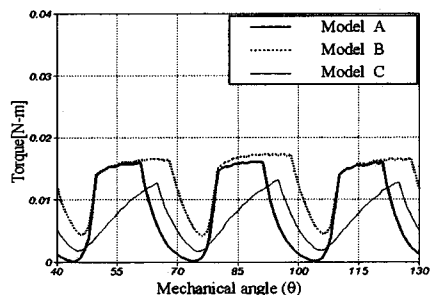


그림 9. Case II의 스위칭 조건에서 모델에 따른 토오크 파형

### [후 기]

이 연구는 한국과학재단 지정 국제공동연구(과제번호:1-00-047)의 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] I. Husain and M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor drives by PWM Control," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, pp. 33-38, January 1996.
- [2] 최재학, "유한요소법을 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동 특성 향상을 위한 설계", 한양대학교 전기공학과 석사논문, 2000년 12월
- [3] Yasuharu Ohdachi, "Optimum Design of Switched Reluctance Motors using Dynamic Finite Element Analysis", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.33, No. 2, pp. 2033-2036, March 1997
- [4] T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna Physics Publishing And Clarendon Press, Oxford, 1993