

커패시터 운전 단상 영구자석형 동기전동기 기동특성에 관한 연구

(A Study on the Starting Characteristics for Capacitor-run Single Phase Permanent Magnet Synchronous Motor)

홍선기*

(Sun-Ki Hong)

요 약

단상 전원에 의해 기동되는 영구자석형 단상 동기 전동기는 효율은 높지만, 회전 방향을 결정하기가 어렵다. 본 연구에서는 커패시터 운전 단상 동기 전동기의 기동 특성에 대하여 연구하였다. 고정자는 커패시터 운전 단상 유도기와 동일하지만, 회전자가 영구자석으로 구성된다. 이 경우는 회전자와 고정자 조건에 따라 기동 조건이 결정되고 모터의 회전 방향이 결정될 수 있다. 이 결과에서, 제안된 전동기는 낮은 기동토크를 요구하는 팬과 같은 부하에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

Although permanent magnet single phase synchronous motor which starts and runs through single phase voltage source has high efficiency, it is difficult to determine the rotating direction. In this paper, the starting characteristics of the capacitor-run single phase synchronous motor has been studied. The stator has same structure with the capacitor-run single phase induction motor, however the rotor consists of permanent magnet. In this case, the starting conditions according to the rotor and stator conditions are determined and the direction of the motor can be determined. From these results, it is desired that the proposed motor can be applied to the loads like the fans which has low starting torque.

Key Words : capacitor-run, single phase, permanent magnet, synchronous motor

1. 서 론

에너지 문제가 더욱 대두됨에 따라 전력기기의 효율 증대는 더욱 중요한 목표가 되고 있다. 대형 전력기기는 대부분 매우 높은 효율로 운전되지만, 보통

단상 분수마력 이하의 소용량 모터들은 아직도 효율이 매우 낮을 뿐만 아니라, 소형일수록 효율은 더욱 낮아지고 있다. 특히 팬부하 등에 사용되는 수십 와트급 이하의 유도전동기는 그 효율이 15% - 45%정도 밖에 안되지만 전체 사용대수는 매우 많기 때문에 전체적인 전력 손실은 무시할 수 없을 정도이다. 반면, 영구자석은 날이 갈수록 더욱 고성능이면서 가격은 낮아지고 있는 추세이어서, 영구자석을 이용한 고효율화 전동기에 많은 연구를 하고 있다. 이에 따라 단상 라인스타팅(line starting) PM 동기전동기

* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수

Tel : 041-540-5674, Fax : 041-540-5693

E-mail : skhong@office.hoseo.ac.kr

접수일자 : 2004년 1월 16일

1차심사 : 2004년 1월 20일

심사완료 : 2004년 2월 9일

[1-3]는 기동과 운전에서 제어용 전자회로가 필요 없이 단상전원만으로 운전된다는 점에서 관심을 모았지만, 부하조건, 전압조건 등에 따라 기동이 어렵거나, 회전방향을 예측하기 힘들다는 점에서 보편적으로 사용되는데 제한이 되고 있다. 본 논문에서는 안정한 기동특성을 갖도록 하기 위하여 고정자는 일반적으로 이용되는 커패시터 운전 유도전동기와 같은 구조에서 회전자가 영구자석인 경우에 대해 기동특성을 연구하였다. 라인스타팅 영구자석형 전동기는 회전자 구조가 유도기와 조합된 경우가 있지만 [3], 이러한 경우는 회전자 구조가 복잡해지는 단점이 있다. 영구자석만 존재하는 경우는 자체 관성과 부하 및 전원 조건에 따라 기동에 큰 영향을 받는다. 이러한 영향을 고려할 수 있는 모델에 대한 시뮬레이션 실험을 통하여, 운전 가능범위를 찾고, 실험과 비교하여 이로부터 고효율로 운전되는 커패시터 운전 단상 동기전동기에 실용성을 제시한다.

2. 본 론

2.1 단상 영구자석 전동기

단상 영구자석 전동기는 단상으로 운전되는 영구자석이 이용되는 전동기를 통칭하기 때문에, 유도전동기 원리를 이용하여 기동하는 동기전동기를 포함하기도 한다. 본 연구에서는 회전자가 영구자석으로만 되어 있고, 기타의 기동을 위한 특별한 구조는 없는 경우에 대하여 연구하였다. 즉, 회전자는 영구자석만으로 구성되고, 고정자 구조는 단상 코일만 있는 경우, 2상의 경우 및 커패시터 운전 영구자석형 동기 전동기 3가지 경우에 대하여 연구하였고, 각각의 장단점을 비교하였다.

2.1.1 단권선 영구자석 전동기

단상만 권선이 되어 있는 영구자석을 회전자로 사용하는 경우는 그 구조가 매우 간단해서 저가로 개발하는데 유리하다 [1]. 가장 간단한 구조는 세이딩 코일형 유도전동기와 같이 구성될 수 있으며, 그림 1은 단상 동기 전동기의 등가회로이다.

그림 1의 등가회로에서 다음과 같은 방정식을 세울 수 있다.

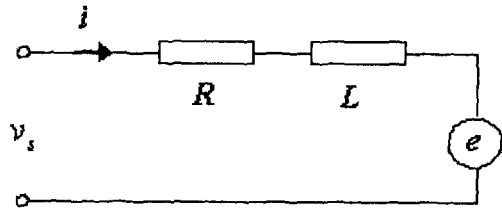


그림 1. 단상 영구자석 전동기 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of single phase PM motor

$$v_s = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

여기서, $v_s = \sqrt{2} V_m \sin(\omega_s t + \theta)$ 가 되고, $e = k_e \omega_r \sin(\theta_r)$ 이다. 또한 단상 영구자석 전동기의 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + T_L = i \lambda_m \sin(\theta_r) \quad (2)$$

여기서, p 를 극 짝수라고 할 때 λ_m 은 다음과 같다.

$$\lambda_m = \frac{k_e}{p} \quad (3)$$

식 (1), (2) 및 (3)으로부터, 그림 2와 같은 시뮬레이션 블록도를 만들 수 있으며, 이로부터 단상 전압이 인가된 동기전동기에 대한 특성 시뮬레이션이 가능하다. 그림 3은 그림 2와 같은 경우에서 속도 단위 응답 특성을 보여주고 있으며, 단상 전원에 의해 기동, 회전하기 때문에 정상상태에서도 수십 %정도의 속도 변동이 있을 뿐만 아니라, 기동시 모터 자체 및 부하 관성에 따라 기동 자체가 안되는 경우가 발생할 수 있다. 이것은 교번 회전자계가 2회전자계로 해석될 수 있기 때문에 동기속도로 회전할 수 있지만, 반대로 기동 자체가 불가할 수 있음을 보여주는 것이다. 더욱이, 기동이 되더라도 기동 조건, 즉 전압의 크기나 스위치가 인가될 때의 전압의 위상 조건에 따라 전동기의 회전 방향도 확일적으로 정해지지

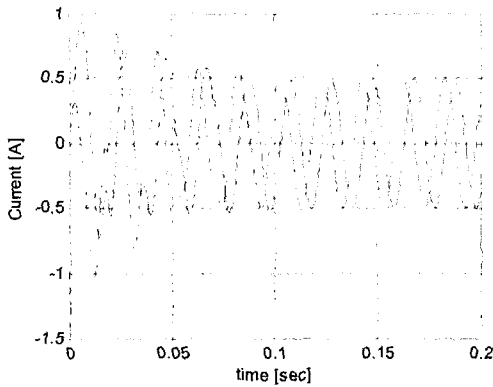


그림 5. 2상 영구자석 동기전동기 전류파형
Fig. 5. Current wave form of 2-phase PM synchronous motor

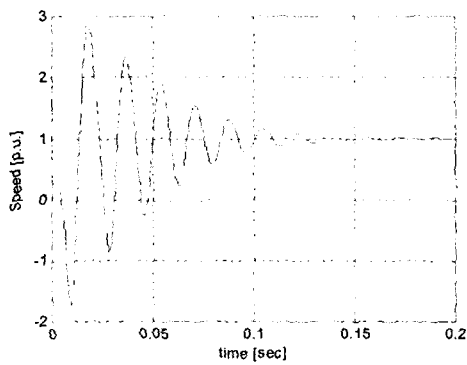


그림 6. 2상 영구자석 동기전동기 속도 파형
Fig. 6. Speed for 2-phase PMSM

2.2 커패시터 운전 단상 동기 전동기

단상 영구자석형 동기전동기는 결국 정상상태에 이르게 되면, 입력과 출력 관계로부터 효율을 구할 수 있다. 커패시터 운전인 경우는 보조권선측 전압 방정식이 커패시터에 의하여 식(4)와 같게 된다.

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \frac{1}{C} \int i_a dt + e_a \quad (4)$$

전원 전압은 동일전원을 사용하므로, v_a 는 식 (1)의 v_s 와 같다. 이로부터 커패시터 운전 동기전동기의 모델을 시뮬레이션 블록선도로 구현한 것이 그림 7과 같이 된다.

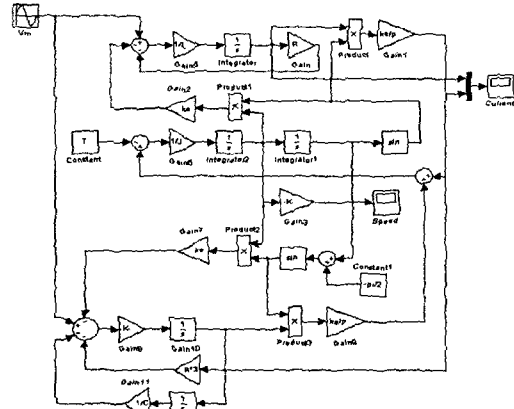


그림 7. 커패시터 운전 영구자석 동기전동기 과도상태 시뮬레이션 블록선도
Fig. 7. Transient simulation block diagram of capacitor-run PM synchronous motor

커패시터 운전 동기전동기는 상대적으로 많은 변수를 갖게 된다. 보조권선의 도선 종류, 턴수, 커패시터 용량 및 전원 조건 등 많은 변수에 따라 운전 특성이 변화를 갖게 된다. 여기서, 보통 이런 경우 커패시터는 가격 등을 고려하여, 0.5 ~ 1.5[μF] 정도를 사용한다. 2상 동기기가 이상적인 경우라고 생각하면, 결국 원회전자계에 가까운 기자력을 낼 수 있는 조건을 찾는 것이지만, 여러 가지 원인으로 원회전자계를 정확히 만들기는 어렵다. 그러나, 이에 가까운 조건일수록 좀 더 좋은 기동 특성과 정상상태를 갖게 된다. 또한, 이 전동기는 기동 가능성 여부가 가장 중요한 문제가 되며, 부하로 작용하는 부분은 모터 자체의 관성에 부하 관성을 더하여 고려하여야 한다. 따라서, 일정크기의 부하를 갖는 경우 보다는 기동시는 거의 부하로 작용하지 않은 팬 부하 등이 적당하다.

2.2.1 시뮬레이션

그림 7과 같은 시뮬레이션 블록 선도를 이용하여 영구자석 회전자를 갖는 커패시터 운전 동기전동기를 시뮬레이션하였다. 여기서 마찰 손실이나 스트레이 손실 등은 무시하였다. 여기서, 저항이나 인덕턴스 등의 파라미터들은 계산치이며[4], 실제작된 시제품 전동기의 값과 거의 일치하였다. 커패시터 운전 동기전동기 기본 사양은 표 1과 같다.

표 1. 시험 전동기 사양
Table 1. Specification of the test motor.

인가전압[V]	220	인덕턴스 [mH]	L1=924 L2=642
극수	6	커패시터 [μF]	1.5E-6
관성[kg m ²]	3.76E-5	잔류자속밀도[T]	0.7
저항 [Ohm]	R1=402 R2=266	권선수[turn]	N1=660 N2=528

그림 8은 주권선, 보조권선에 의한 토크의 합성 토크를 나타내고 있으며, 결과적으로 합성토크가 평균적으로 양의 값으로 진동하여, 정회전을 하게 된다. 그림 9는 이 때 흐르는 전류의 파형이다.

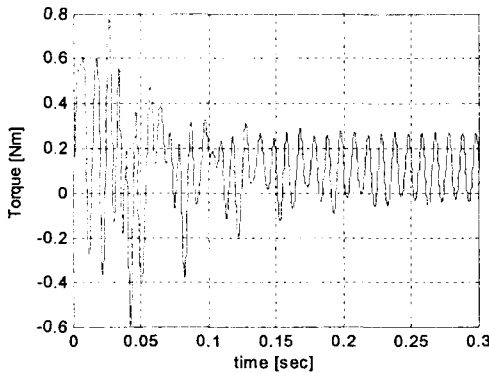


그림 8. 합성 토크 파형
Fig. 8. Resultant torque wave form

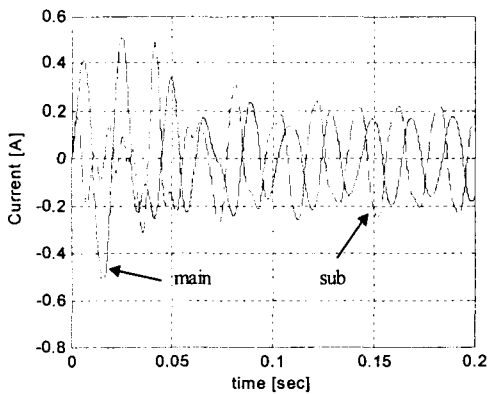


그림 9. 주, 보조권선에 흐르는 전류 파형
Fig. 9. Current wave forms of the main and sub winding

가능한 주권선과 보조권선에 흐르는 전류의 위상차는 90도에 가까울수록 유리하다. 그림 10은 최종적으로 속도 파형이며, 부하와 전원 조건에 따라, 동기속도에 이르지 못할 수도 있다. 그림에서 1은 동기속도의 단위값을 보여주고 있다.

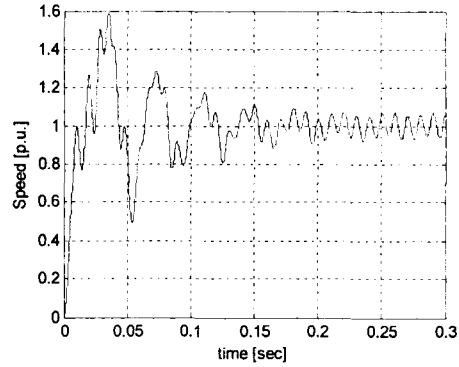
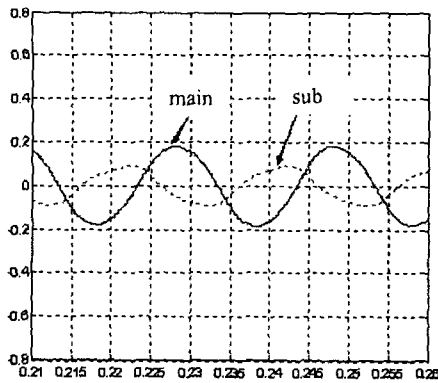


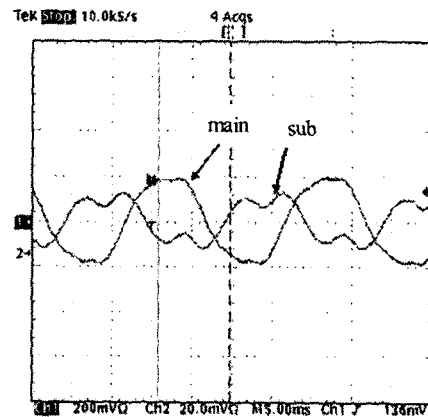
그림 10. 단상 동기전동기 속도 파형
Fig. 10. Speed for single-phase PM synchronous motor

2.2.2 실험 및 검토

표 1과 같은 전동기에 대하여 정지 상태에서 기동되어 정상상태에 이른 경우에 대한 실험을 수행하였다. 실험은 전압, 커패시터의 조건에 따라 기동이 되는지 여부와, 기동 후 권선에 흐르는 전류를 검토하였다. 그림 11, 12는 전동기에 흐르는 주권선 전류와 보조권선 전류를 나타내고 있다. x축은 시간[sec]이고, y축은 전류[A]를 나타내고 있다. 시뮬레이션 상에서는 전동기의 치형상이나, 권선에 따른 고조파 영향을 고려하지는 않았기 때문에 파형의 왜곡 정도가 차이가 있기는 하지만, 기본파에 대한 파고치나 주 보조권선 간의 위상차는 시뮬레이션으로부터 충분히 예측할 수 있다. 그림 11의 경우는 230[V], 50[Hz], 0.6[μF]을 사용한 경우이며, 그림 12는 커패시터 용량이 1.5[μF]인 경우이다. 커패시터 용량이 작을 때는 반대로 리액턴는 커지고, 이 값은 권선 리액턴스보다 매우 커서 보조권선의 임피던스는 용량성이 되고, 따라서 전류는 주권선보다 위상이 앞서게 된다. 커패시터 용량이 커지면, 예상되는 바와 같이, 커패시터에 의한 리액턴스는 감소하고 따라서 주권선에 대한 보조권선 전류의 위상차는 감소하게 된



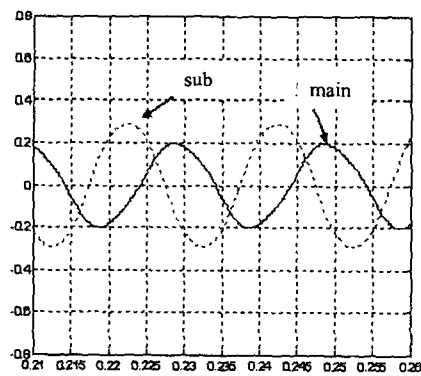
(a) 시뮬레이션 / (a) Simulation



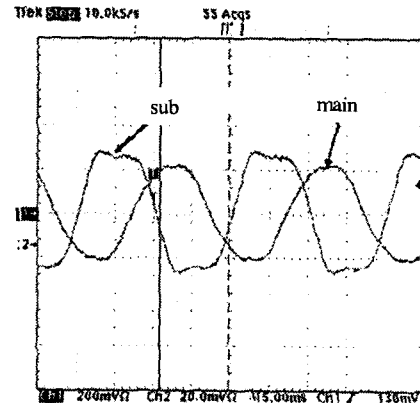
(b) 실험 / (b) Experiment

그림 11. 주, 보조 권선 전류 파형(230(V), 50(Hz), 0.6(μF))

Fig. 11. Main and sub-winding current wave form for 230(V), 50(Hz), 0.6(μF)



(a) 시뮬레이션 / (a) Simulation



(b) 실험 / (b) Experiment

그림 12. 230(V) 1.5(μF) 경우 주, 보조권선 전류 파형

Fig. 12. Main and sub-winding current wave form for 230(V), 50(Hz), 1.5(μF)

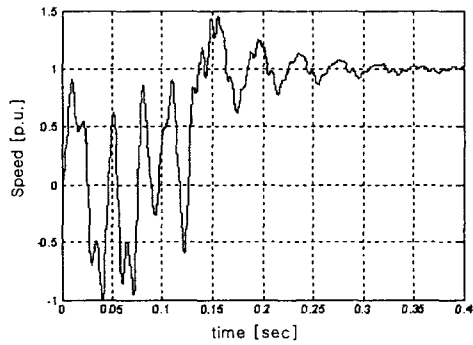
다. 또한 크기도 감소하여 보조권선의 전류가 증가하게 됨을 볼 수 있다. 위상차 경우는 90도인 경우가 가장 이상적이지만, 권선 임피던스에 따라 전체 임피던스는 달라지기 때문에 항상 만족시키기는 어렵다.

그림 13은 인가전압을 조정하였을 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. x축은 시간[sec]이며, y축은 단 위속도[p.u.]이다. 50[Hz]를 인가한 경우이며, 6극이므로 1,000[rpm]이 1[p.u.]이 된다. 그림 13(a)는 인가

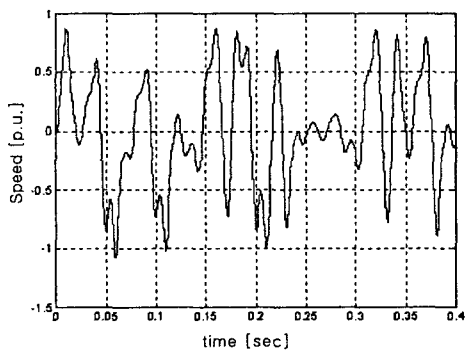
전압이 190[V]일 경우이며, 그림 13(b)는 180[V]인 경우이고, 커패시터는 0.6[μF]인 경우이다. 여기서 알 수 있듯이 인가전압이 190[V]보다 낮아지는 경우에는 기동에 실패하였음을 알 수 있으며, 이것은 실험과 잘 일치하고 있다. 이러한 시뮬레이션과 실험과의 비교를 통해, 전동기 사양이 주어질 때, 인가전압, 커패시터 용량 등이 정해지면 전동기의 기동 가능 여부와 더불어 회전방향도 판별할 수 있다.

3. 결 론

단상 전원에 의해 기동 및 운전되는 영구자석형 동기전동기에 대하여 기동 특성을 시뮬레이션하고, 실험과 비교하였다. 특히 본 연구에서는 커패시터를 사용하는 커패시터 운전 유도 전동기와 같은 고정자 구조에 회전자를 영구자석을 사용하는 경우에 대하여 연구하였다. 즉, 회전자의 치수에 따른 관성을 고려하여 이에 따른 기동 조건을 계산하고, 과도현상을 모의하였으며, 실험과 비교하였다. 이로부터 전압 크기, 커패시터 용량에 따른 기동 가능성과 회전방향을 결정할 수 있어 고효율로 팬부하와 같은 기동 토크가 작은 부하에 적용될 수 있을 것으로 기대되며, 영구자석 회전자를 이용하는 응용분야 적용이 기대된다.



(a) 190 [V], 50 [Hz]



(b) 180 [V], 50 [Hz]

Fig. 13. 인가 전압에 따른 기동 특성
Fig. 13. Starting characteristics according to the applied voltage.

References

- [1] Nesimi Ertugrul and Christian Doudle, "Dynamic Analysis of a Single-Phase Line-starting Permanent Magnet Synchronous Motor", Proceedings of the 1996 International Conference Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, Vol.1, 8-11, pp.603-609, Jan. 1996.
- [2] T.J.E.Miller, "Single phase Permanent Magnet Motor Analysis", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-21, May-June 1985, pp.651-659.
- [3] AM.Knight and J.C.Salmon, "Modeling the Dynamic Behaviour of Single-Phase Line Start PMSM", Proceeding of 34 Annual meeting of IEEE-Industry Applications society, 1999, pp.2582-2587.
- [4] 원중수, "대학과정 전기설계학", 동일 출판사, 1994.

◇ 저자소개 ◇

홍선기 (洪瑄基)

1965년 1월 24일생. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년 서울대학교 대학원 전기공학과(석사). 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과(박사). 1995~현재 호서대학교 정보제어공학과 부교수.