

$$v_{0^-} = \omega \cdot L_{0^-} \cdot \frac{di_{0^-}}{d\theta} + \omega \cdot i_{0^-} \cdot \frac{dL_{0^-}}{d\theta} \quad (4)$$

$$v_{0^+} = \omega \cdot L_{0^+} \cdot \frac{di_{0^+}}{d\theta} + \omega \cdot i_{0^+} \cdot \frac{dL_{0^+}}{d\theta} \quad (5)$$

식 (4)는 고정자극과 회전자극이 겹치기 직전의 전압이고, 식 (5)는 겹친 직후의 전압을 나타낸다. 고정자극과 회전자극이 겹치기 직전에는 인덕턴스의 변화가 없으므로 $\frac{dL_{0^-}}{d\theta} = 0$ 이며 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{0^-} = \omega \cdot L_{0^-} \cdot \frac{di_{0^-}}{d\theta} \quad (6)$$

극이 겹치면 인덕턴스는 증가하고 역기전력이 생기게 되어 전류증가비를 감소시킨다. 따라서, 적정 토크를 얻기 위한 전류의 확립을 위해 고정자 극과 회전자 극이 겹치기 이전에 전압이 인가되므로, θ_0 전후의 전압값은 동일하며 식 (5)와 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega \cdot L_{0^-} \cdot \frac{di_{0^-}}{d\theta} \\ = \omega \cdot L_{0^+} \cdot \frac{di_{0^+}}{d\theta} + \omega \cdot i_{0^+} \cdot \frac{dL_{0^+}}{d\theta} \quad (7) \end{aligned}$$

L_{0^-} 와 L_{0^+} 는 비저절 위치에서의 인덕턴스 값 L_u 와 같으므로 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{di_{0^-}}{d\theta} - \frac{di_{0^+}}{d\theta} \right) = \frac{i_{0^+} \cdot \frac{dL_{0^+}}{d\theta}}{L_u} \quad (8)$$

식 (8)의 우변의 값은 모두 양의 값이므로, $\frac{d\theta_{0^-}}{d\theta}$ 는 $\frac{d\theta_{0^+}}{d\theta}$ 보다 항상 크게 된다. 이와 같이, 인덕턴스가 상승하는 시점을 전류센서를 이용하여 검출함으로써 여자되는 주기를 구하여 회전속도에 따른 적절한 스위칭 시간을 조절함으로써 속도를 제어할 수 있다. SRM의 기하학적인 특성으로부터 여자되는 주기당 회전자 각이 이동하는 기계적인 각도를 다음식으로부터 유도할 수 있다 [1].

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{m \cdot N_r} \quad (9)$$

여기서, m 과 N_r 은 각각 전동기 상수와 회전자 극수이다. 3상 6/4극 SRM 전동기에서의 $\Delta\theta$ 는 30° 가 되며, 각 상이 90° 주기로 여자되고, 1회전당 12개의 전류 피크값을 검출할 수 있다.

그림 2에 센서리스 드라이브의 블록 다이어그램을 나타내었다. 전류센서로부터 전류변화를 감지하고 회전자 위치정보를 추정하여 비대칭 브리지 인버터의 스위칭 시간에 적용하고, 회전속도를 연산한 후, PI 제어기를 통하여 지령속도와와의 차이로부터 이득값을 구함으로써 지령속도를 추종할 수 있게 하였다. 여기서 ω_r^* 는 지령속도를 나타내고, $\omega_{r,est}$ 는 전류값으로부터 추정된 속도를 나타낸다.

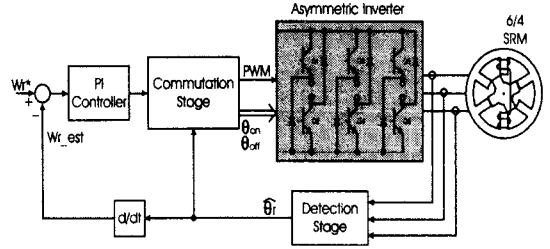


그림 2. SRM 센서리스 드라이브의 블록 다이어그램

4. 센서리스의 장점 및 단점

열악한 환경에서의 SRM의 구동과 시스템 가격저하를 위해 제안된 센서리스는 일반적인 SRM 전동기에 적용가능하고 각 전동기의 자화곡선이나 인덕턴스 프로파일의 특성이 없이도 구동이 가능하다. 듀티비 점호각을 변화시킴으로써 페루프 속도제어가 가능하며 모터의 성능을 저하시키지 않으면서 4상한의 동작에 적용가능하다. 속도가 높을수록 전류파형의 피크값이 현저히 나타나므로 중속과 고속에 적합하지만 정지상태에서는 전류파형을 검출할 수 없으므로 별도의 기동장치가 필요하며, 저속과 과부하에 대해 적합하지 않다. 전류 피크값을 검출해야 하므로 토크 리플과 노이즈 저감에 적합하지 않고 저속이나 낮은 토크에서 효율이 좋지 않다[2].

그러나, SRM은 타 전동기에 비해 구조가 간단하고 전동기 자체의 생산비가 낮고 효율이 좋으므로 신뢰성 있는 기동방식과 제어방식을 개발함으로써 타 전동기에 대한 경쟁력을 높일 수 있다.

5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

그림 3에 PSIM 시뮬레이션 프로그램과 Boland-C 프로그램을 이용하여 6/4극 전동기를 모델링한 시뮬레이션 회로도를 나타내었으며, PI제어를 이용하여 지령속도에 추종하도록 하였다. 전류 연산부분으로부터 전류값을 입력받아 각 상의 회전자 주기를 검출하고, 인덕턴스 연산에 입력하여 회전자 위치에 따른 인덕턴스값을 계산하였으며, 'Gain'부분에서 회전속도를 계산하고 지령속도와 비교하여 적절한 이득값이 계산되도록 프로그램 하였다.

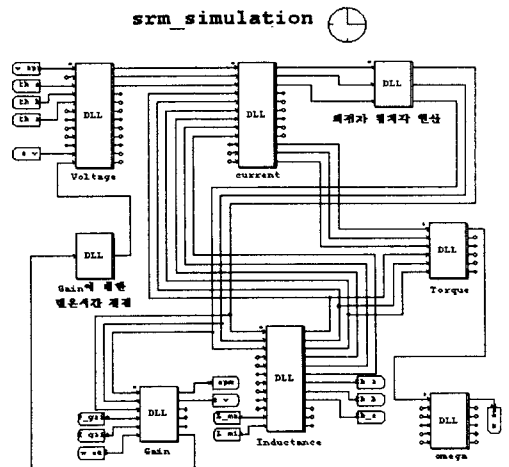
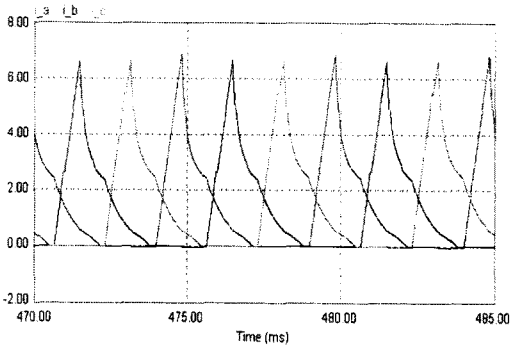


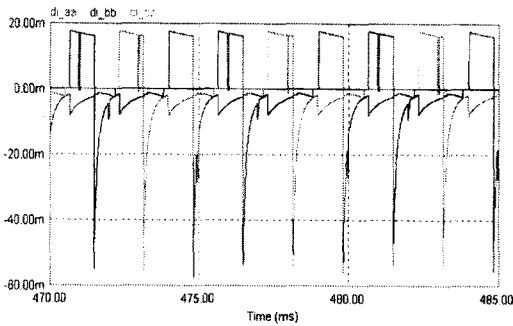
그림 3. SRM 시뮬레이션 회로도

그림 4는 DC 링크 입력 전압 300[V], 지령속도

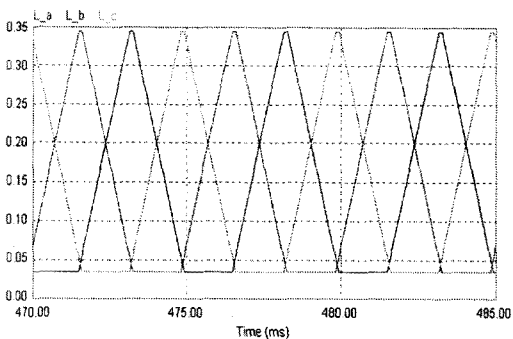
3000[rpm], 부하토크 $2[Kg \cdot m^2]$ 인 경우의 시뮬레이션 파형을 나타내었다. 각 상에서 전류값이 최대가 되는 시점이 인덕턴스가 상승하는 시점이며, 역기전력에 의해 전류가 급격히 감소함을 알 수 있다. (a)는 3상 전류 파형이며, (b)는 단위시간당 전류변화량을 나타내는 파형이다. (c)의 인덕턴스 파형과 비교해 보면, 인덕턴스가 상승하는 시점에서 전류 피크값이 나타남을 알 수 있다. (d)는 1상의 회전자 위치각에 따른 주기를 나타내는 파형이며, 최대값이 나타나는 시점이 인덕턴스가 상승하는 시점이다. (e)에 지령속도 및 속도 응답 파형을 나타내었다. 비교적 빠른 시간에 지령속도에 추종함을 알 수 있다.



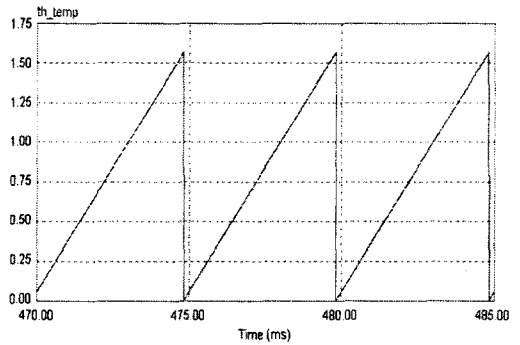
(a) 3상 전류 파형



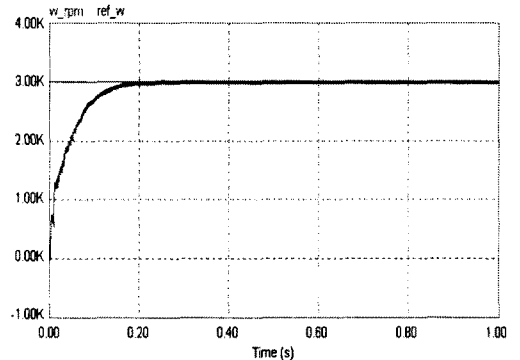
(b) 전류 변화에 따른 파형



(c) 인덕턴스 파형



(d) 회전자 위치 주기에 따른 파형



(e) 속도 응답 파형

그림 4. 시뮬레이션 결과 파형

표 1에는 모델링에 적용한 전동기의 설계상수를 나타내었다.

표 1. SRM 전동기 설계상수

상 수	3상	Lmax	0.34[H]
극 수	6/4	Lmin	0.034[H]
정격전압	300[Vdc]	부하토크	$2[Kg \cdot m^2]$
권선저항	3.9[Ohm/상]	고정자 극호	30[Mdeg]
마찰계수	0.0006	회전자 극호	32[Mdeg]
관성모멘트	0.00026	정격속도	3000rpm

6. 결 론

본 연구에서는 각 상이 순차적으로 여자되는 SRM 전동기의 구동특성으로부터 고정된 회전자 위치각의 주기를 검출하여 전동기의 회전속도를 추정하고 제어하였다. 3,000[rpm] 6/4극 전동기를 시뮬레이션함으로써 회전자 주기를 검출하였고, 검출된 주기를 다음상에 연속적으로 적용하여 전동기가 속도 지령에 추종함을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] T.J.E Miler, "Switched Reluctance Motor and Their Control", Oxford University Press, 1993
- [2] Gallegos-Lopez, G., Kjaer, P.C., T.J.E Miller, "A new sensorless method for switched reluctance motor drives", IEEE Trans. on IA, Vol. 34, pp 832-840, July-Aug. 1998
- [3] 엄기명, 송병섭, 김연중외, "속도 센서없는 SRM의 최적제어에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, pp 705-708, 2000
- [4] 김상영, 정윤철, 임준영외, "Switched Reluctance Motor의 Single Position Sensor 구동에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, pp 709-712, 2000
- [5] Kjaer, P.C., Gallegos-Lopez, G., "Single-sensor current regulation in switched reluctance motor drives", IEEE Trans. on IA, Vol. 34, pp 444-451, May/June 1998