

상간중첩을 고려한 SRM의 평활토크 운전

박한웅* · 정기화* · 박진길** · 황영문***
 * 해군사관학교 · ** 해양대학교 · *** 부산대학교

Flat Torque Drives of SRM considering Phase Overlap

Han-Woong Park* · Kee-Hwa Jung* · Jin-Ghil Park** · Young-Moon Hwang***
 *Korea Naval Academy · **Korea Maritime Univ. · ***Pusan Nat. Univ.

Abstract - 본 연구에서는 대표적인 몇가지 경우의 전류크기와 회전자 위치각에 따른 토크값을 직접 측정하고, 이들 값으로부터 연속적인 토크 값을 얻은 후, 이를 이용하여 각 상간 토크의 중첩을 고려한 평활한 토크를 발생시킬 수 있는 전류의 형상을 도출하였다. 이러한 순시적인 전류의 크기를 제어기 위한 순시전압은 PWM으로 제어하였다.

1. 서론

토크 파형은 전류의 형상과 전류의 크기에 상당하는 인덕턴스 프로파일의 관계에 의해 결정된다. 그러나, 일반적인 스위칭 온각제어 및 온, 오프각제어에 의한 단일펄스모드의 구동방식은 비선형적인 인덕턴스의 변화에 대응하는 순시적인 전류의 크기를 제어할 수가 없어 평활토크를 위한 완전한 전류의 형상을 구현할 수가 없다. 따라서 평활토크를 발생하기 위한 전류의 형상을 제어하기 위해서는 각 위치각에 해당하는 전류를 형성하기 위한 순시전압을 제어할 필요가 있다.

본 연구에서는 대표적인 몇가지 경우의 전류크기와 회전자 위치각에 따른 토크값을 직접 측정하고, 이들 값으로부터 퍼지추론 기법을 사용하여 연속적인 토크 값을 얻은 후, 이를 이용하여 각 상간 토크의 중첩을 고려한 평활한 토크를 발생시킬 수 있는 전류의 형상을 도출하였다.

2. 본론

2.1 토크 프로파일

SRM의 주요단점은 기존의 전동기에 비해 소음이나 맥동토크가 크다는 것이다. SRM의 토크맥동의 원인은 토크 발생기구가 매우 비선형적이고 불연속적이기 때문이다.

SRM의 총 토크는 독립적으로 제어되는 고정자 각상의 토크 성분의 합이므로 토크맥동은 고정자의 한 상에서 다른상으로 여자가 전이되는 轉流 순간에 가장 크게 된다.

맥동토크를 최소화하기 위해서는 토크-위치각-전류특성에 의해 최적의 상전류 파형을 결정하는 것이 필요하다.

그림 1은 피시험 전동기에서 일정 전류를 흘렸을 때 각 위치에서 토크를 측정된 파형이다.

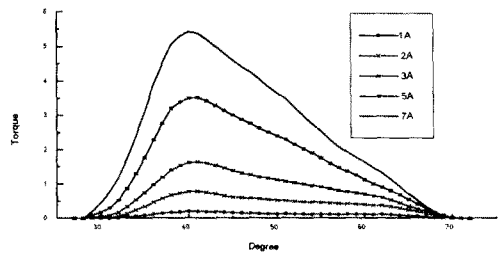


그림 1 일정전류하의 토크 파형

그림 1의 피시험 전동기 토크파형에서 보는 바와 같이 토크 발생영역은 27도부터 71도 까지로 44도의 범위이다.

그림 2는 실제의 토크 측정된 파형을 퍼지추론에 의해 0.1A 단위로 토크 파형을 추론한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 전류값에서 토크의 크기가 회전자 위치에 따라 다르게 나타나고 있다. 따라서 전류 크기별 평활토크를 발생시킬 수 있는 회전자 각도 범위가 달라진다는 것을 알 수 있다.

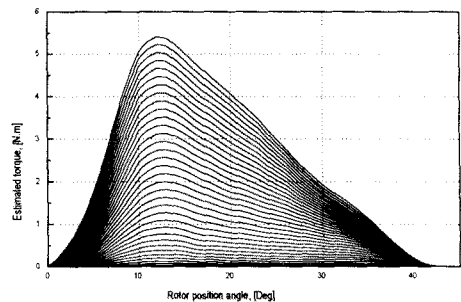


그림 2 0.1A 전류크기 변화별 추론 토크 파형

만일 기준 평활토크에 따라 실제 토크가 추종되도록 제어되는 시스템이라면, 기준 토크는 최대의 평활 토크 발생을 위해서 1 상당 토크의 지령치의 최대값은 토크 프로파일의 값이 최대가 되는 위치각에 있어야 한다. 그러나 이 경우는 토크 프로파일이 좌우 대칭으로 나타날 때만 성립하나, 자기포화의 영향으로 일반적인 토크 프로파일은 그림에서 보는 것처럼 좌우 비대칭이다. 따라서 좌우대칭 정도에 따라 최대 토크를 발생시키기 위해 최대 토크 지령치를 적절하게 이

동하여야 한다. 또한 상간중첩 영역에서 평활토크를 발생하기 위해서는, 이 구간에서의 중첩 상간의 토크의 합이 평활한 지령토크와 같아야 한다.

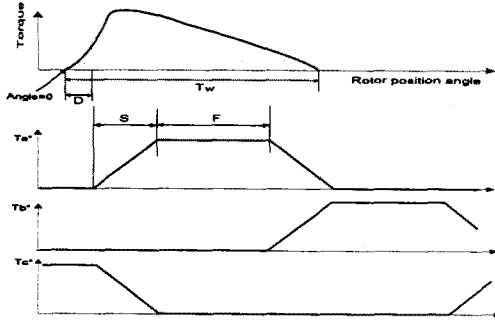


그림 3 지령 토크의 발생 패턴

우선, 위와 같은 평활토크 발생 조건에 의해 한 상의 토크에 대한 토크 지령치를 그림 3과 같은 등변 사다리꼴 형태로 설정할 경우 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$2S + F \leq T_w \quad (1)$$

여기서 S : 토크지령치 증가영역,
F : 토크지령치 평활영역

또한 SRM의 고정자/회전자 극이 6/4일 경우 상간 중첩영역에서 평활토크를 발생하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$S + F = 30 \quad (2)$$

위의 식 (1)과 식 (2)로부터 F와 S의 범위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$0 \leq S \leq 14, \quad 16 \leq F \leq 30 \quad (3)$$

또한 토크 지령치의 시작각(D)에 대한 범위는 S의 범위와 동일하고, 시작각을 최초 토크발생각으로부터 D각도 만큼 지연을 준다면 S, F에 대한 추가조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$2S + F \leq T_w - D \quad (4)$$

따라서 위와 같은 조건하에서, 파라메타의 설정여하에 따라 평활토크를 발생할 수 있는 범위가 결정된다.

2.2 상토크 지령치의 최적설정

본 연구에서는 먼저 시뮬레이션을 통하여 각 파라메타의 설정에 따라 평활 토크의 발생범위와 SRM의 상전류 기울기에 따라 필요한 여자전압의 크기에 대한 영향을 고찰하였다.

그림 3에서 보는바와 같이 평활토크의 발생범위는 D, S, F에 의해 결정되나, 여기서 3 변수중 한 변수는 나머지 두변수의 종속변수로 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 D, S의 설정에 따른 평활토크의 발생범위를 먼저 분석하였다. 그림 4는 최대 평활토크 발생을 위한 지령토크의 D와 S를 설정하기 위해 도식적으로 해석한 것이다.

이상과 같은 위의 조건으로부터 본 실험에 사용된 퍼시엄전동기의 기준 토크 시작 각(θ_1)은 T_{sum} 의 최소

점인 0도에 위치하여야 한다. 그리고 θ_2 는 위의 네 번째 조건에 의해 11도에 위치하여야 하고, θ_3 는 위의 다섯 번째 조건으로부터 30도가 되어야 한다.

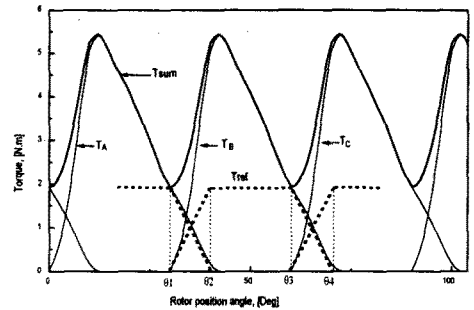
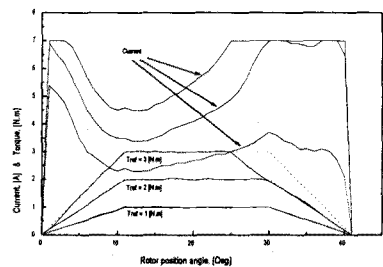


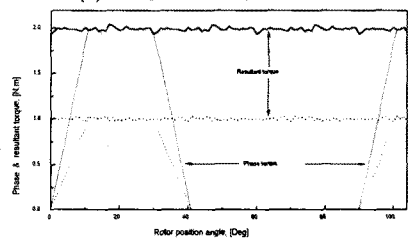
그림 4 최대 평활토크 발생을 위한 지령토크 파형

그림에서 표시한 T_A , T_B , T_C 는 제한전류인 $[A]$ 를 상에 흘렸을 경우 발생하는 토크의 크기를 나타내고 있고, T_{sum} 은 인접한 두상의 상중첩을 고려한 발생토크의 합을 나타낸 것이다. 평활토크 발생을 위한 기준 지령토크 설정시 우선적으로 고려해야 할 것은 아래와 같다.

첫째, 인접한 두상의 기준 지령토크 합의 크기는 상중첩이 고려된 발생토크의 합의 크기보다 작아야 된다. 둘째, 기준 지령토크의 시작 각(θ_1)은 상토크가 발생할 수 있는 영역에 속해야 한다. 셋째, 한상의 기준 토크의 시작 각(θ_1)은 인접한 앞상의 지령 토크의 하강 시작 각(θ_3)과 일치하여야만 한다. 넷째, 기준 토크의 상승 및 하강구간의 기울기는 각 상토크의 상승 및 하강 기울기 중 작은쪽의 기울기보다 커지 않아야 한다. 그렇지 않으면 인접한 두상의 중첩부분에서 평활한 토크의 영역보다 크기가 작거나 커서 맥동토크가 발생한다. 다섯째, 이미 식 (2)에서 기술한 바와 같이 ($\theta_3 - \theta_1$)는 6/4 SRM에서는 30도가 되어야 한다.



(a) 지령토크 및 상 전류



(b) 상토크 및 각상 토크의 합

그림 5 전류 및 토크 파형

그림 5는 본 논문에서 설정한 $D=0$, $S=11$ 및 $F=19$ 인

경우에 지령토크, 상전류, 한상의 토크, 각상의 토크의 합을 나타내고 있다. 그림 (b)로부터 출력토크의 맥동은 약 5%이내가 됨을 알 수 있다.

만일 기준 평활토크에 따라 실제 토크가 추종되도록 제어되는 시스템이라면, 기준 토크는 최대의 평활 토크 발생을 위해서 1 상당 토크의 지령치의 최대값은 토크 프로파일의 값이 최대가 되는 위치각에 있어야 한다.

2.3 실험 결과

본 실험의 목적인 평활 토크를 발생하기 위해서는 SRM의 회전자 위치 및 원하는 토크의 크기에 따라 적절한 전류의 형상이 필요하다.

이러한 전류의 형상을 구현하기 위해서는 순시적인 전류의 크기를 제어할 수가 있는 순시 가변전압원을 인가하여야 한다. 따라서 순시적인 가변전압발생에 강인한 델타변조기법을 통하여 원하는 전류형상을 제어하였다. 이때 델타변조기법에서 전류 밴드폭은 0.4[A]로 설정하였다.

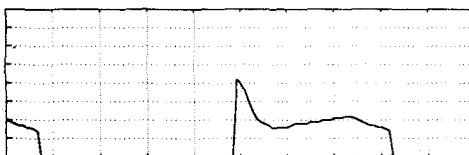
그림 6(a)는 1000[rpm]의 속도에서 부하가 0.5[N.m]인 경우 평활토크를 발생시키기 위해 필요한 기준전류 형상이다. 그림(b)는 실제 구동전류를 측정한 파형이다. 그림에서 보는바와 지령전류에서 확립 및 소호시에 필요한 전류 크기가 작기 때문에 실제구동전류가 양호하게 추종함을 알 수 있다. 그러나 밴드폭이 전류크기에 비하여 상대적으로 상당히 크므로 상 중첩에 의해 발생하는 토크 맥동보다 한 상에 의해서만 발생하는 영역에서 토크 맥동이 크짐을 예측할 수 있다.

그림 5(c)는 3상 상전류파형 데이터와 그림 2.2의 연속적인 전류에 대한 토크 값으로부터 한상 토크 및 총 토크를 계산하여 나타낸 결과이다.

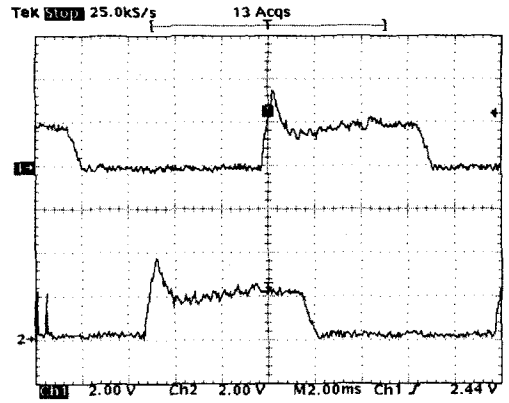
맥동토크의 크기를 영역별로 고찰해보면, 한 상의 토크지령치가 일정한 영역에서 상대적으로 큰 맥동토크가 발생하고 있다. 이는 인덕턴스의 기울기가 크기 때문에 전류변동분이 토크의 변동에 영향을 크게 미치기 때문이다.

지령전류에서 확립 및 소호영역에서는 인덕턴스의 기울기가 상대적으로 작기 때문에 전류밴드폭에 의한 토크의 변동분이 적으므로 한 상의 토크 지령치가 일정한 영역보다 상대적으로 작게 나타난다.

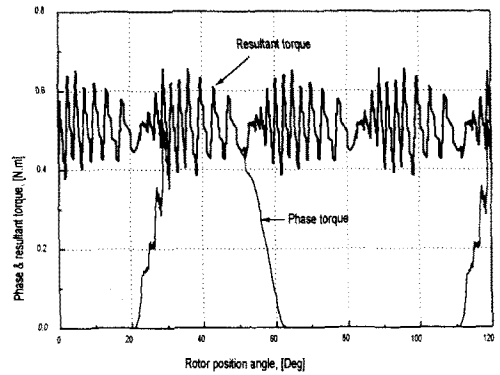
이러한 사실로부터 예측할 수 있는 것은 지령토크가 적은 경우에는 상 전류 확립 및 소호시에 발생하는 맥동토크보다는 전류제어기의 밴드폭에 의해 나타나는 맥동 토크가 전체 맥동토크의 주된 원인이 됨을 알 수 있다. 이 그림으로부터 맥동토크는 약 20[%]로 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 이 맥동을 저감하기 위해서는 전류 밴드폭을 줄이므로써 가능하나, 이는 스위칭 주파수를 높게하여 전체시스템의 효율저감을 초래하는 단점이 있다. 따라서 밴드폭은 이러한 관점에서 적절한 절충이 필요하다.



(a) 지령전류 파형



(b) 측정 전류파형



(c) 토크파형

그림 6 1000[rpm], 0.5[N.m]인 경우의 지령 및 실제 상전류와 토크파형

3. 결론

본 연구에서는 SRM의 맥동토크 저감을 위해 토크 크 프로파일로부터 직접적으로 토크에 해당하는 전류 값을 구함으로 원하는 토크에 대한 비선형 수식을 제거할 수 있었다. 또한 각 상간 토크의 중첩을 고려한 평활한 토크를 발생할 수 있는 전류의 형상을 도출하였다. 이러한 순시적인 전류의 크기를 제어기 위한 순시 전압은 PWM으로 제어하였다. 그 결과 전류제어기의 스위칭 주파수가 어느정도 크면 양호한 평활 토크를 얻을 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] W.F.Ray, R.M. Davis, P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, N.N.Fulton and R.J.Blake: "Switched reluctance motor drives for traction: a second review," Proc. IEE, Vol.131, Pt-B, No.5, pp.220-225, 1984.
- [2] R.M.Davis W.F.Ray and R.J.Blake: "Inverter drive for switched reluctance motor: circuits and component ratings," Proc. IEE Vol.128, Pt-B, No.2, pp.126-136, 1981.