

광파이버 자이로콤팘스 시스템을 위한 스텝핑모터의 안정화

권용수, 정 삼
해군사관학교

A Stabilisation Scheme of a Stepping Motor for a Fiber Optic Gyrocompass System

Yongsoo Kwon, Sam Jung
Naval Academy

Abstract - This paper describes a study of a stabilisation scheme of a stepping motor in the driving systems of the Fiber Optic Gyrocompass absolutely required a constant speed and a precise position control with fine step angle. The new stabilisation scheme combining microstepping control and frequency modulation is developed which enables the experimental machine to be capable of stable running to a stepping frequency in the range 5 times the open-loop stall frequency.

1. 서 론

기존의 자이로는 고도의 기계식 정밀부품으로 가격이 비싸고, 기동시간이 길며, 전력 소모면에서 큰 단점을 지니고 있는 반면 Sagnac 효과를 이용한 광파이버 자이로(Fiber Optic Gyro : FOG)는 소형으로서 저가격, 저전력 소모, 속응성, 무보수의 측면에서 산업 및 군사적 목적으로서의 실용화 요구가 높아지고 있다.

본 연구는 지구자전율을 검출하여 지구의 방위를 알 수 있는 광파이버 자이로콤팘스 시스템의 개발 단계중 FOG센서의 구동모터로 선정된 스텝핑모터의 안정화에 대한 연구이다. 선정된 스텝핑모터는 FOG 센서 및 부가적인 전자회로의 특성상 정속, 저진동, 및 1,000 pps 이상의 중속영역 운전을 필요로 한다. 이러한 관점에서 저진동 및 미세위치 제어가 가능한 미세스텝 제어방식과 저자에 의해 기발표된 중속영역 안정화회로를 결합한 하이브리드형의 새로운 스텝핑모터 안정화시스템을 광파이버자이로 센서의 구동 방안으로 제안한다.

2. 스텝핑모터의 불안정 해석

일정한 크기의 진동을 갖는 진동 성분이 정상 동기 회전에 중첩된다라는 가정하에 회전자의 위치 변동은

다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta(t) = \omega_0 t - \delta + \theta_0 \sin \alpha t \quad (1)$$

이러한 가정하에 불안정 동작을 나타내는 다음과 같은 3개의 비선형 연립방정식이 얻어진다.

$$T_L + K_v \omega_0 - T_o(\theta_0, \alpha, \delta, \omega_1) = 0 \quad (2)$$

$$K_v \theta_0 \alpha - T_d(\theta_0, \alpha, \delta, \omega_1) = 0 \quad (3)$$

$$J_r L \theta_0 \alpha^2 + T_s(\theta_0, \alpha, \delta, \omega_1) = 0 \quad (4)$$

주어진 시스템 파라미터와 입력주파수 ω_1 에 대해 식(2)-(4)의 비선형 연립방정식을 수치적으로 계산함으로써 동적불안정 특성을 알 수 있다. 모터의 불안정 특성을 나타낼 수 있는 또 다른 하나의 대체 방법은 뎁핑토크를 이용하는 방법으로 식(5)은 $K_d = -T_d/\theta_0 \alpha$ 에 의해 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$K_v + K_d(\theta_0, \alpha, \delta, \omega_1) = 0 \quad (5)$$

여기서, K_d 는 뎁핑토크계수를 나타내며 양의 값은 양의 뎁핑토크값을 의미한다. 이 식은 뎁핑토크 계수가 음이고 크기에 있어 점성마찰계수 K_v 에 의해 생기는 양의 뎁핑과 같을 경우 일정한 크기의 진동이 존재함을 나타낸다. 즉, 모터의 동적 불안정은 유효 뎁핑토크계수 $K_v + K_d$ 에 의해 정해진다. 그 값이 양이면 진동은 일정하게 유지되지 않고 $K_v + K_d$ 에 의해 정해지는 비율로 감소하여 시스템이 안정하게 되며, 만약 음이면 진동이 증가하는 결과를 낳는다.

미소 회전자 진동과 $\omega_1 \gg \alpha$ 를 만족하는 '이상적인 관성 부하'라는 가정할 때 주파수 변조에 기인하는 부가적인 뎁핑토크계수에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$K_{d'} = -\frac{PL_1 N_r V_1^2 K_V}{4r^4 K_L^2} \cdot \frac{\sin \gamma}{\alpha} \cdot \left[\frac{G_r \cos(N_r \delta - \zeta)}{(1 + \Omega_1^2)(1 + (2\Omega_1)^2)} \right] \quad (6)$$

여기서

$$\zeta = \tan^{-1} \left[\frac{2K_L^2 \Omega_1 (1 + (2\Omega_1^2) + 2\Omega_1^2)}{2K_L^2 (1 + (2\Omega_1^2)) + \Omega^2} \right]$$

$N, \delta - \zeta < \pi/2$ 의 조건 하에서 $\sin \gamma / a$ 이 음의 최대 일 때 K_{df}' 은 최대가 된다. 더욱이 털출 토크까지의 모든 부하에 대해 $\cos(N, \delta - \zeta) > 0$ 이므로 적절하게 γ 값을 선정하면 언제나 양의 램핑토크 계수의 값을 얻게 되어 모터가 안정하게 된다. 식(6)에 의해 주어진 일반적인 관계는 $-180^\circ < \gamma < 0^\circ$ 일 때 K_{df}' 은 양이되며, $0^\circ < \gamma < 180^\circ$ 인 경우는 K_{df}' 는 항상 음이 된다.

3. FOG 콤파스 시스템 안정화

3.1 광파이버 자이로콤파스 시스템 특성

FOG센서는 매우 민감하기 때문에 고정도의 정속 운전이 필수적이다. 회전 각속도의 변동에 대한 주 원인은 모터 자체에 가해지는 전기적인 원인 이외에도 FOG시스템의 구성에 따른 기계적인 요인을 많이 내포하고 있다. 회전원판은 높은 관성력으로 회전의 균일성을 얻을 수 있으나, 회전원판 재질의 밀도가 균일하지 못할 때에는 편심으로 인한 회전 불균형으로 인하여 오히려 속도 변동을 더 악화시킬 수 있다. 또한 회전판과 FOG센서 사이의 축의 기울어짐, 그리고 베어링의 마찰 저항도 하나의 원인이 될 수 있다. 그러므로 random walk 잡음, 회전각 속도의 변동 및 전체 시스템진동 등을 고려한 FOG의 출력신호에 대한 표현식 U_e 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_e = (1 - \sin \theta_e) k \cos \theta_e \Omega_e [J_0 \sin(\omega_0 t + \phi_e') + \sum_{m=1}^{\infty} J_m [\sin((\omega_0 + ma)t + \phi_e') + \phi_e')] + (-1)^m \sin((\omega_0 - ma)t + \phi_e')]] + kR(t) + kV(t) \quad (7)$$

여기서, 식(7)의 첫 번째 항에 대한 Random walk 노이즈인 $R(t)$ 와 시스템 자체 진동인 $V(t)$ 의 상대적인 영향은 FOG시스템의 최적 설계에 의해 크게 좌우되며, 만족스런 FOG 구동시스템의 경우는 첫 번째 항이 자이로스코프 출력에 있어 지배적이다. 식(7)에서 알 수 있듯이 FOG 출력에는 순수한 FOG 출력신호 이외도 다른 많은 성분이 노이즈로 구성된다. 미소각 운동 변화에 대한 검출 시 움직임에 따른 순수 FOG 출력신호 자체가 노이즈에 비해 상대적으로 매우 적으며, 특히 지구의 자전율($15.04^\circ / h$)을 감지하여 North finder의 기능을 지닌 자이로 콤파스시스템에 적용시에는 움직임 자체가 매우 미약하기 때문에 노이즈 자체가 지배적인 출력성분이 된다. 실험에 사용된 FOG센서 VG910과 VG951의 지구자전율에 의한

검출량은 각각 0.17[mV], 0.92[mV]로서 랜덤 노이즈, 바이어스 드리프트, 특히 시스템 진동에 기인하는 노이즈보다 적게 나타나고 있다. 그러므로 그림 1에서와 같이 변조에 의해 FOG 출력신호를 보다 좋은 S/N비를 얻을 수 있는 주파수 영역으로 이동시킨 후 복조시켜야 한다. 그러나 FOG 출력에 중첩되어 나타나는 노이즈 성분의 상대량을 근원적으로 최소화시키기 위해서는 FOG 출력의 노이즈에 있어 지배적인 요인이 되는 구동모터의 안정화가 절대적이다.

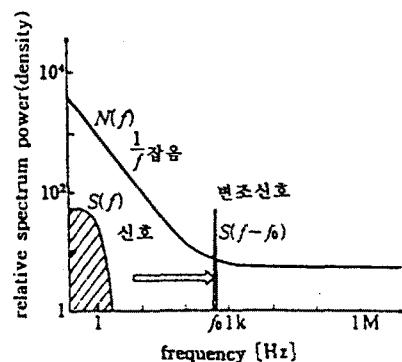


그림 1. 1/f 잡음과 신호의 변조에 따른 주파수 이동

3.2 스텝핑모터의 안정화

미세스텝 구동은 스텝핑모터의 여자권선에 흐르는 전류를 미세스텝으로 제어하므로 스텝각 크기 자체가 크게 축소되어 저속 운전영역에서 진동 및 소음이 크게 감소되며, 미세각도까지 정확히 위치제어가 가능하다. 또한 중속불안정은 속도의 증가에 비례하고 진동크기가 급격히 커져 동기상실과 같은 심각한 문제점을 야기한다. 반면에 주파수변조에 의해 스텝핑모터를 구동시키는 경우, 주파수변조 신호위상각 γ 가 음일 때 램핑토크계수 K_{df}' 는 항상 양이 되어 안정하게 운전시킬 수 있다. 최근 주파수 변조에 의한 스텝핑모터의 구동특성에 관하여 전류파형에 대한 종합적인 해석[2]에서 switch off와 switch on 전전류파형의 변조성분이 회전자 진동속도에 대해 각각 $\pm \pi/2$ 의 위상차를 갖는 것을 밝혔다. 변조진폭이 음일 때 진폭변조 전전류의 포락선은 속도 진동보다 $\pi/2$ 만큼 앞선다. 그러나 변조성분이 양일 때는 전전류 변조파형의 포락선이 속도진동보다 $\pi/2$ 만큼 뒤진다. 이것은 반전 전전류파형의 상축 변조포락선이 스텝핑모터를 안정하게 운전할 수 있는 매우 강력한 신호임을 나타낸다. 더욱이 FOG구동용 모터가 FOG자체의 특성상 중속영역 이상의 고속운전을 필요로 하기 때문에 고정도의 위치제어 능력을 지닌 미세스텝제어와 중속불안정 해소를 할 수 있는 주파수변조에 의한 구동의 혼합 방식은 중요한 의미를 지닌다.

그림 2는 이러한 개념으로 본 광파이버자이로 콤파스시스템을 위한 안정화회로의 블록선도이다. 안정화 신호원으로서의 전전류파형은 효율효과를 이용한 전류센서를 사용하여 얻었다. 직류성분을 포함하는 센서의 출력전압 신호는 전전류 파형에 비례한다. 직류성분은 전류센서와 포락선검출기 사이의 교류 반전증폭기에 의해 제거된다.

교류 반전증폭기의 출력은 다이오우드 검출회로를 사용하여 파형의 포락선을 검출한다. 검출회로를 지난 출력신호는 다시 스텝핑주파수 성분을 제거하기 위한 저역통과 필터를 통과시킨 후 신호 발생기의 주파수변조 입력으로 사용되기 위하여 적절히 증폭 시킨다.

안정화회로의 개발상 부딪히는 주요 문제는 저역통과 필터의 파라미터에 대한 설정이다. 저역필터의 설계시 나타나는 위상뒤집이 앞에서 언급된 안정화 운전영역의 범위를 벗어나지 않도록 해야만 한다.

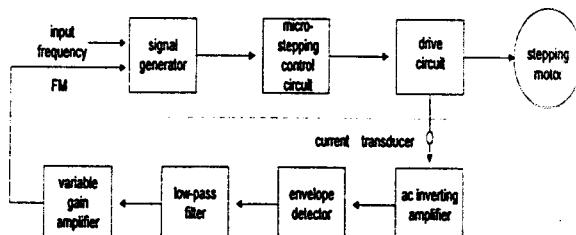


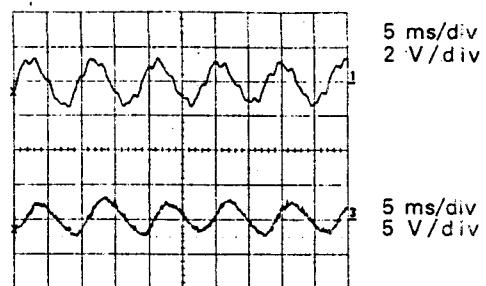
그림 2. 안정화 시스템 블록선도

4. 실험결과 및 검토

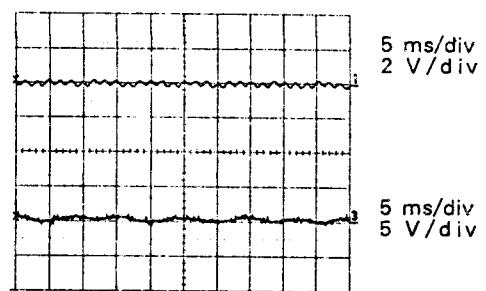
회전자의 속도파형은 타코미터를 사용하여 측정하였다. 측정된 파형에 의하면 불안정 운전시 일정한 크기의 속도진동이 정상상태 동기 속도에 충첩된다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 중속 불안정의 중요한 특성중의 하나이다. 전류 파형은 안정화 시스템에 사용된 전류센서를 사용하여 간단히 측정했다. 전전류 파형의 하측 포락선을 반전시키는 경우 전전류 파형이 회전자 속도 보다 약 $\pi/2$ 의 위상뒤집을 알 수 있다.

그림 3은 불안정 운전영역에서 그림 2의 안정화 시스템을 적용하여 운전시킬 때 얻어진 파형이다. 실험으로부터 얻어진 그림 3(b)는 가변이득증폭기 출력을 클록펄스 발생기의 FM 입력단에 연결하였을 때 파형이며, 전류와 속도에 충첩되어 나타났던 진동성분은 사라지고 운전이 안정됨을 나타내고 있다.

개투프의 구동방식을 사용하여 정격전류(3.5 A/Ph)로 운전되는 실험모터인 2상 하이브리드 스텝핑모터의 경우 1.025 pps 부근에서 정지되었으나, 제안된 안정화 회로를 사용한 구동시스템은 5.130 pps까지 안정된 운전이 가능했다.



(a) FM 연결전



(d) FM 연결후

그림 3. 회전자의 속도(상단)와 전류파형(하단)
($V/r = 3.5$ [A], 588 [pps])

5. 결 론

광파이버 자이로콤파스 시스템의 개발 단계중 FOG센서의 구동모터로 선정된 스텝핑모터의 안정화에 관한 연구를 했다. 선정된 스텝핑모터는 FOG 센서 및 부가적인 전자회로의 특성상 정속, 저진동, 및 1,000 pps 이상의 중속영역 운전을 필요로 한다. 이러한 관점에서 저속에서 중속까지 광범위한 영역에서 운전 가능하며, 저진동 및 미세위치 제어가 가능한 미세스텝 제어방식과 중속영역 안정화회로를 결합한 하이브리드형의 새로운 스텝핑모터 안정화 시스템을 광파이버자이로센서의 구동방안으로 제안했으며, 실험을 통하여 효율성을 입증했다.

(참 고 문 현)

- [1] 권용수, "주파수변조 구동에 의한 가변릴럭턴스 스텝핑모터의 불안정 해석", 하계학술대회논문집A, 대한전기학회, pp.114-118, 1994.
- [2] 권용수, "가변릴럭턴스 스텝핑모터의 전류파형 해석", 하계학술대회 논문집A, 대한전기학회, pp. 116-118, 1995.