

# PLL을 이용한 SRM의 동기화 강화에 대한 연구

오석규<sup>\*</sup>, 이성두<sup>\*</sup>, 안진우<sup>\*\*</sup>, 황영문<sup>\*</sup><sup>\*</sup> 부산대학교, <sup>\*\*</sup> 경성대학교

## Study on Strengthened Synchronization of SRM Using a PLL

Seok-Gyu Oh<sup>\*</sup>, Seong-Du Lee<sup>\*</sup>, Jin-Woo Ahn<sup>\*\*</sup>, Young-Moon Hwang<sup>\*</sup> Pusan Nat'l University, <sup>\*\*</sup> Kyungsung University

**Abstract** - This paper suggestes a SRM drive scheme which include power angle control like synchronous machine and a Phase Locked Loop(PLL) control. The power angle control scheme regulates instantly dwell angle as load torque variation, but this is some disadvantages which are losing of synchronism and hunting when load changes abruptly. To increasing synchronization, the Phase Locked Loop control scheme is adopted.

### 1. 서론

회전기의 토오크발생은 릴럭턴스토오크(resistive torque)와 상호토오크(mutual torque)로 나눌 수 있다. 그러나 대부분의 회전기는 두자체의 상호토오크를 이용하는 방식을 채택하고 있다. 릴럭턴스토오크를 활용하는 대표적인 회전기는 VR형 소형 스텝핑 전동기이다. 그리고 1980년대부터 전력용 반도체의 비약적인 발전으로 스텝핑 전동기와 유사한 고출력, 고속의 SRM(Switched Reluctance Motor)의 개발, 실용화되고 있다[1].

SRM은 비교적 간단한 구조로 저가의 제작비와 열전달특성이 우수하고 높은 효율과 속도를 가지는 장점으로 활발히 연구되고 있다. 그러나 SRM은 자기회로의 포화로 인해 속도나 토오크제어시 인덕턴스값이 전류와 각도에 따라 비선형적으로 변하기 때문에 연산으로서 구하기가 어렵다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 동기기의 전력각(power angle)제어를 도입하여 간단하게 실현이 가능하다[2]. 그러나 이와 같은 방법도 속도나 토오크가 급하게 가변하면 탈조(losing of synchronization)나 동기기의 난조(hunting) 등의 문제점을 안고 있다.

이러한 문제점을 보완하기 위하여 위상동기루프(PLL, Phase Locked Loop)의 제어방식을 도입하였다. 위상동기루프는 오랜동안 통신시스템으로써 이용되어 왔으나 1970년대 초에 직류전동기를 중심으로 한 전동기의 속도제어에 사용되어 안정된 동작특성을 보여주고 있다[3,4].

본논문에서는 전력각제어방식을 이용하여 연산장치없이 토오크변화시 즉각적으로 도통각이 변화하여 일정속도를 유지하도록

하고 이때 발생되는 동기화의 탈조나 난조 등의 문제점을 보완하기 위하여 직류기의 속도제어에 우수한 성능을 가지고 있는 위상동기루프 방식을 이용하여 동기화를 강화시켜 보다 안정된 동작특성을 보이고자 한다.

### 2. SRM의 동기화

#### 2.1 전력각 제어방식에 의한 동기화

동기전동기에서는 부하토오크가 증감하면 상차각의 증감이 생기게 되고 이것의 정현값에 비례하는 토오크출력을 갖게 함으로서 속용성이 빠른 대응을 하게 된다. 이러한 원리를 도입하여, SRM 드라이브에서는 부하토오크가 증감하는 데 따라 advance angle이 순시 증감하게 하는 조정장치를 구현하게 되면 스윗칭 전류 도통각이 증감되고 동시에 순시 전류의 자승에 비례하는 효과적인 토오크출력을 갖게 하여 전동기의 동특성을 향상시킬 수 있게 될 것이다.

SRM의 전압방정식 및 토오크식은 다음과 같다.

$$V = [r + \omega \frac{d}{d\theta} L(\theta)] \cdot i + L(\theta) \frac{di}{dt} \quad \dots \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad \dots \quad (2)$$

여기서  $i$  와  $L(\theta)$ 은 각각 회전자 위치각  $\theta$ 에서의 고정자 상권선의 전류와 자기인덕턴스 값이 나타내고 있다. 식 (1)의 우변 두 번째 항,  $[i \cdot \omega \frac{d}{d\theta} L(\theta)]$ 은 인덕턴스변화에 의한 속도 기진력이며, 세 번째 항,  $[L(\theta) \frac{di}{dt}]$ 은 전류변화에 의한 리액티브 전압이다. 이때 해석을 간단하게 하기 위하여 식 (1)에서 상자제,  $r$ 는 무시하고 상전류,  $i$ 를 평활전류(flat-topped current)[6]라 가정하면 토오크발생구간에서  $di/dt$ 가 0이 되므로 이때의 전압방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = I_f \cdot \omega \frac{d}{d\theta} L(\theta) \quad \dots \quad (3)$$

여기서  $I_f$ 는 평활전류이다.

식 (3)에서 평활전류는 속도를 가변하여도 그에 비례하는 입력전압을 제어함으로써 유지시킬 수 있다. 이 때  $I_f$ 는 식 (4)에서와 같이 advance angle,  $\theta_A$ 에 비례한다. 즉

$$I_f = \theta_A \frac{V}{\omega \cdot L_{\min}} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

여기서,  $L_{min}$  은 최소 인덕턴스이다.

상전류가  $I_f$  일 때 발생하는 토오크는 식 (2)에 식 (4)를 대입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \cdot \theta_A^2 \left( \frac{V}{\omega \cdot L_{\min}} \right)^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad \dots \quad (5)$$

식 (5)에서와 같이 토오크는 advance angle,  $\theta_A$ 을 제어함으로써 발생시킬 수 있으나 실제 제어에 있어서 부하토오크의 변화에 대응하는 스위치각을 결정할 때 인더턴스 기울기( $dL(\theta)/d\theta$ )의 비선형성과 순시 회전자속도의 변화 때문에 일의적으로 스위치각을 정하기는 어렵다.

그림 1은 일정속도에서 부하토오크의 변동에 도통각, dwell angle 이 가변하여 일정속도를 계속 유지하는 제어개념도를 보여주고 있다. 여기서 도통각은 스위치 온과 스위치 오프 사이각

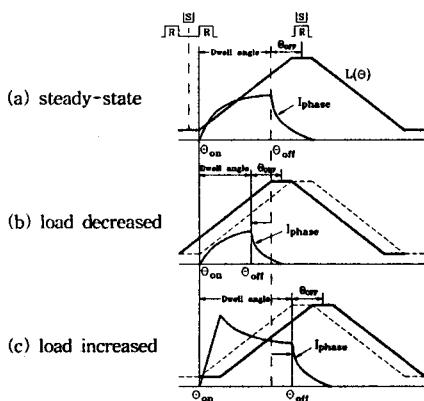


그림 1 부하변동에 따른 도통각의 조정 (a) 정상운전상태,  
 (b) 부하가 감소할 때, (c) 부하가 증가할 때

을 나타내고 있으며, 스위치 온신호는 속도지령에 비례하여 발생되는 펠스의 상승에지(edge)에 의해 스위칭된다. 스위치 오프각은 고정자극과 회전자극이 정렬되었을 때를 기준으로 하여 스위치 오프시점의 여자된 고정자극과 회전자극과의 사이각,  $\theta_{OFF}$ 이고 이때 이 각은 고정되어 있다. 그림 1(b),(c)에서 점선으로 표시된 인덕턴스 프로필은 부하토오크가 변하기 이전, 즉 그림 1(a)의 인덕턴스 프로필을 각각 표시하고 있다.

그림 1(a)는 부하토오크와 발생토오크가 평형을 이루고 있는 안정된 운전상태를 보여주고 있다. 이때 부하토오크가 갑자기 감소하면 발생토오크가 부하토오크보다 더 커져 순간적으로 회전자속도가 빨라진다. 회전자속도가 빨라진 만큼 회전자 위치센서로부터 나오는 스위치 오프신호는 시간적으로 앞서 발생하여 신호주기가 조금 빨라지나, 스위치 은신호의 주기는 일정하여 스위치 오프신호의 주기가 앞당겨진 만큼 도통각이 작아지고 발생토오크도 작아진다. 반대로 부하토오크가 증가하면 그림 1(c)

와 같이 도통각이 넓어지게 되어 발생토오크가 증가한 부하토오크에 대응된다.

운전속도를 가변할 때에는 스위치 오프신호의 주기가 가변되는 토오크제어와 달리 스위치 온신호의 주기를 가변시킴으로써 도통각을 변화시킨다.

## 2.2 위상동기루프를 이용한 동기화 강화

위상동기루프원리는 오랜전부터 통신시스템에 사용되어 왔으나 1970년대에 와서 반도체소자의 발달과 더불어 전동기의 속도제어시스템으로서 사용되기 시작하였다[3,4]. 이 위상동기루프는 전동기 회전자의 속도변동, 이를바 회전불균일을 없애기 위해서는 높은 주파수성분에 대해서는 프라이휠 효과를 이용하고 낮은 주파수성분에 대해서는 동기모터, 정속성을 좋게 하도록 하는 역할을 한다.

위상동기투프는 위상비교기(phase comparator), 투프필터(loop filter), 그리고 전압제어발진기(VCO, Voltage Control Oscillator)로 구성되어 있으나 이를 전동기 속도제어에 적용하기 위한 위상동기투프는 전압제어발진기 대신에 전동기와 드라이브회로 그리고 전동기의 속도를 나타내기 위한 엔코더로 대체된다. 그 기본적인 회로는 그림 2 과 같다.

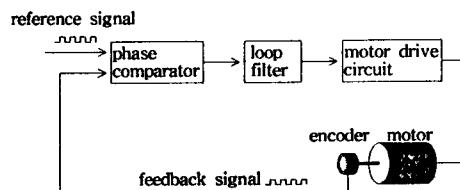


그림 2. 기본적인 위상동기투프의 구성도

그림 2에서 위상비교기는 기준신호와 피드백신호의 주파수 차이와 위상차이에 비례하는 전압으로 나타내고, 이 전압의 고주파성분은 투프필터에 의해 제거되고 이 출력전압은 전동기 드라이브회로의 제어신호로 들어간다. 전동기 구동회로는 전압 혹은 전류를 가변하여 전동기에 전류를 흐르게 한다. 즉, 회전자의 회전위치각을 그에 대응한 펄스로 변환하고, 그 이상각과 기준신호의 위상각의 차를 검출해서 그 차에 비례한 크기로 또한 방향이 반대 즉, 위상차를 없애는 방향으로 회전자를 복원시키는 위해 필요한 토오크를 발생시키는 것이다.

따라서 전력각 제어방식은 기준신호의 펄스와 회전자위치신호의 펄스를 이용하여 동기시킴으로 이 두펄스신호를 위상동기루프의 입력신호로 사용할 수 있고 그 출력을 입력전압을 제어하는 제어신호로 사용하여 동기화를 강화시킬 수 있다.

### 3. 시스템의 구성 및 실험결과

동기기의 전력각 제어방식을 이용하여 연산장치 없이 부하의 변화에 도통라이 즐각적으로 변함으로써 속응성을 가지게 되고

위상동기류프제어방식을 결합시킴으로써 보다 안정된 속도 및 토크오크제어를 행할 수 있다. 이와 같은 제어방식을 구현하기 위한 시스템의 구성은 그림 3 와 같이 한다.

그림 3에서 속도동기화기(A)는 속도지령신호와 회전자 위치센서(D)에서 나온 회전자위치 신호를 받아 동기시키며 동기된 신호에 의하여 만들어진 신호는 위상동기류프의 위상검출기(B)와 전력각제어기(C)로 보내어 저 펄스신호를 만든다. 이때 동기화된 속도,  $\omega_m$  는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\omega_m = \frac{f_{ref} \cdot 60}{q \cdot N_r} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

여기서  $f_{ref}$  는 펄스의 주파수,  $q$  는 상수,  $N_r$  은 회전자극수이다.

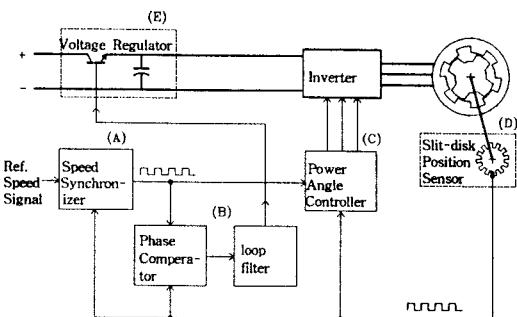


그림 3 전력각 제어방식에 PLL방식을 결합한 가변 도통각 시스템의 구성

위상비교기(B)는 속도동기화기(A)의 출력펄스신호와 회전자 위치센서(D)의 회전자속도에 비례하여 발생하는 펄스신호를 입력으로 하여 두신호의 위상차에 비례하는 전압을 출력한다. 루프필터는 저역필터로서 잡음을 제거한다. 이 출력전압을 입력전압조정기(E)의 제어신호로 사용하여 탈조나 난조를 완화시킨다.

전력각제어기는 스위칭 신호를 만들어 인버터를 동작시키는 역할을 하며 그림 4는 제어신호들과 한 상의 상전류형을 보여주고 있다. 그림 4(a)는 그림 3에서의 속도동기화기(A) 출력신호로서 속도지령신호에 비례하여 발생되는 펄스파형이며 이 펄스파형의 상승 에지(edge)가 도통각의 스위치 온신호로 동작하며 그림

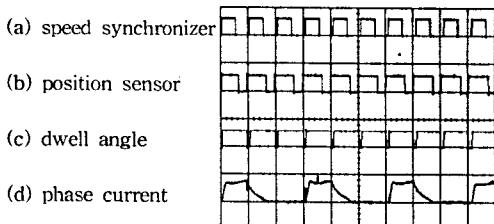


그림 4 제어신호들과 상전류파형 (a) 속도동기화기신호, (b) 회전자 위치신호, (c) 도통각 신호, (d) 상전류파형

4(b)는 회전자위치센서(F)에서 회전자속도에 주파수가 비례하여 출력되는 펄스파형으로서 상승 에지가 도통각의 스위치 오프로

작용한다. 그림 4(c)는 도통각신호로서 그림 4(a), (b)의 펄스신호가 조합된 3 상의 스위칭신호이다. 그리고 그림 4(d)는 그림 4(c)의 스위칭신호에 의해 상권선에 인가되는 한 상의 전류파형을 보여주고 있다. 여기서 부하가 일정할 때 그 부하에 대응하는 도통각을 가지고 일정한 속도로 회전하고 있음을 알 수 있다.

그림 5 은 1000rpm에서 부하토오크를 증가시켰을 때 도통각의 변화를 보여주고 있다. 부하토오크가 변하기 이전에는 일정한 도통각으로 동작하다가 부하가 증가함에 따라 점차 도통각이

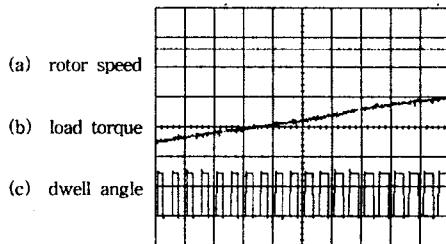


그림 5 부하토오크를 증가시켰을 때의 도통각의 변화  
(a) 회전자속도, (b) 부하토오크, (c) 도통각

넓어지거나 회전자 속도는 계속 일정하게 된다. 이 때 스위치 온각의 주기는 일정하나 스위치 오프각의 주기는 부하의 증가에 따라 늦어져 결과적으로 도통각이 넓어짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 SRM의 가변 인덕턴스의 비선형성으로 인한 SRM의 동특성을 개선하기 위하여 동기기의 전력각 제어개념을 도입하여 일정속도에서 부하토오크가 변동하면 별도의 연산장치 없이 즉각적이고 자동적으로 도통각이 조절되어 평형상태를 이루도록 하였고 또한 위상동기류프를 결합하여 동기화를 더욱 강화시켜 보다 안정된 동작특성을 갖도록 하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P.J. Lawrenson, J.M. Stephenson, P.T. Blenkinsop, J.Corda, and N.N. Fulton "Variable-Speed Switched Reluctance Motors", in Proceedings. of IEE, pt. B, vol. 127, no. 4, pp. 253-265, July 1980
- [2] S.G. Oh, J.W. Ahn, S.J. Seong, and Y.M. Hwang, "A Novel Control Scheme for Low Cost SRM Drive", Proc. of ISIE'95 Athens, pp.278-283, July 1995
- [3] A.W. Moore, " Phase Locked Loops for motor speed control", IEEE Spectrum, vol. 10, pp.66-67, Apr. 1973
- [4] D.M. Smithgall, "A Phase Locked Loop Motor Control System", IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., vol. IECL-22, pp.487-490, nov. 1975.