

SRM의 고효율구동을 위한 가변 스위칭각 조정방식

김정홍*, °공관식*, 안진우**, 황영문*
 * 부산대학교, ** 경성대학교

Adjustable Switching Angle Control Method for High Efficiency SRM Drive

JeongHong KIM*, °GwanSik KONG*, JinWoo AHN**, YoungMoon HWANG*
 * Pusan National Univ., ** KyungSung Univ.

Abstract

This paper describes an adjustable switching angle control method of Switched Reluctance Motor to improve the drive efficiency when variable loads applied. The control method to build-up optimal current shape is intended to improve the efficiency of SRM over the wide range of output power without requiring additional power devices, which gives more economic benefits compared with any other control methods.

1. 서 론

Switched Reluctance Motor(SRM)의 토오크는 자기회로의 릴럭턴스의 변화에 의해 발생되며 효과적인 정토크의 생성과 역토크의 역제를 위하여 고정자의 각 상에 회전자의 위치각도에 따른 적절한 스위칭을 필요로 한다. 동시에 스위칭에 의한 SRM의 전류파형은 출력토크발생 및 포화철손유발에 직접 관련되므로 전도효율에 직접적인 영향을 갖는다.

실제로 SRM은 충분한 전류의 확립을 위하여 토오크가 발생하는 구간에 앞선 구간에서 전류가 흐르도록 스위칭해야 하며, 스위치-오프 이후의 구간과 부하토크크가 클 때 전류는 지속되지만 자기회로의 Bulk포화현상 때문에 토오크가 발생하지 않는 구간이 생길 수 있다. 이러한 토오크가 발생하지 않는 구간에서의 전류는 리액티브성분으로 효율저하를 가져다 줄 것이므로 운전중의 가변부하에 대하여 효율을 향상시키려면 각 가변부하에 맞는 스위칭각도의 조정이 필요하다.

가변부하에 따른 적정전류파형의 형상은 전동기의 고효율운전을 실현하기 위하여 적절한 가변 스위칭각도조정을 필요로 하며 기존의 고정 스위칭각도에 의한 운전방식보다는 광범위한 출력범위에서 효율향상을 이루게 할 것이다.

본 논문에서는 고효율운전을 위하여 가변부하에 따른 적정스위칭각도를 해석하며 최적의 전류형상을 도출하고 그에 맞는 스위칭각도의 적정제어방식을 제안하였다. 적정스위칭각

도조정방식은 추가적인 전력스위칭소자나 전력장치를 갖지 않고도 효율향상을 이룰 수 있는 운전제어방식이어서 시스템이 간단하여 실용성이 매우 높다.

본 스위칭조정방식은 3HP급 6/4 SRM에 제안된 제어방식의 제어기를 적용하여 광범위한 출력범위에서 전동기의 고효율운전이 가능함을 실증하였다.

2. 고효율구동을 위한 스위칭각도 제어

전동기의 구동효율을 높게 하기 위해서는 부하가 변하더라도 토오크발생구간내에서 항상 전류의 형상이 Flat-top이 되도록 스위칭각도를 제어하면 고효율구동을 할 수 있게 된다. Flat-top전류는 부하가 변화에 따라 Advance각도, θ_{AD} 의 크기와 회전극위치각인 스위치-오프각, θ_{off} 를 동시에 적절하게 조정해 주면 실현할 수 있다.

2.1 적정 Advance각도, θ_{AD} 제어

토오크발생구간에서는 가변부하에 따라서 Flat-top전류, I_f 의 확립을 위하여 Advance각도를 가변조정해야 한다. 요구되는 전류, I_f 와 확립하기 위한 Advance각도와와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_{AD} = \frac{\omega L_{min}}{E} I_f \quad (1)$$

ω : 회전각속도, E: 전압, L_{min} : 최소인덕턴스

가변부하에 따라서 Advance각도를 제어하기 위해서는 부하전류를 검출하여 간단한 피드백회로를 구성한다. 실제로는 펄스형태의 전류를 검출하는 것은 어렵고 그에 비례하는 직류 링크전류, I_{dc} 를 검출하는 것이 보다 쉬우므로 I_{dc} 에 비례하는 각도를 제어하기로 한다. 또한, $\theta_{AD} = 0$ 이 되더라도 전류는 흐르기 때문에 그 전류를 I_{dc0} 로 가정하고 전류 I_{dc} 와 각도 θ_{AD} 의 관계식을 다음과 같이 수정한다.

$$I_{dc} = k_1 \theta_{AD} + I_{dc0} \quad (2)$$

$$\theta_{AD} = k_2 I_{dc} - k_3 \quad (3)$$

여기서, k_1 , k_2 및 k_3 는 양의 상수이다.

2.2 적정 스위치-오프각, θ_{off} 제어

가변부하에 따라서 Flat-top전류를 만드는 Advance각도를 제어함과 동시에 효율향상을 위한 스위치-오프각, θ_{off} 의 적정제어가 필요하다. 스위치-오프각의 제어는 유효토크발생구간인 $\theta_{min} \sim \theta_{off}$ 사이의 각도의 크기를 토크각도, $\theta_m (= \theta_{off} - \theta_{min})$ 라고 할 때 θ_m 를 일정하게 하는 제어와 스위치가 도통되어 있는 동안의 각도의 크기인 Dwell각도, $\theta_{dw} (= \theta_{off} - \theta_m)$ 를 일정하게 하는 제어를 구현할 수 있다.

(a) 토크각도, θ_m 일정제어방식

부하의 증감에 관계없이 토크각도, θ_m 를 일정하게 제어한다는 것은 유효토크구간을 일정하게 하는 것과 같다. 자기포화가 없는 선형적인 조건에서는 소호되는 전류가 부토크의 영향이 미치지 않는 범위까지 θ_m 를 최대한 크게 하는 것이 좋으며, 토크오프를 작게하면서 최대출력을 극대화할 수 있다.

그림 1에서는 θ_m 일정제어에 의한 부하에 따른 전류파형을 나타내며, Flat-top전류를 만들기 위한 부하에 따른 적절한 Advance각도가 설정되어 일정전류로 지속되다가 부하에 관계없이 일정한 토크각도, θ_m 를 유지하면서 스위치-오프를 행한다.

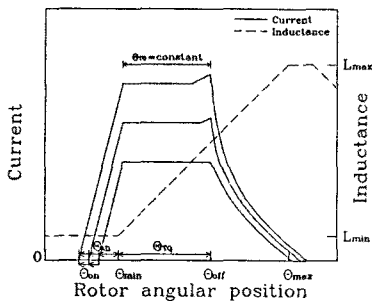


그림 1 토크각도, θ_m 일정제어시의 전류형상

그림 1에서 보는 바와 같이 부하전류가 증가하면 포화점이 앞당겨져서 스위치-오프되기 전에 포화점에서 전류가 상승한다. 포화로 인하여 상승된 전류분은 철손증가를 유발하고 전류를 소호하는 데에 걸리는 시간이 길어지게 되어 효율을 저하시키게 된다.

(b) Dwell각도, θ_{dw} 일정제어방식

토크발생구간에서 부하전류가 크고 고정자와 회전자의 중첩이 커짐에 따라 포화가 심화되어서 전류의 상승이 발생한다면 효율저하를 가져오므로 포화점의 직전에 스위치-오프하는 것이 좋다.

부하전류가 커짐에 따라 포화점은 앞당겨지게 되므로

Flat-top전류형상을 만들기 위해 부하의 증가에 따라서 θ_{dw} 를 크게 조정함과 동시에, 포화영역에서의 전류상승을 억제하기 위해 θ_m 를 작게 조정하면 효율이 더 향상될 것이다.

Dwell각도, θ_{dw} 의 일정제어는 그림 2와 같이 부하전류에 따른 θ_{dw} 의 증가폭과 θ_m 의 감소폭을 일정하게 하여 그들의 합인 θ_m 를 일정제어하는 방식이다.

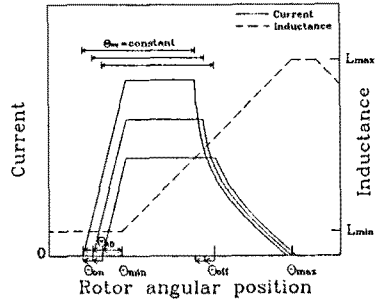


그림 2 Dwell각도, θ_{dw} 일정제어시의 전류형상

SRM의 일반적인 스위칭방식은 회전자의 위치각에 따라 스위치-온하고 나면 주어진 도통각만큼 지난 후에 스위치-오프하는 방식이다. 그러므로, Dwell각도, θ_{dw} 를 일정하게 두면, 스위칭각도제어시에 전류에 따라 Advance각도만 조정하면 되므로 θ_{dw} 를 가변조정해야 하는 θ_m 일정제어방식보다 스위칭제어프로그램이 간단해지는 장점을 갖는다.

3. 실험 및 고찰

3.1 제어시스템의 H/W 구성

고효율구동을 위한 가변스위칭각도 제어시스템은 피드백 회로를 위하여 부하전류, i_{dc} 를 검출할 수 있는 전류센서 한개만 사용하며, 외부의 명령이나 조정없이 내부프로그램에 의해 자동적으로 제어되는 폐루프시스템이다. 시스템의 구성은 그림 5와 같으며, 그 구성은 전동기, 전력스위칭변환기 및 제어기 등으로 구성하였다.

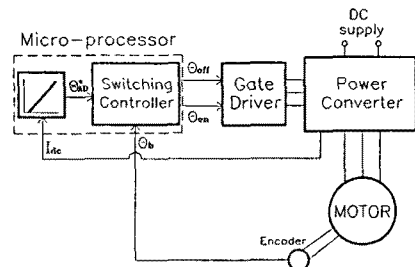


그림 3 가변 스위칭각도 제어시스템의 구성도

회전자의 위치각을 검출하기 위하여 전동기의 축상에 Absolute형 엔코더를 부착하였고, 실험을 위하여 설계된 3상 6/4극을 갖는 3HP급의 SRM은 기존의 유도전동기 프레임에 장착하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

(a) Flat-top전류확립을 위한 적정한 Advance각도

고효율화가 되기 위한 우선적인 조건이 토오크발생구간에 서 Flat-top전류가 되기 위한 초기전류를 적정한 θ_{Adv} 에 의하여 확립시키는 것이다. 적정한 Advance각도는 부하전류 I_{ik} 에 대하여 거의 직선적으로 비례하였다. θ_{Tr} 일정제어보다는 θ_{Dr} 일정제어방식이 보다 더 직선성을 갖고 있어서 제어시에 부하전류에 대한 일차함수 검출로 검출오차를 줄일 수 있게 되었다. 효율특성이 가장 좋은 최적의 토오크각도와 Dwell각도를 각각 $\hat{\theta}_{Tr}$ 및 $\hat{\theta}_{Dr}$ 라고 할 때 본 연구에 적용된 진동기에 대한 실험적 해석으로 부터 $\hat{\theta}_{Tr} = 17^\circ$ 및 $\hat{\theta}_{Dr} = 23^\circ$ 의 적정한 각도를 얻었다.

(b) 토오크각도, θ_{Tr} 일정제어

부하전류에 따른 적정한 Advance각도, θ_{Adv} 가 피드백회로를 통하여 자동적으로 조정되도록 하고, 제어기내에서는 주어진 일정한 θ_{Tr} 를 유지하도록 프로그램하였다. 출력에 따른 효율 측정결과는 그림 4와 같다. 여기서

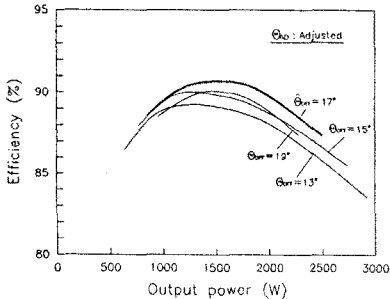


그림 4 θ_{Tr} 를 일정제어할 때 측정된 효율특성곡선

- 1) 전출력범위에서 효율의 변동이 적었으며, $\hat{\theta}_{Tr}$ 이하의 각도에서는 토오크리플이 증가하여서 효율이 저하되었고 $\hat{\theta}_{Tr}$ 이상의 각도에서는 자기포화로 인하여 전류의 상승이 심해지기 때문에 효율이 저하된 것으로 판단된다.
- 2) 부하가 커지면 쉽게 포화영역에 들게 됨으로 상승된 전류 때문에 소호시간이 길어져서 부토오크의 영향이 커지며, 효율이 저하하고 최대출력이 제한됨을 확인하였다.

(c) Dwell각도, θ_{Dr} 일정제어

일정한 θ_{Tr} 제어방식과 마찬가지로 부하전류에 따른 적정한 Advance각도, θ_{Adv} 가 피드백회로를 통하여 자동적으로 조정되도록 하고, 제어기내에서는 스위치-온 하고 나서 일정한 θ_{Dr} 만큼의 Dwell각도가 지난 후에 스위치-오프되도록 프로그램하였다. θ_{Dr} 를 일정제어할 때 출력에 따른 효율을 측정결과는 그림 5와 같다. 여기서

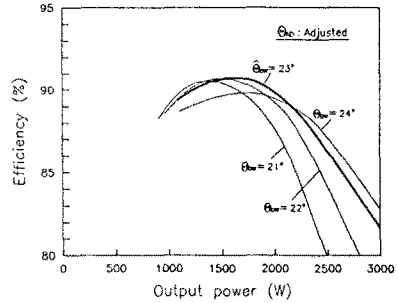


그림 5 θ_{Dr} 를 일정제어할 때 측정된 효율특성곡선

- 1) 포화로 인한 전류상승은 발생하지 않았으며, $\hat{\theta}_{Dr}$ 이하의 각도에서는 토오크리플이 증가하여서 효율이 저하되었으며 $\hat{\theta}_{Dr}$ 이상의 각도에서는 부토오크의 영향으로 효율이 저하된 것으로 판단된다.
- 2) 부하가 증가함에 따라 θ_{Dr} 를 앞당겨 조정하기 때문에 큰 전류에서도 전류를 소호할 때 부토오크의 영향이 없어서 최대출력이 제한되지 않음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 SRM의 스위칭각도 조정방식에 의한 고효율운전 시스템에 대하여 해석하였다. 고효율운전에 최적의 전류형상인 Flat-top전류를 생성하는 스위칭각도의 제어조건을 도출하였으며 부하에 따른 스위칭각도 조정방식으로서 θ_{Tr} 일정제어방식과 θ_{Dr} 일정제어방식의 장단점을 비교 해석하였다. SRM의 효율을 향상시키기 위한 많은 연구가 있어 왔지만, 본 방식은 부가되는 전력스위칭소자나 전력장치가 없으므로 매우 경제적이면서도 실용적인 제어방법이다.

6. 참고문헌

- [1] Timothy J.E. Miller, "Converter Volt-Ampere Requirements of the Switched Reluctance Motor Drive", IEEE Transactions on industry applications, vol. IA-21, no. 5, Sep/Oct 1985.
- [2] 황영문, 공간식 외, "자기적 비선형성을 고려한 무자율 산정방식의 Switched Reluctance Motor 전류 및 토오크 해석", 대한전기학회 논문지, 제 42권 8호, pp.7-13, 1993 . 8.
- [3] P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, "Variable-speed switched reluctance motors", Proc. IEE Pt.B, vol.127, no. 4, pp.253-265, July 1980.
- [4] J.M.Stephenson, M.A.El-Khazendar, "Saturation in doubly salient reluctance motors", Proc. IEE, Pt.B, vol. 136, no.1, pp.50-58, JAN 1989.