

## 스위치모드 콘버터에 의한 슬립전력 회수시스템

황영문\* · 추영배\*\* · ⑤박한웅\*\*\* · 김정홍\*

\* 부산대학교, \*\* 거제전문대학, \*\*\* 해군사관학교

## Slip Power Recovery System by Switch Mode Converter

Whang Young-Moon\* · Choo Young-Bae\*\* · ⑤Park Han-Woong\*\*\* · Kim Jung-Hong\*

\* Pusan Nat. Univ., \*\* Geoie College, \*\*\* Korea Naval Academv

**Abstract** – This paper deals with the slip power recovery system using switch mode converter in the inverter DC side, which recovers slip power of induction machine to AC line with the aid of the boost converter. As a results, the motor speed can be controlled by the duty ratio of boost switch, not by inverter firing angle. This results that the reactive power produced by phase controlled inverter and diode rectifier can be greatly reduced and linear speed regulation can be obtained. Moreover, the harmonic components of line current caused by the commutation in inverter and rectifier can be considerably suppressed. Therefore, most of the problems in conventional system can be solved.

### 1. 서 론

슬립전력 회수시스템은 유도전동기의 속도제어 능력의 취약성을 개선하여 직류전동기와 같은 속도-토오크 특성을 가지면서도 동시에 높은 효율로 씨 운전할 수 있기 때문에 대용량의 팬이나 펌프 및 그와 유사한 기능을 갖는 유도전동기 구동시스템에 주로 적용되어져 왔다.

따라서 본 연구에서는 종래의 시스템에 스위치 모드 콘버터를 도입함으로써 정류기 및 인버터가 발생시키는 무효전력을 억제시킴과 동시에, 귀환전류의 크기를 감소시키고 회전자전류를 정현파에 가깝게 만들도록 씨 종래의 슬립전력회수시스템이 가지는 우수한 속도-토오크 특성과 고효율특성을 유지하면서 저역률이나 전원의 고조파혼입 문제를 크게 개선하고자 한다.

본 연구에서는 제안된 시스템에 대한 이론적 근거를 설명하고 이를 해석함과 동시에 종래의 시스템에 대한 각 특성의 개선효과를 실험적 해석에 의하여 나타내 보임으로써 이론적 타당성을 입증하고자 한다.

### 2. 스위치모드 콘버터에 의한 슬립전력회수시스템

#### 2.1 시스템의 구성

본 연구에서 제안한 스위치모드콘버터에 의한 전원귀환 슬립전력회수시스템에 대한 구성도가 그림 2.1에 나타나 있다. 전체시스템은 유도전동기, 전류필터부, 부스트인덕터, 3상 다이오드 정류기, 부스트 콘버터, DC-Link 인덕터, 싸이리스터 인버터로 이루어져 있다. 본 시스템은 종래의 슬립전력회수시스템의 싸이리스터 인버터를 그대로 사용하면서 DC-Link단에 스위치모드 콘버터를 적용시킨 구조로 되어 있다. 시스템의 기본적인 동작 원리는 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저 회전자 여자전력은 정류기에서 직류전력으로 변환된 뒤 부스트 콘버터에 의해 저전압-대전류 형태의 직류전력이 고전압-저전류 형태의 직류전력으로 재변환되어 인버터에 의해 전원측으로 귀환되는 과정을

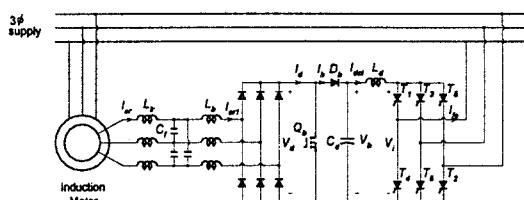


그림 2.1 스위치모드 콘버터에 의한 슬립전력 회수시스템의 구성도

Fig. 2.1 Schematic diagram of slip power recovery system using switch mode converter

거치게 된다. 결론적으로, 낮은 회전자전압을 보상하기 위해 변압기를 사용한 종래의 시스템과는 달리, 본 시스템은 부스트 콘버터를 이용하여 정류기의 직류전압을 증폭시키는 방법을 채택하고 있다. 이때 이상적으로 인버터의 점호각은  $180^\circ$ 로 동작시키면 좋지만, 부하가 커지면 전원측의 임피던스에 의해 점호실패가 발생할 수 있으므로 이를

고려하여 실험에서는  $165^\circ$ 로 고정시켜 동작시켰다. 그 결과 귀환전류는 전원전압에 대해  $165^\circ$ 의 위상을 가지게 되므로 귀환전력은 대부분 유효전력 형태로 전원으로 반환될 뿐만 아니라 회전자전류는 거의 정현파형태를 유지하면서, 회전자 속도기전력과 동위상으로 흐르게 된다. 따라서 전체시스템의 역률은 오직 전동기 자체의 역률에 의해 결정되는 결과가 된다. 나아가 귀환전류는 종래의 시스템과 마찬가지로 고조파성분을 포함하고 있지만 그 크기가 DC-Link에서 작아졌기 때문에 전체 전원전류에서 고조파성분이 차지하는 비율은 대단히 낮아지게 된다. 따라서 회전자회로에서 완전한 필터링을 가정하면 전원의 고조파전류는 오직 귀환전류에 의해 서만 발생한다고 볼 수 있으므로 고조파문제를 크게 개선되는 효과를 갖는다. 본 시스템의 속도제어를 위한 구동변수로서는 부스트스위치의 듀티비를 채택하고, 전류실패를 방지하기 위해 인버터 점호각이  $165^\circ$ 로 고정시킴으로써 인버터의 직류측 전압  $V_i$ 의 값도 일정하게 고정된다. 결국 듀티비의 조절에 의해 회전자전류의 크기를 조절함으로써 전동기의 토오크와 속도를 제어하게 된다.

제안된 시스템의 정상상태 특성을 얻기 위해 수립한 수학적 모델을 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{ds} \\ -(1-D_F)V_{ms}\cos\alpha \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \omega_s L_s & 0 \\ -\omega_s L_s & R_d & M \\ 0 & s\omega_s M R_r' + (1-D_F)R_d' \\ -s\omega_s M & 0 & -s\omega_s L_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{ds} \\ I_{ms} \\ I_{or} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$V_{ms}^2 = V_{as}^2 + V_{ds}^2 \quad (2.2)$$

$$T_e = -X_M I_{ds} I_{or}$$

## 2.2 실험 결과

실험 및 시뮬레이션에 사용된 전동기의 파라미터는 사용된 권선형 유도전동기는 4극, 3[hp], 220[V], 60[Hz]기기로서 다음과 같은 파라미터를 가지고 있다. 이때 각 파라미터들은 고정자축으로 환산한 뒤 동기속도로 회전하는  $d, q$  축의 양으로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} R_s &= 1.2 [\Omega] & L_s &= 0.1049 [H] \\ R_r &= 1.0 [\Omega] & L_r &= 0.1049 [H] \\ R_d &= 0.1 [\Omega] & L_d &= 0.04 [H] \\ a_m &= 2.2 & M &= 0.10006 [H] \end{aligned}$$

제시된 실험결과는 인버터의 점호각을  $165^\circ$ 로 하고  $D_F$ 를 0.6~1.0으로 변환시키면서 속도에 대한 토오크, 효율, 역률 특성을 측정한 것이다.

### 2.2.1 속도-토오크 특성

실험에서와 같이 인버터의 교류측을 전원에 적

접 연결시키는 경우 시스템의 모든 손실을 무시하면 DC-Link에서의 전압평형식으로 부터 다음식을 유도할 수 있다.

$$s = -a_m(1 - D_F) \cos\alpha \quad (2.3)$$

따라서 점호각이  $165^\circ$ 인 경우  $s = 0 \sim 1$ 인 범위에

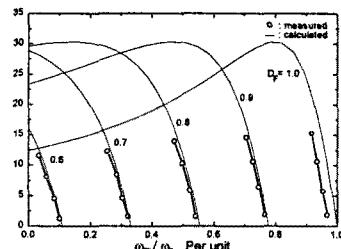


그림 2.2 속도-토오크 특성  
Fig. 2.2 Speed-torque curves

서 대략적으로  $D_F = 1 \sim 0.53$ 가 된다. 따라서 실험에서는  $\alpha$ 를  $165^\circ$ 로 고정시키고  $D_F$ 를 1.0부터 0.6까지 변화시켰을 때 토오크의 측정치 및 계산치가 그림 2.2에 주어져 있다.

실험결과에서 보듯이 듀티비 제어에 의한 토오크특성은 인버터 점호각 제어에 의한 특성과 거의 같음을 알 수 있다. 시뮬레이션에 의한 계산결과도 실험결과와 일치하고 있다. 따라서 제안된 시스템은 우수한 속도-토오크 특성을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 또 듀티비의 변화에 따른 속도의 변화가 선형적으로 나타나고 있는 것도 기존시스템에서는 실현시킬 수 없는 큰 장점이 된다.

### 2.2.2 효율 특성

그림 2.3은 각 듀티비에 대한 효율특성을 나타내며, 그림에서 알 수 있듯이 제안된 시스템은 종래의 시스템이 가지는 우수한 효율특성을 유지하고 있다. 이는 종래의 시스템에 비해 필터나 부스터인덕터 및 부스트 콘버터터 등에서 동손 및 스위칭손실은 발생하지만 전술한 바와 같이 변압기 및 인덕

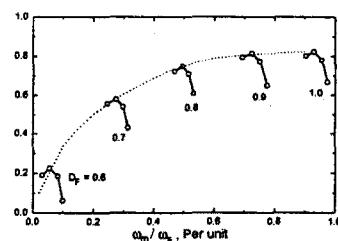


그림 2.3 효율 특성  
Fig. 2.3 Efficiency curves

터에서의 손실감소가 더 크기 때문이다. 또  $D_F$ 가 0.9 이상이 되면 회전자의 유기전압이 낮기 때문에 정류기나 부스트스위치에서의 전압강하로 인해 슬립전력이 전원으로 회수되지 않는다. 따라서 시스

템은 손실이 증가된 회전자 단락상태와 같이 되므로 전동기 단독운전시 보다 효율이 약간 저하한다.

### 2.2.3 역률 특성

그림 2.4는 각 듀티비에 대한 역률 특성을 나타내고 있으며 점선은 역시 각듀티비에 대한 최대역률점을 연결한것이다. 그림에서 보듯이  $D_F$ 가 0.9

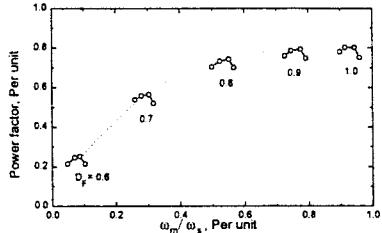


그림 2.4 역률 특성

Fig. 2.4 Power factor curves

이상인 고속영역에서는 전동기 단독운전시와 같은 고역률특성을 나타내며 저속으로 갈수록 출력감소에 따른 전동기의 역률저하가 전체시스템의 역률에 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 종래의 방식에 비해 역률이 대단히 개선되었음을 알 수 있다. 이것은 회전자회로가 거의 단위역률에 가깝게 동작할 뿐만 아니라 인버터의 점호각을  $165^\circ$ 로 고정시킴으로써 귀환전력의 대부분이 유효전력의 성질을 띄게 된 결과라 하겠다.

### 2.2.4 측정파형 해석

제시하는 파형은 인버터의 점호각을  $165^\circ$ 로 하고  $D_F=0.7$  일 때의 측정한 결과를 나타낸다. 이 때 부하토오크는 5 [N.m], 전동기는 540 [rpm]으로 회전하고 있다.

그림 2.5 (a)는 부스트인더터 전류  $i_{ari}$ 과 회전자전류  $i_{ar}$ 의 파형을 나타내고 있다.  $i_{ari}$ 의 파형은 부스트스위치의 스위칭주파수  $f_b$ 의 고조파성분을 포함하고 있으며 항상 불연속모드로 동작하고 있다. 이때 각 전류펄스의 최대치는 회전자전압과 같은 모양을 하고 있으므로 회전자전압 및 전류는 거의 동상을 유지하게 된다.

그림 2.5(b)는 인버터 교류측 전압과 귀환전류의 파형을 나타낸 것이다. 귀환전류는 종래 시스템의 경우와 거의 유사한 형태를 지니고 있지만 그 크기는 훨씬 작게 된다. 따라서 전원전류에 포함되는 고조파성분의 크기는 크게 감소하게 된다. 또한 인버터 교류측의 전압에 대한 귀환전류의 기본파 성분의 위상이  $165^\circ$ 로 고정되어 있으므로 인버터가 발생시키는 무효전력은 크게 감소하게 된다. 따라서 시스템의 역률을 개선시킬 수 있다.

그림 2.5(c)는 전원상전압에 대한 전원전류를 나타낸다. 제안된 시스템에서 전원전류의 고조파성

분은 귀환전류와 불완전한 필터링으로 인해 회전자전류에 의해 발생되는 고차 고조파성분이 함께 포함되어져 있다. 그러나 두 전류에 의한 고조파성분은 그 크기가 작기 때문에 전체적으로 전원전류는

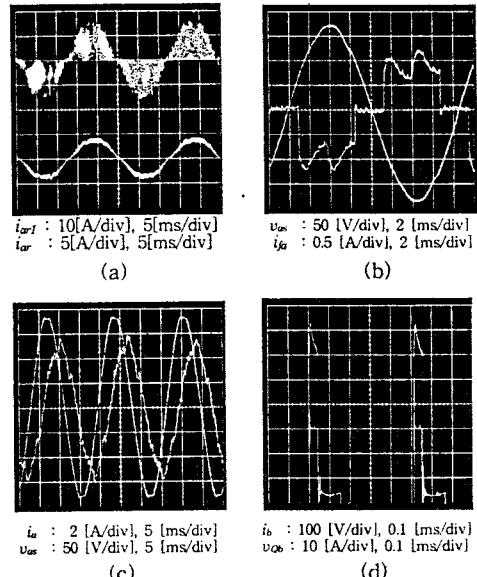


그림 2.5 측정 파형

Fig. 2.5 Measured waveforms

- (a) Boost inductor current and rotor current
- (b) Inverter AC-side voltage and recovery current
- (c) Line phase voltage and line current
- (d) Blocking diode current and boost switch voltage

거의 정현파형태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

그림 2.5(d)는 블록킹다이오드 전류  $i_b$ 와 부스트스위치의 단자전압  $v_{qb}$ 를 나타낸 것이다.

## 3. 결 론

본 연구는 종래의 슬립전력회수시스템이 가지는 높은 효율의 속도제어성능을 한층 제고시키고 저역률 문제와 전원전류에 고조파성분이 발생하는 문제를 크게 개선하기 위해, 슬립전력회수회로에 스위치모드 콘버터를 도입한 시스템을 제안하고 실험결과를 통해 특성개선 효과를 명확히 보임으로써 제안된 시스템의 타당성을 입증하였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] W. Shepherd & J. Stanway ; " Slip Power Recovery in an Induction Motor by the Use of a Thyristor Inverter ", IEEE Trans., IGA, Vol. 5, pp. 74-82, Jan/Feb. 1969.
- [2] A. R. Prasad & P. D. Ziogas ; " An Active Power Factor Correction Technique for Three phase Diode Rectifiers", IEEE Trans., P.E., Vol. 6, pp.83-92, Jan. 1991.