

# Flyback Transformer를 갖는 Switched Reluctance Motor의 구동회로

임 준영, 조 관열<sup>○</sup>, 백 인철, 신 두진, 김 정철  
(주)금성사, 생활시스템 연구소

Drive Circuit for Switched Reluctance Motor  
with Flyback Transformer

J. Y. Lim, K. Y. Cho, I. C. Baik, D. J. Shin, J. C. Kim  
GoldStar Co., Living System Laboratory

**Abstract:** A flyback type power converter circuit for switched reluctance motor drives is presented. In this converter circuit, the energy extracted from an offgoing phase is stored in an additional capacitor. The energy stored is used to either be returned to the source frequently or energize the conducting phase during the conduction interval through the transformer. The additional switch to pass the energy stored in the capacitor to the source or the conducting phase is switched under a relatively low voltage condition. Its switching frequency is relatively high so that the size of the transformer can be reduced. The design guideline for the capacitor and the transformer is described. The effectiveness of the presented converter circuit is compared to other circuits through the analysis and experiment.

## 1. 서론

Switched Reluctance Motor(SRM)의 구조는 고정자(stator)와 회전자(rotor)가 돌극(salient pole)구조를 갖고, 일반적으로 고정자에 권선이 감겨있고 회전자에는 영구자석이나 권선이 없다. 이러한 구조로 인해 회전자의 제조공정이 간단하고 관성(inertia)이 작다. 고정자의 각 상의 전류는 회전자의 위치에 따라 on과 off로 스위칭되므로 제어의 형태도 간단하다. 이러한 장점들에 의해 기존의 직류전동기가 갖는 구조의 복잡성 및 브러시의 수명문제, 브러시없는 직류전동기(brushless dc motor)가 갖고있는 가격의 상승문제를 해결하기 위하여 최근에 활발한 연구가 진행되고 있다 [1, 2].

SRM의 구동회로는 교류전동기나 브러시없는 직류전동기의 인버터와는 달리 shoot-through fault 문제가 없고 어느 한 상에 고장이 발생했을 때에도 구동이 가능하다. SRM의 토오크는 각 상의 인덕턴스(inductance)의 변화율과 전류의 크기에 의해 결정되고 전류의 극성과는 관계가 없으므로 단방향 제어회로(unipolar control circuit)의 구현이 가능하며 구동회로에 필요한 power 스위치의 수를 줄일수 있는 잇점이 있다. SRM의 구동회로가 갖추어야 할 조건은 낮은 속도에서 권선의 전류를 제한하기 위하여 전압이나 전류의 PWM제어가

필요하고, 권선에 흐르는 전류를 빨리 증가시키거나 감소시키기 위하여 높은 forcing 전압과 demagnetizing 전압이 필요하다. 위와 같은 조건들을 만족시키기 위하여 여러 형태의 구동회로가 제안되었다[3-7]. Asymmetric bridge converter는 전동기의 각 상의 전류를 독립적으로 각각 제어할 수 있고 스위치의 전압 rating이 다른 구동회로에 비해 작은 장점이 있다. 그러나 이 회로는 스위치의 수가 많고 스위칭 소자 구동회로에 전압 isolation이 필요하다. 스위치의 수를 가장 적게 하기 위해서 한 상에 1개씩의 스위치로만 구동할 수 있는 회로들도 제안되었지만[6] 이러한 방법들은 다른 형태의 소자가 필요하거나 제어할 수 있는 범위의 제한이 크게 된다. Miller converter는 스위치의 수가 작고(상수\*1) 전압 rating도 asymmetric bridge converter와 비슷하게 작은 반면, 높은 속도에서는 PWM 제어의 duty비에 따라 demagnetizing 전압이 낮아 권선의 전류가 느리게 감소함에 따라 역 토오크(negative torque)를 발생시킬 수 있다. C-dump converter는 각 상마다 1개씩의 스위치와 dump 콘덴서에 저장된 에너지를 전원부에 다시 되돌려주기 위한 스위치 1개로 구성된다. 이 회로는 dump 콘덴서의 전압과 DC link 전압의 차가 demagnetizing 전압이 되므로 권선에 흐르던 전류를 빨리 감소시키기 어렵고, 스위칭 소자와 dump 콘덴서의 내압도 다른 회로에 비해 크다.

본 연구에서는 Miller converter나 C-dump converter와 같은수의 스위칭 소자를 갖고, Miller converter의 속도제한 문제, C-dump converter의 소자내압 문제들을 극복하고, asymmetric bridge converter와 비슷한 제어성능을 갖는 converter를 제안한다.

## 11. Flyback 변압기를 갖는 구동회로

SRM의 기본적인 구조는 고정자와 회전자가 돌극으로 되어있고, 고정자에 권선이 감겨있다. 그림 1은 8/6 돌극구조의 4상 SRM의 구조를 나타낸다. 회전자의 위치변화에 따라 인덕턴스가 변하며 고정자 권선에 전류를 가하면 자기회로의 인덕턴스를 크게 하는 방향으로 토오크를 발생시킨다. 그림 1의 회전자를 CW(clockwise) 방향으로 회전시키면 한 상의 인덕턴스는 그림 2(a)와 같이 나타난다. 0s에서 전기적으로 스위치를 turn on 시키면 회전자는 CW 방향으로 회전을 시작

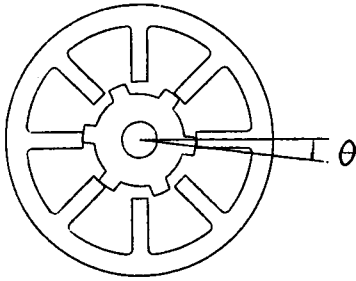


그림 1. 8/6 구조의 SRM

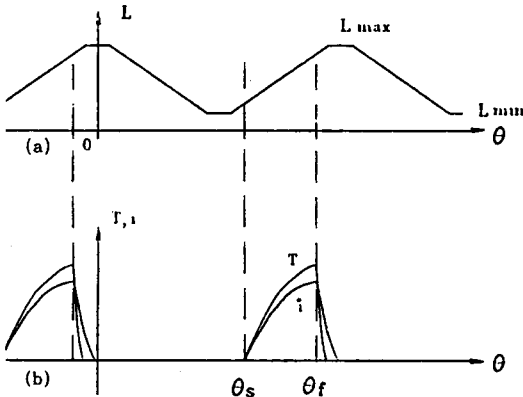


그림 2. (a) 상 인덕턴스, (b) 전류 및 토크 profile

한다. 연속적인 회전을 위하여  $\theta_f$ 에서 turn off 시키면서 연속하는 상의 스위치를 turn on 한다. 이때 권선에 흐르는 전류파형과 발생하는 토크는 그림 2(b)와 같다.

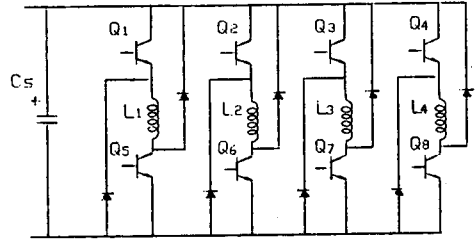
### 2-1 종래의 converter 회로

그림 3(a)의 asymmetric bridge converter는 일반적으로  $Q_1-Q_5$ ,  $Q_2-Q_6$ ,  $Q_3-Q_7$ ,  $Q_4-Q_8$ 이 동시에 센서신호에 의해 turn on과 turn off를 반복함으로써 전동기의 권선  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ 의 commutation을 한다. Turn off시 권선의 에너지는 다이오드를 통하여 source측 콘덴서  $C_s$ 로 저장된다. 이회로는 효율면에서 다른 회로보다 유리하나, 상마다 스위칭소자가 2개씩 필요하고 잇상( $Q_1-Q_4$ )에 제어신호를 전달하기 위해 일반적으로 photo coupler나 pulse transformer가 필요하므로 가격면에서 불리하다.

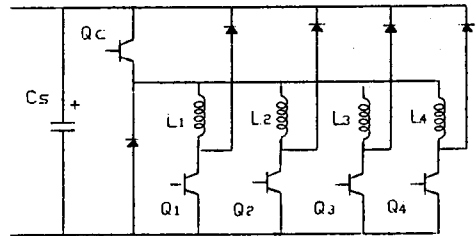
그림 3(b)의 Miller converter에서  $Q_c$ 는 chopper로써 전동기 상전류의 제어용으로 쓰이며  $Q_1-Q_4$ 는 회전자의 위치에 따라 commutation을 한다. 스위치  $Q_c$ 와  $Q_1-Q_4$ 의 상태에 따라 freewheeling path가 다양하게 변화된다. 이회로는 가격면에서 가장 유리하나 power를 높이기 위해서는 스위치  $Q_c$ 의 on구간이 길어져야 하므로 권선에 남아있던 에너지가 source측으로 regeneration 되는 시간이 짧아지게 된다. 이에 따라 self freewheeling mode가 길어져 전류가 감소되는 시간이

매우 느려져 효율과 고속회전에 상당히 불리하다.

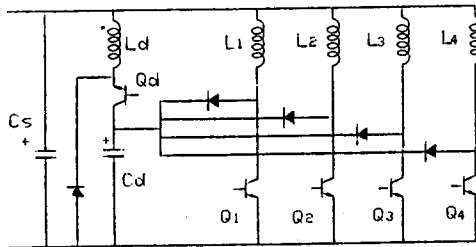
그림 3(c)의 C-dump converter에서  $Q_1-Q_4$ 는 chopper와 commutation을 동시에 수행하여 전동기의 권선에 남아있는 에너지를 turn off시  $C_d$ 에 저장하여 source측으로 되돌려 준다. 이 회로에서 에너지를 저장할수있는 유효한 영역은  $C_d$ 의 전압과  $C_s$ 의 전압차이 뿐이므로  $C_d$ 는 DC link단 전압 ( $V_{Cs}$ )보다 높은 내압이 필요하여 효율적으로 사용되지 못하고, 또한  $Q_d$ 도 내압이 높은 소자가 필요하다.



(a) Asymmetric bridge converter



(b) Miller converter



(c) C-dump converter

그림 3. 종래의 converter 회로

### 2-2 제안된 converter 회로

그림 4는 본 논문에서 제안한 converter이다. 회로에서 각 상에 연결된 스위치  $Q_1-Q_4$ 는 chopper와 commutation을 동시에 담당하고 있다. 각 상의 스위치의 turn off시 전동기의 권선에 남아있던 에너지는 다이오드를 통하여  $C_r$ 에 저장되고  $Q_r$ 의 turn on시  $L_p$ 에 에너지를 축적하고  $Q_r$ 의 turn off시 flyback transformer를 통하여  $L_s$ 에 전류원(current source)으로 전달되어  $D_r$ 를 통하여  $C_s$ 로 regeneration 된다.  $C_r$ 와  $Q_r$ 는 충분히 효율적으로 사용되므로 내압이 상당히 작아도

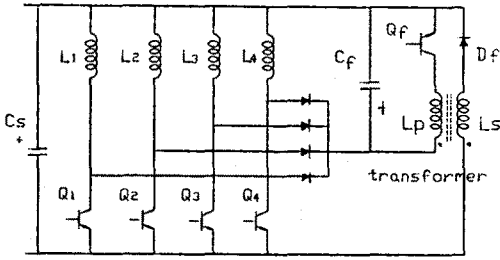


그림 4. 제한된 converter 회로

된다. C-dump converter에서는 dump 콘덴서의 전압과 DC link 전압의 차가 demagnetizing 전압으로 보이기 때문에 dump 콘덴서의 전압을 계속 측정하여 비교기 및 chopper회로로 DC link 전압보다 큰 일정 전압으로 유지하게 되는데 이것 때문에 스위칭 주파수가 그리 높지않고 따라서 인덕터(L<sub>d</sub>)가 커진다. 또한 C<sub>d</sub> 및 스위칭소자의 내압이 DC link 전압보다 커야하며 DC link 전압의 맥동이 demagnetizing 전압에 그대로 보이게 된다. 반면에 제한된 converter는 demagnetizing 전압(V<sub>Cr</sub>)이 DC link 전압의 영향을 거의 받지 않는다. 따라서 내압을 작게 선정할 수 있으며 스위칭 주파수를 적절히 선정하고 transformer의 인덕턴스를 회생 에너지에 맞게 설계하여 크기를 작게 할 수 있다. 또한 C-dump converter의 chopper와는 달리 스위칭 주파수 및 duty비를 일정하게 함으로써 스위치에 가해지는 stress를 줄일 수 있고 제어회로가 간단하게 구성된다. Miller converter 만큼의 상 스위치 갯수(상수+1)만을 가지면서도 demagnetizing 전압 측면에서 Miller converter 및 C-dump converter보다 매우 우수하고 Cr의 전압을 조절함으로써 전류의 감소시간을 조절할 수 있다. 또한 freewheeling mode 동작이 가능하며 각상의 전류를 독립적으로 제어할 수 있어 전체적으로 상당 스위치의 갯수는 최소화 하면서 제어능력 면에서는 asymmetric bridge converter에 근접한 성능을 얻을 수 있다.

### 2-3 Flyback transformer의 설계

그림 3의 conventional converter와 본 연구에서 제한된 converter에서 상 스위치의 turn off시 권선에 흐르던 전류가 감소되는 시간을 비교하면 C<sub>s</sub>와 C<sub>r</sub>의 전압에 반비례한다. 따라서 전동기의 정격 회전수, 상전류, advance angle, 소자의 내압을 참고로 하여 C<sub>r</sub>의 전압을 결정한다. 구체적인 설계방법은 다음과 같다.

가) 전동기의 권선에서 넘겨지는 전력량을 계산한다. 일반적으로 인덕턴스가 최소일때 turn on되고 최대가 가까워지는 시점에서 turn off 되므로 권선의 에너지가 다이오드를 통하여 콘덴서로 넘겨질때는 최대 인덕턴스 및 최대 전류로 계산한다. 또한 이 에너지는 transformer에서 source측으로 전달해야 할 전력과 같으므로 (1)식과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$P = (1/2)L_{max} \cdot I_{max}^2 \cdot f_m = (1/2)L_p \cdot I_{peak}^2 \cdot f_f \quad (1)$$

여기서 f<sub>m</sub>은 상여자 주파수, L<sub>p</sub>, I<sub>peak</sub>, f<sub>f</sub>는 각각

flyback transformer의 1차측 인덕턴스, peak 전류, 스위칭 주파수를 나타낸다.

나) Q<sub>r</sub>의 스위칭주파수는 transformer의 크기를 고려하여 50-100 KHz로 결정하고, duty ratio(D)는 스위칭 소자와 transformer를 효율적으로 사용될수 있도록 결정한다. 대략 50% 정도에서 결정된다. 가)항을 고려해 코어의 크기도 결정한다.

다) C<sub>d</sub>의 전압을 결정한다. Advance angle과 전동기의 회전수 및 인덕턴스의 최대구간을 고려하여 허용전류의 감소시간이 계산되고, 이시간내에 전류가 충분히 감소되도록 C<sub>d</sub>의 전압을 결정한다. C<sub>d</sub>의 전압이 결정되면 C<sub>d</sub>의 내압도 결정된다.

라) 가)와 나), 다)에서 i<sub>r</sub>의 최대치(I<sub>peak</sub>)는 (2)식과 같이 주어진다.

$$I_{peak} = \frac{L_{max} \cdot I_{max}^2 \cdot f_m}{V_{Cd} \cdot D} \quad (2)$$

I<sub>peak</sub>가 결정되면 transformer의 1차 인덕턴스는 (1)식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$L_p = \frac{L_{max} \cdot I_{max}^2 \cdot f_m}{I_{peak}^2 \cdot f_f} \quad (3)$$

마) Transformer의 지속밀도(B)는 페라이트 코어를 사용할 경우 0.3 Tesla이내에서 동작되도록 한다. 여기에서 1차 turn수가 먼저 결정되고 air gap(l<sub>g</sub>)이 결정된다.

$$N_p = \frac{L_p \cdot I_{peak}}{B \cdot A} \quad (4)$$

$$l_g = \frac{I_{peak}^2 \cdot L_p \cdot \mu_0}{B^2 \cdot A} \quad (5)$$

Q<sub>r</sub>가 turn off 하는 순간 암페어턴이 유지되므로

$$N_p I_p = N_s I_s \quad (6)$$

또한 duty가 50%일때 전류증가 시간과 전류감소 시간이 같아야 한다는 조건을 이용하면

$$\frac{I_p N_p^2}{V_{Cr}} = \frac{I_s N_s^2}{V_{Cs}} \quad (7)$$

(6)과 (7)로부터 2차측의 turn수는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{N_p}{V_{Cr}} = \frac{N_s}{V_{Cs}} \quad (8)$$

이때 Q<sub>r</sub>의 내압은 다음과 같이 계산된다.

$$V_{Ds} = V_{Cr} + (N_s/N_p) \cdot V_{Cs} \quad (9)$$

Q<sub>r</sub>의 내압에 문제가 없는 경우 2차측 전류감소 시간의 여유를 두기위해 2차측의 turn수를 이보다 약간 작게 한다.

#### 2-4 실험결과

실험에 사용한 Switched Reluctance Motor의 고정자와 회전자는 8/6 구조로 되어있고, 각 상의 인덕턴스의 최소치와 최대치는  $L_{min} = 25[mH]$ ,  $L_{max} = 110[mH]$ 이다. 각 상의 전압을 제어하기 위한 PWM 주파수는 18[KHz]이고 스위칭 소자는 MOSFET을 사용하였다. Flyback transformer의 1차, 2차측 turn수비는 1:2이고 콘덴서의 용량은  $C_r = 100[\mu F]$ 이다. 콘덴서에 저장된 에너지를 source측으로 되돌려주기 위한 스위칭 소자  $Q_r$ 의 스위칭 주파수는 65[KHz]이고 duty비는 50%이다. 그림 5는 한 상의 전류 및 콘덴서  $C_r$ 의 전압을 나타낸다. 상 전류는 4.5[A]이상에서 자속포화상태가 되어 전류가 빠르게 증가한다. 콘덴서의 전압은 각 상의 여자가 끝날때마다 권선의 에너지가 freewheeling을 시작하여 콘덴서의 전압을 상승시킨다. 콘덴서의 전압 리플의 주파수는 상 여자 주파수( $f_m$ )와 같고, peak to peak치는  $C_r$ 가 100[ $\mu F$ ]일때 평균 전압의 약 13%,  $C_r$ 가 390[ $\mu F$ ]일때 약 4%로 나타났다. 그림 6은 flyback transformer의 1차 및 2차측의 전류를 나타낸다. 2차측의 전류가 스위치  $Q_r$ 의 turn off 시간내에 충분히 감소함을 알수 있으며 이것은 transformer의 설계시 예측했던 바와 잘 부합된다.

#### III. 결론

본 논문에서는 Switched Reluctance Motor의 구동을 위한 새로운 형태의 구동회로를 제안하였다. 제안된 회로는 각 상마다 1개씩의 스위칭 소자를 사용하고, freewheeling시 권선의 전류를 회생(regeneration)시키기 위해 콘덴서와 transformer 및 1개의 스위칭 소자로 구성된다. 회로를 효율적으로 동작시키기 위하여 각 소자들의 설계방법을 기술하였다. 제안된 converter는 전력제어 능력이 우수하고 저렴한 가격으로 구현할 수 있으며 실험을 통하여 회로의 동작(operation)과 성능(performance)을 검증하였다.

#### 참고 문헌

- [1] P. J. Lawrenson et al., "Variable speed switched reluctance motors," Proc. Inst. Elec. Eng., July 1980, pp. 253-265.
- [2] T. J. E. Miller, *Brushless permanent magnet and reluctance motor drives*, Clarendon Press - Oxford, 1989.
- [3] R. M. Davis et al., "Inverter drive for switched reluctance motor: circuits and component ratings," Proc. Inst. Elec. Eng., March 1981, pp. 126-135.
- [4] R. Krishnan and P. Materu, "Analysis and design of a new converter topology for switched reluctance motor drives," IEEE-IAS Annu. Meeting, 1989, pp. 1181-1185.

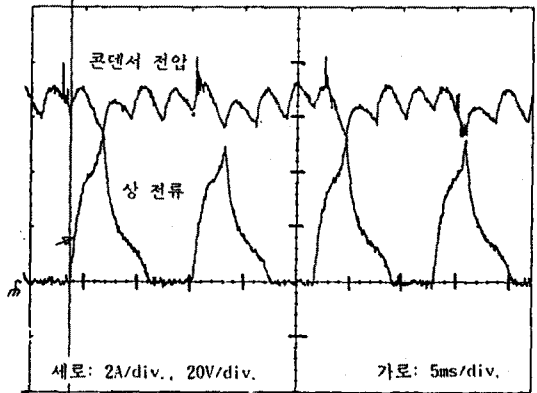


그림 5. 콘덴서( $C_r$ ) 양단의 전압, 상전류  
 $\omega_m=900[rpm]$ ,  $V_{cr}=75[V]$ ,  $C_r=100[\mu F]$

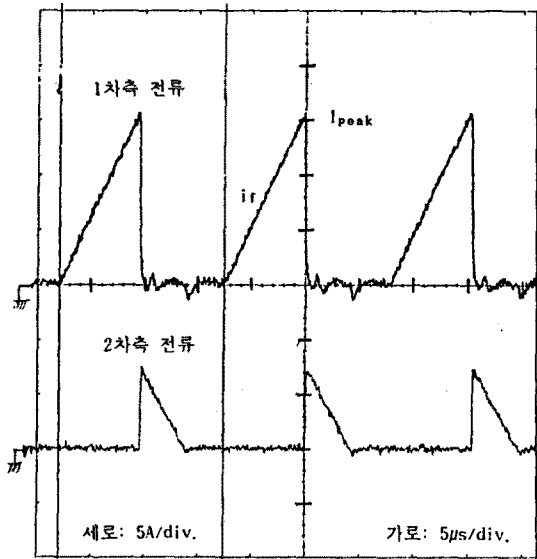


그림 6. Flyback transformer의 1차, 2차전류 및  $C_r$ 의 전압  
 스위칭 주파수=65[KHz]

- [5] S. Vukosavic and V. R. Stefanovic, "SRM inverter topologies: A comparative evaluation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27, no. 6, Nov./Dec. 1991, pp. 1034-1047.
- [6] C. Pollock and B. W. Williams, "A unipolar converter for a switched reluctance motor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 26, no. 2, Mar./Apr. 1990, pp. 222-228.
- [7] A. M. Hava, V. Blasko, and T. A. Lipo, "A modified C-dump converter for variable reluctance machines," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 2, Sep./Oct. 1992, pp. 1017-1022.