

전력회생이 가능한 2상2중 쇼퍼방식(회생제동에 대하여)
 (Two phase Chopper system of combined output
 with a function for power recovery)

정 언 령
 한 경 희
 서 제 호
 이 승 환*

명 지 대 학 교
 명 지 대 학 교
 연 광 대 학 교
 명 지 대 학 교

1. 서 론

전철 및 전기자동차의 쇼퍼방식은 직류기의
 가변속 제어 및 회생제동에 많이 사용되고 있는
 것이 현실이다.

이와 같이 쇼퍼제어가 급속한 발전을 보인
 이유는 종래의 저항기 제어방식에 의한 제어와
 비교하여 볼 때, 첫째, 저항에 의한 손실이 없고,
 회생제동이 가능하기 때문에 성력화(省力化),
 성(省)에너지화가 가능하다. 둘째, 무접점이기
 때문에 보수성이 향상된다. 셋째, 아크레스(
 arcless), 스텝레스(stepless)로 제어가
 가능하여 제어의 신뢰성이 높다. 넷째, 응답성
 이 빠르다. 등의 이점 때문에 직류 전동기 제어
 에 쇼퍼방식이 채용되고 있다. (2) (4)

그러나, 쇼퍼방식은 입력전압을 쇼핑하므로,
 입력측 및 출력측 전류가 맥동하는 단점을 가지
 고 있다.

전철과 같이 직류 또는 교류전원을 송전계통
 으로부터 수전하는 경우에는 전류 맥동에 의한
 고조파 전류 발생으로 인하여, 통신 및 제어계통
 에 유도장해를 일으킨다. 이 대책으로는 전류
 맥동을 어떤 허용한도 이하로 작게 할 필요가
 있는데 이를 위하여 2상2중 방식을 채용하고
 있다. (1) (3)

직류기를 쇼퍼제어하는 방식은, 구동과 회생
 제동의 두 가지 동작을 이행하여야 한다.

회생제동 시에는 전동기를 발전기로 작용시켜
 발전기에서 발생하는 에너지를 전원으로 회생
 시키므로써 제동력을 얻고 있다. 제동력이 작
 용하면 전동기 속도는 감소하므로 일반적으로

체승쇼퍼를 사용하고 있다. (1)

이상과 같은 관점에서 전력회생이 가능한 2상
 2중 쇼퍼방식에 대한 회생제동 시의 동작과 제동
 전력, 회생전력 및 효율관계를 고찰한다.

2. 본 론

하나의 쇼퍼회로로서, 구동 및 회생제동이 가
 능하도록 하기 위하여, 역도통 다이리스터를
 사용한 종합적인 2상2중 쇼퍼방식의 주회로를
 그림 1에 표시한다.

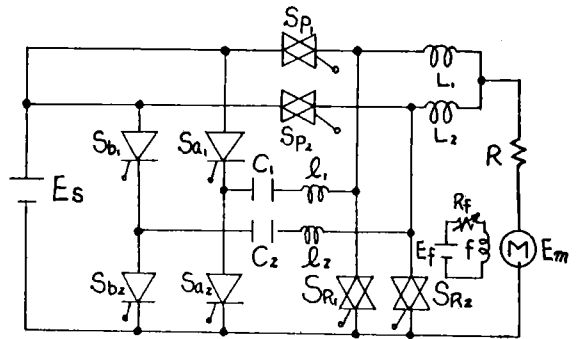


그림 1 전력회생이 가능한 2상 2중 쇼퍼회로
 구동 시의 제동성에 대해서는 전회(前回)에
 발표 하였으므로 굵화(굵화)에는 회생제동 시의
 중점을 두어 고찰 하고자 한다.

그림 1에서 회생제동의 동작은 그림 2와 같은
 게이트 신호에 의해 행해진다.

회생제동 시의 도통상태와 각부의 파형을
 $\alpha < 0.5$ 와 $\alpha > 0.5$ 로 구분하여 그림 3에 표시
 한다.

또한 그림 3에 표시한 각 모오드의 등가회로

를 그림 4에 표시한다.

이하 $\alpha < 0.5$ 와 $\alpha > 0.5$ 인 경우로 나누어 기본동작을 살펴 본다.

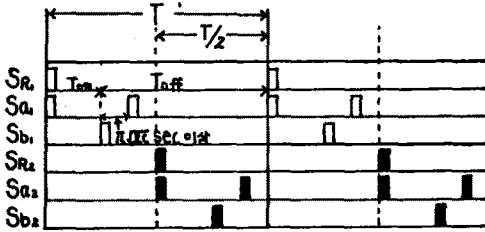
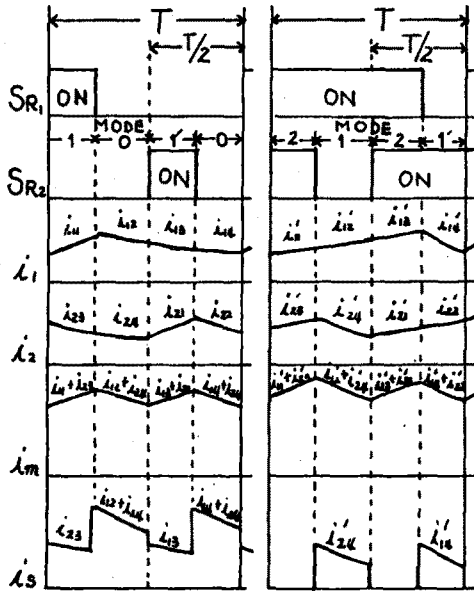


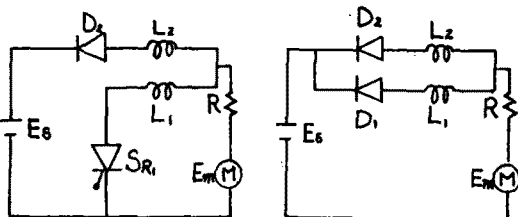
그림 2 회생시의 게이트 신호



(a) $\alpha < 0.5$

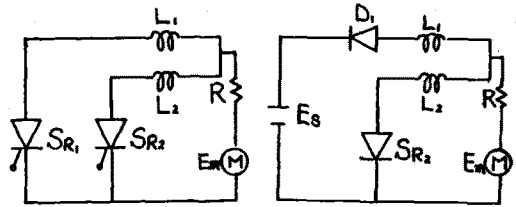
(b) $\alpha > 0.5$

그림 3 스위치의 도통상태와 과부 파형



(a) 모드 1

(b) 모드 0



(c) 모드 2 (d) 모드 1'

그림 4 각 모드에서의 등가회로

(a) $0 \leq \alpha \leq 0.5$ 의 영역 : 그림 3 (a)에 표시한 바와 같이 모드1 - 모드0 - 모드1' - 모드0의 동작을 반복하며 모드1인 경우에는 S_{R1} 이 온상태이며, 모드0는 S_{R1}, S_{R2} 가 모두 오프상태이고 모드1'은 S_{R2} 가 온상태로 회로조건은 모드1과 같다.

여기에서 전동기 전압 E_m 과 전원전압 E_s 와의 관계를 구하면

$$E_m = (1-\alpha)E_s + RI_m \quad (1)$$

가 되어 단상인 경우와 동일하다. 단 I_m 은 전동기 전류의 평균치이다.

또, 전동기 전류의 맥동분 ΔI 은

$$\Delta I = \frac{E_s}{R} \cdot \frac{(1-e^{-\rho\alpha}) - (1-e^{-\rho(0.5-\alpha)})}{2(1-e^{-0.5\rho})} \quad (2)$$

가 되며, 여기에서 $\rho = \frac{E_m}{E_s}$, $\rho = \frac{T}{\tau}$, $\tau = \frac{L}{R}$ 이다.

이것은 구동시 맥동분의 최대치와 동일한 값을 갖는다.

또한, 회생제동시 전동기 전류의 연속조건은 요구하는 제동전력에 의하여 좌우되며,

$I_{min} > 0$ 의 관계로부터

$$\rho \geq \frac{2 - e^{-\rho(0.5-\alpha)} - e^{-0.5\rho}}{2(1-e^{-0.5\rho})} \quad (3)$$

가 된다.

다음은 전동기 전류가 연속인 경우의 제동전력, 회생전력 및 회생효율에 대하여 고찰한다.

회생제동시에 직류발전기의 전기자가 공급하는 전전력을 제동전력이라 하며, 이것은 전원측에 회생되는 회생전력과 저항에 소비되는 발전제동전력과의 합으로 표시된다.

발전기가 발생하는 제동전력 P_m 은 발전기 단자전압 E_m 에 발전기 평균전류 I_m 을 곱함으

로써 구해진다.

$$P_m = E_m \cdot I_m = E_m \cdot \frac{2}{T} \left[\int_0^{\alpha T} (i_{11} + i_{13}) dt + \int_0^{(0.5-\alpha)T} (i_{12} + i_{14}) dt \right]$$

$$= \frac{2E_s^2}{R} \cdot \xi (\xi + \alpha - 1) \text{------(4)}$$

이 된다.

또, 전원에 회생되는 회생전력 P_r 은 전원전압 E_s 와 전원에 회생되는 평균전류 I_s 를 곱함으로써 얻어진다.

$$P_r = E_s \cdot I_s = E_s \cdot \frac{2}{T} \left[\int_0^{\alpha T} (i_{11} + i_{13}) dt + \int_0^{(0.5-\alpha)T} 2(i_{12} + i_{14}) dt \right]$$

$$= \frac{2E_s^2}{R} \cdot \left\{ 2(\xi - 1) + \alpha(3 - 2\xi) + \frac{(1-e^{-\rho\xi})(1-e^{-\rho(0.5-\alpha)})}{\rho(1-e^{-\rho \cdot 0.5\rho})} \right\} \text{------(5)}$$

(b) $0.5 \leq \alpha \leq 1.0$ 의 영역 : 그림 3 (b)에 표시한 바와 같이 모오드2 - 모오드1 - 모오드2 - 모오드1의 동작을 반복하며, 모오드2는 S_{R1} , S_{R2} 가 모두 온상태가 된 경우이다.

전동기 전압 E_m 은 (1)식과 동일하다.

이 경우 맥동분 ΔI_2 는

$$\Delta I_2 = \frac{E_s}{R} \cdot \frac{(1-e^{-\rho\xi})(1-e^{-\rho(1-\alpha)})}{2(1-e^{-\rho \cdot 0.5\rho})} \text{------(6)}$$

이때의 맥동분 최대치도 구동시와 동일하다.

전동기 전류의 연속조건 $I_{min} > 0$ 하므로

$$\xi \geq \frac{(1-e^{-\rho(1-\alpha)})}{2(1-e^{-\rho \cdot 0.5\rho})} \text{------(7)}$$

가 된다. (3), (7)식의 계산예를 그림 5에 표시한다.

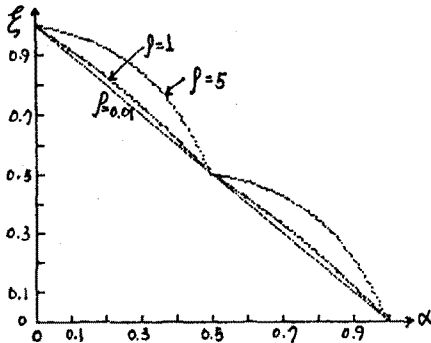


그림 5 L 전류의 연속경계조건

이 그림으로 부터 ρ 가 작을수록 연속범위가 넓어짐을 알 수 있다.

그리고, 이 영역에서의 제동 전력을 P_m 라하면,

$$P_m = E_m I_m = E_m \cdot \frac{2}{T} \left[\int_0^{(\alpha-\alpha)T} (i_{11} + i_{13}) dt + \int_0^{(1-\alpha)T} (i_{12} + i_{14}) dt \right]$$

$$= \frac{2E_s^2}{R} \cdot \xi (\xi + \alpha - 1) \text{------(8)}$$

가 된다.

(4), (8)식의 계산예를 그림 6에 표시한다.

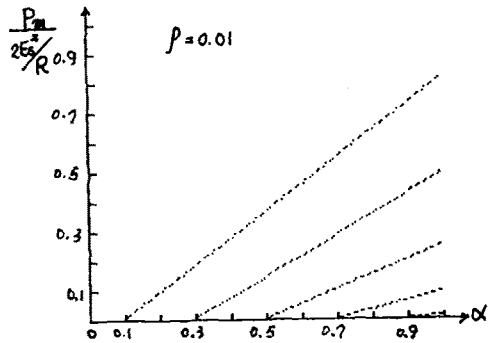


그림 6 시비율에 대한 제동전력

이 그림으로 부터 ξ 가 클수록 제동전력이 큼을 알 수 있다.

이 경우의 회생전력 P_r 은

$$P_r = E_m I_s = E_s \cdot \frac{2}{T} \int_0^{(1-\alpha)T} (i_{12} + i_{14}) dt$$

$$= \frac{2E_s^2}{R} \left\{ (2\xi - 1)(1 - \alpha) + \frac{(1-e^{-\rho\xi})(1-e^{-\rho(1-\alpha)})}{\rho(1-e^{-\rho \cdot 0.5\rho})} \right\}$$

가 된다.

(5), (9)식의 계산예를 그림 7에 표시한다.

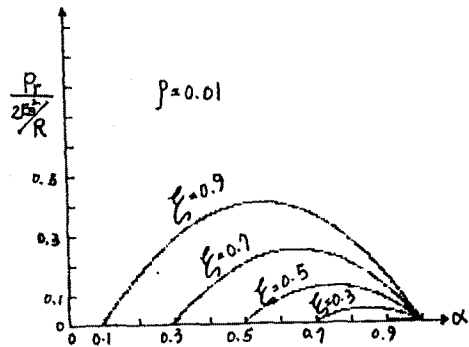


그림 7 시비율에 대한 회생전력

이 그림으로 부터 ξ 가 클수록 회생전력이 큼을 알 수 있다.

그리고, 회생효율 η 은 다음식으로 정의된다.

$$\eta = \frac{\text{회생전력}}{\text{제동전력}} \quad (10)$$

그리고, η 의 값은 (5)/(4)식, (9)/(8)식으로 구해진다. 그 관계를 그림 8에 표시한다.

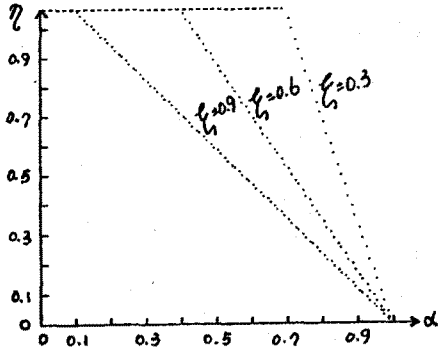
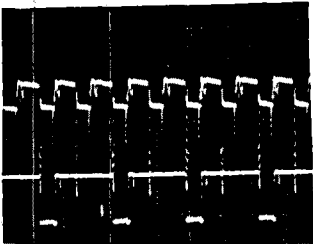


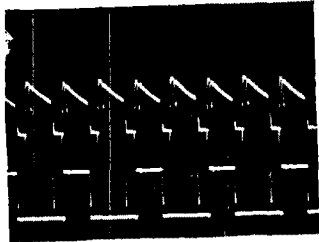
그림 8 회생 효율

이 그림으로 부터 회생효율 η 는 시비율 α 가 작을수록 크게 되는데, 실제로는 제동전력 및 회생전력이 0(영)에 접근하는 영역으로 의미가 없다. 또한, α 가 클수록 η 는 작아지지만, 제동전력은 커지고, 회생전력이 작아지므로 전력손실 즉 발전제동의 비중이 커짐을 의미한다.

회생제동시의 각부의 실험파형을 사진 1, 2에 표시한다.



$\alpha = 0.2$
상: 1A/div
하: 50V/div
횡축: 1ms/div

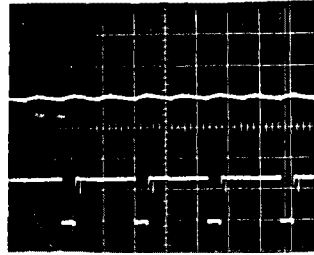


$\alpha = 0.6$
상: 2A/div
하: 100V/div
횡축: 1ms/div

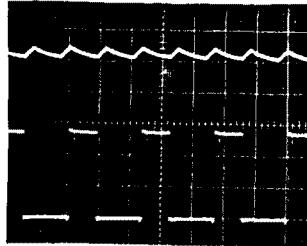
사진 1 전원전류와 SCR의 양단의 전압

3. 결 론

종래의 2상2중 방식과 비교하면 동일소자수로 구동 \leftrightarrow 회생동작이 연속적으로 운전가능하여



$\alpha = 0.1$
상: 1A/div
하: 50V/div
횡축: 1ms/div



$\alpha = 0.6$
상: 1A/div
하: 50V/div
횡축: 1ms/div

사진 2 전동기 전류 및 SCR의 양단의 전압

종래의 회생동작을 행하기 위하여 사용하던 회로절환용의 수많은 접촉자를 생략할 수 있다.

또한, 회생제동으로서 체용형 2상2중 쇼퍼를 사용하는 경우의 제동전력 및 회생전력을 산출했으며, 그림 6, 그림 7과 같이 제동전력 및 회생전력은 시비율 α 를 가감함으로써 제어된다. 현재까지 알려진 방식중에서 가장 회생효율이 높은 방식으로 저속도 영역까지 제동전력을 얻을 수 있다.

4. 참고문헌

- 1) 木村, 塩谷: "直流化勵電動機のチョッパ制御による回生動作について" 電気学会論文誌(B), Vol.97, No.7 (1977)
- 2) チョッパ制御方式 専門委員会編: "チョッパ制御ハンドブック" 電気学会 (1980)
- 3) 大野, 赤松: "車両制御用 多相多重サイラス DCチョッパ方式の解析" 電気学会論文誌, Vol.88, No.954 (1968)
- 4) 松野, 古賀, 川井: "今後のチョッパ制御電車" 東芝レビュー, Vol 30, No 2 (1975-2)