

# 回生用 2 分割 2 相 초퍼의 特性

論 文

34~3~4

## Characteristics of Two Phase Chopper with Two Separate Groups of DC Motors in Regenerative Braking

韓 慶 熙\*

(Kyung-Hue Han)

### Abstract

A two phase chopper system with two separate groups of DC motors for regenerative braking is dealt with in this article. The main circuit consists of two sets of chopping parts, four diodes and two separate groups of DC motors. Although the proposed chopper circuit requires more circuit elements than the conventional two phase chopper system with combined output, it has the following advantages; (1). Ripple frequency of smoothing reactor current becomes twice as high as that of the conventional system, so the continuous current range and the ripple ratio are improved greatly. Therefore, the efficiency becomes even higher, the capacity of commutation equipment is reduced and the inductive interference becomes less. (2). Load current division becomes equalized. Therefore it is possible to drive not only series motors but also shunt, separately excited and compound motors.

### 1. 서 론

直流電氣車의 直流電動機를 초퍼(Chopper)制御하는 方式은 種래의 抵抗器制御와 比較하여, 高效率, 高性能, 高信賴度, 無保守性 및 回生制動可能등의 長點을 갖고 있어, 最近, 驅動時는 물론 制動時에도 초퍼制御하는 方式이 많이 使用되고 있다. 特히 電氣車의 초퍼방식에 의한 回生制動은, 驅動中의 電動機를 發電機로 動作시켜, 관성력에 의해 발생되는 에너지를 전기에너지로 바꾸어 전원측에 회생시킴으로써 제동력을 얻음과 동시에 회생된 에너지를 흡수·축적하여 다시 사용함으로써 에너지절약에 크게 공헌하고 있다.<sup>1)~4)</sup>

한편 초퍼제어방식은 電源電壓을 초핑(Chopping)하기 때문에 전원전류 및 전동기전류는 다같이 맥동하게 된다. 전원전류맥동에 의한 誘導障害 및 전동기전류맥동에 의한 直流機의 整流惡化의 경감 및 평활용리액터용량의 경감을 도모하기 위하여 2相 2重초퍼

방식이 사용되고 있다.<sup>1),3)</sup> 그림 1은 回生用 2相 2重 초퍼방식의 원리도로,  $M_1 \sim M_2$ 은 電機子를,  $F_1 \sim F_2$ 은 直捲界磁로서 制御トオ크의 分擔을 均일하게 하기 위한 交叉界磁방식을 표시하고 있다. 이 방식은 이미 많은 사용실적을 갖고 있으며, 기술적으로도 확립되어 있으나 다음과 같은 결점을 갖고 있다. (1) 초퍼 CH1, CH2의 時比率의 미소한 차이 및 各相抵抗分의 약간의 차이에 의하여 各相의 전류  $i_1, i_2$ 의 平均值는 크게 차이를 보여 불평형상태가 된다. (2) 各相전류  $i_1, i_2$ 의 맥동을 감소시키기 위하여 그림 1과 같이 결합리액터  $L_c$ 가 사용되고 있으나, 이 경우 발전기전류  $i_{m1}, i_{m2}$ 의 맥동은 오히려 증가한다.<sup>1) 6)</sup> (3) 2分割한 발전기운을 병렬접속하는 방식이기 때문에 전류대 속도특성이 垂下特性인 直捲機 이외의 분권특성의 발전기운전은 곤란하다.<sup>7)</sup>

上記의 결점을 全部 제거하며, 諸特性에 우수한 方式으로 2分割 2相 초퍼가 있다.<sup>8)</sup> 이번에는 2分割 2相 초퍼방식중에서 回生用초퍼를 중심으로, 발전기전류의 동동상태에 대하여 種래의 2相 2重 초퍼방식과 비교한다. 또한 各發電機의 電流分擔特性에 대하여 검토함과 동시에 制動電力 및 回生電力에 대하여 고찰한다.

\*正 會 員 : 明知大 工大 電氣工學科 教授 · 工博  
 接受日字 : 1984年 11月 29日

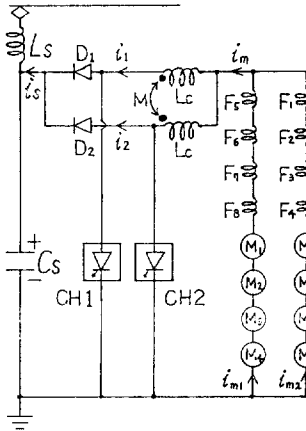


그림 1. 회생용 2상2중 초퍼의 원리도  
 Fig. 1. Fundamental two phase chopper circuit with combined output for regenerative braking

2. 회생용 2분할 2상 초퍼의 基本的 動作

駆動용 2분할 2상 초퍼에 대응하는 회생용 2분할 2상 초퍼의 基本形을 그림 2에 表示한다. 本초퍼 방식의 動作原理는 이미 發表된 바 있으나<sup>8)</sup>, 說明上 直捲機를 對象으로 動作原理를 간단히 다시 記術한다. 그림 2에서  $M_1 \sim M_6$ 은 電機子,  $F_1 \sim F_8$ 은 直捲界磁,  $E_s$ 는 電源電壓으로 ฟิล터 콘덴서  $C_s$  양단의 전압,  $L_s$ 는 ฟิล터용 리액터,  $D_1, D_1', D_2, D_2'$ 는 회생용 다이오드,  $L_c$ 는 平滑用 결합 리액터, CH1, CH2는 轉流回路를 生략한 초퍼이다. 여기에서는 그림 1의 회생용 2상 2重 방식과 같이 直捲界磁로서 交叉界磁로 表示하고 있으나, 分捲機, 複捲機 및 他勵磁機等 어떤 直流機에도 이하 說明하는 動作은 同一하다.

또 초퍼 CH1, CH2는 다이리스터, 역도통다이리스터, 전력용 트랜지스터, GTO (Gate Turn -Off Thyristor) 등의 반도체소자로 구성할 수 있고, 그의 容量은 常用의 2상 2중 초퍼 방식의 容量과 同一하다. 이 때 단위 초퍼 CH1과 CH2 및 다이오드 등은 이상적인 스위치라 가정한다. 그림 3(a)에 CH 1과 CH 2의 도통기간, 발전기 전류  $i_{m1} (= i_{m2})$ , 전원 전류  $i_s$ , 그림 2의  $P_1 Q_2$  (또는  $P_2 Q_1$ ) 간 전압 파형을 時比率  $\beta$ 가 0.5 이하와 이상으로 구분하여 표시하고 있다. 그리고 초퍼의 온(ON), 오프(OFF)에 따라 생기는 4종류의 동작모드(MODE)의 등가 회로를 그림 3(b)에 표시한다. 여기에서 회로의 간단화를 위하여, 그림 2의  $C_s$  양단의 전압을  $E_s$ ,  $M_1 \sim M_4$ 의 기전력을

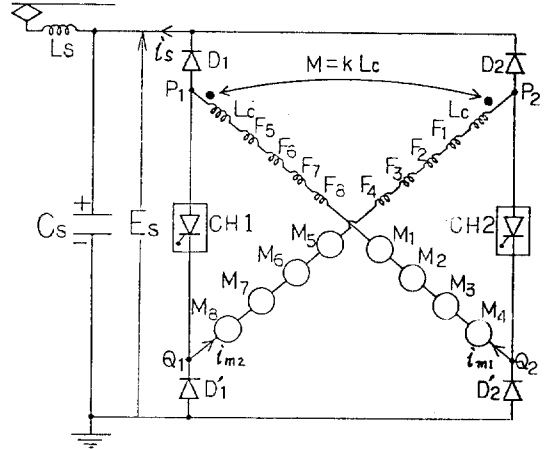


그림 2. 회생용 2분할 2상 초퍼의 원리도  
 Fig. 2. Fundamental two phase chopper circuit with two separate groups of DC motors for regenerative braking

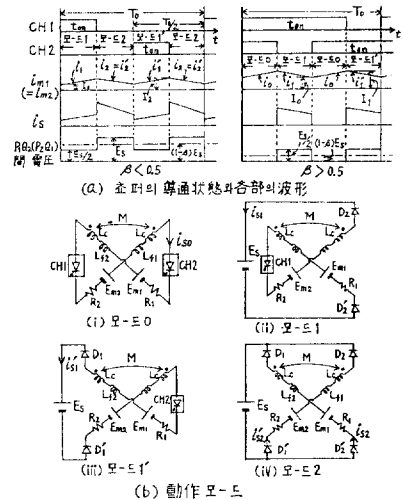


그림 3. 각부의 파형 및 동작모드  
 Fig. 3. Waveforms and operating modes

$E_{m1}, F_5 \sim F_8$ 의 인덕턴스분을  $L_{f1}, P_1 Q_2$  간 저항분을  $R_1, P_2 Q_1$  간 저항분을  $R_2$ 로 표시하고 있다. 또  $i_0, i_1, i_1', i_2, i_2'$ 는 각모드에서의 전류를 표시한다. 또한 그림 3(a)의  $i_{m1}, i_s, P_1 Q_2 (P_2 Q_1)$  간 전압 파형은 이상적인 경우를 생각하여,  $E_{m1} = E_{m2} = E_m, L_{f1} = L_{f2} = L_f, R_1 = R_2 = R$ 로서  $i_1 = i_2', i_{m1} = i_{m2} = i_m$ 의 경우를 표시하고 있다.

다음에 시비율  $\beta$ 가 0.5 이하인 경우와 0.5 이상인 경우로 구분하여 기본적 동작을 살펴본다.

(a)  $0 < \beta \leq 0.5$ 의 領域

이 영역에서는 그림 3(a)에 표시한 바와 같이 모오드 1 - 모오드 2 - 모오드 1' - 모오드 2의 동작을 반복하며, CH1과 CH2는 遞降整流로서 동작하여, 전원에 에너지가 회생됨으로써 제 동력을 얻고 있다. 모오드 1과 모오드 1'에서는 2분할한 발전기군이 직렬 접속되어 전원에 에너지를 회생한다. 이때의 전류  $i_1 (= i_1')$ 은, CH1이 도통하는 시각을 시간의 原點이라 취하여  $t=0$ 에서  $i_1 = I_1$ ,  $\xi = E_m / E_s$ 라 하면

$$i_1 = \frac{-E_s}{R} (0.5 - \xi) (1 - e^{-t/\tau}) + I_1 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

가 된다. 여기에서  $\tau = L/R$ ,  $L = L_c (1+k) + L_f$ ,  $k: L_c$ 의 결합계수 이다.

다음 모오드 2에서는 발전기군이 병렬 접속되어 전원에 에너지를 회생한다. 이때의 전류  $i_2$ 는 CH1이 오프하는 시각을 시간의 원점으로 취하여,  $t=0$ 에서  $i_2 = I_2$ 라 하면,

$$i_2 = \frac{-E_s}{R} (1 - \xi) (1 - e^{-t/\tau}) + I_2 e^{-t/\tau} \quad (2)$$

가 된다.

또 발전기전류  $i_{m1}$ 의 평균치를  $I_m$ ,  $P_1 Q_2 (P_2 Q_1)$ 간 전압  $v_{pQ}$ 의 평균치를  $V_{pQ}$ 라하면, 그림 2 및 그림 3(b)로 부터,  $V_{pQ} = E_m - R I_m$ 인 관계가 성립하므로,

$$V_{pQ} = E_m - \frac{2R}{T_0} \left\{ \int_0^{\beta T_0} i_1 dt + \int_0^{(0.5-\beta) T_0} i_2 dt \right\} = E_s \quad (3)$$

이 된다. 여기에서 시비율  $\beta$ 는,  $\beta = \text{ton} / T_0$  ( $\text{ton}$ : 각 초퍼의 도통시간,  $T_0$ : 초퍼의 주기)로서,  $\text{ton} = \beta T_0$ 이다. 또한 이 영역에서는 모오드 2의 상태에서, 일반적으로  $i_2 \neq i_2'$ 가 되기 때문에  $i_{m1}$ 과  $i_{m2}$ 의 평균치는 같게 되지 않지만 직병렬초퍼에서의 고속회생동작시와 같이 발전기전류의 맥동률을 작게 하면 양전류의 불평형을 억제할 수 있다.<sup>9)</sup>

(b)  $0.5 \leq \beta \leq 1.0$ 의 領域

이 영역에서는 모오드 0 - 모오드 1 - 모오드 0 - 모오드 1'의 동작을 반복하며, CH1과 CH2는 遞昇整流로서 동작한다. 모오드 0에서는 全發電機가 단락되어 평활용리액터에 에너지를 축적한다. 이때의 전류  $i_0$ 는 CH1이 온하는 시각을  $t=0$ 라 하고,  $t=0$ 에서  $i_0 = I_0$ 라 하면,

$$i_0 = \frac{E_s}{R} \xi (1 - e^{-t/\tau}) + I_0 e^{-t/\tau} \quad (4)$$

가 된다.

다음 모오드 1에서의 전류  $i_1$ 은 초기치  $I_1$ 의 값이 다를뿐으로 (1)식과 같이 표시된다. 그러므로  $V_{pQ}$ 는

$$V_{pQ} = E_m - \frac{2R}{T_0} \left\{ \int_0^{(\beta-0.5) T_0} i_0 dt + \int_0^{(1-\beta) T_0} i_1 dt \right\} = E_s (1-\beta) \quad (5)$$

가 된다. 이 영역에서는 2분할한 발전기군이 항상 직렬로 연결되기 때문에, 발전기전류는 항상  $i_{m1} = i_{m2}$ 가 된다.

이상과 같이 본 방식은 채강동작에서 채승동작 또는 채승동작에서 채강동작으로 연속적으로 이행이 가능하며,  $E_{m1}$ 과  $E_{m2}$ 가  $E_s$ 이하의 영역에서 회생제어가 가능하다. 또한  $L_c$ 를 2상 2重方式과 같이 병렬 접속하지 않고 각발전기군에 직렬로 접속하기 때문에  $L_c$ 의 전류는 발전기전류와 완전히 같으며, 相電流가 존재하지 않으므로, 2상 2重方式에서와 같은 相電流不平衡의 문제가 없다.<sup>8)</sup>

### 3. 基本特性

종래의 2상 2重초퍼방식에서는  $L_c$ 에 단위초퍼의 맥동전류가 흘러 발전기전류에 비해 맥동이 크고, 전류연속범위도 적어진다. 이에 대하여 본 방식은  $L_c$ 와 발전기는 직렬 접속되기 때문에 양자의 전류는 항상 같고,  $L_c$  전류의 맥동주파수도 2배가 되므로 전류의 연속범위가 넓어지고, 맥동률은 현저하게 감소되며, 전원전류의 고조파성분도 개선된다.<sup>8)</sup> 이하 양전류의 연속조건 및 발전기의 전류분담 특성에 대하여 기술한다.

#### 3.1 평활용리액터 $L_c$ 및 발전기 전류의 연속조건

본 방식에 있어서 발전기전류(= $L_c$  전류)는 회로조건에 의해 그림 4(a)와 같이 단속인 경우가 있다. 그러므로 (1), (2)식 및 (4)식의 초기치는 전류의 도통상태와 관련하여 구하여 진다. 그림 4의 (a)그림과 (b)그림으로 부터 (점선참조),  $0 < \beta \leq 0.5$ 의 영역에서는 초기치  $I_1$ 이,  $I_1 \geq 0$ 인 관계가 전류연속의 조건이 되며,  $0.5 \leq \beta \leq 1.0$ 의 영역에서는 초기치  $I_0$ 가,  $I_0 \geq 0$ 인 관계가 연속의 조건이 된다. 정상상태에서  $0 < \beta \leq 0.5$  영역에서의  $I_1$ 의 값은, (1)식에서  $t$ 가  $t = \beta T_0$ 일 때  $i_1 = I_2$ 이고, (2)식에서  $t = (0.5 - \beta) T_0$ 일 때  $i_2 = I_1$ 인 관계로 부터  $I_1$ 을 구하면,

$$I_1 = \frac{E_s}{R} \left\{ \xi - \frac{2 - e^{-\rho_0(0.5-\beta)} - e^{-0.5\rho_0}}{2(1 - e^{-0.5\rho_0})} \right\} \quad (6)$$

가 된다. 여기에서  $\rho_0$ 는 平滑係數<sup>10)</sup>로서  $\rho_0 = T_0 / \tau$

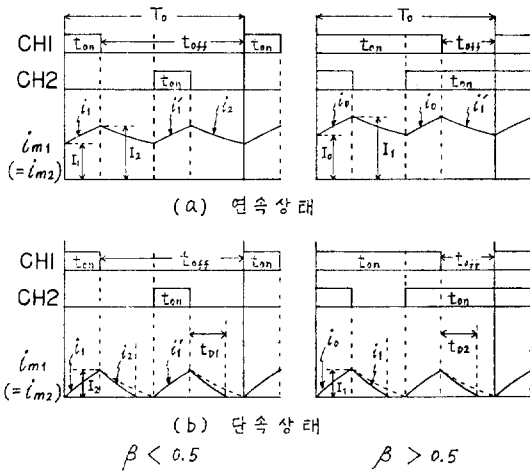


그림 4. 발전기의 전류파형

Fig. 4. Waveforms of generator currents

$=T_0R/L = T_0R/L_c(1+k+L_s/L_c)$ 이다. 이 식에 전류연속조건  $I_1 \geq 0$ 를 적용하면,

$$\xi \geq \frac{2 - e^{-\rho_0(0.5-\beta)} - e^{-0.5\rho_0}}{2(1 - e^{-0.5\rho_0})} \quad (7)$$

가 얻어진다.

다음  $0.5 \leq \beta \leq 1.0$  영역에서의 초기치  $I_0$ 의 값은, (4)식에서  $t = (\beta - 0.5)T_0$  일때  $i_0 = I_1$  이고, (1)식에서  $t = (1 - \beta)T_0$  일때  $i_1 = I_0$ 인 관계로 부터  $I_0$ 를 구하면,

$$I_0 = \frac{Es}{R} \left\{ \xi - \frac{1 - e^{-\rho_0(1-\beta)}}{2(1 - e^{-0.5\rho_0})} \right\} \quad (8)$$

가 된다. 이 식에 연속조건  $I_0 \geq 0$ 를 적용하여,

$$\xi \geq \frac{1 - e^{-\rho_0(1-\beta)}}{2(1 - e^{-0.5\rho_0})} \quad (9)$$

를 얻는다. 종래의 2相2重方式과 비교하기 위하여

表 1. 各電流의 連續境界式

Table. 1. Boundary equations of the armature and smoothing reactor current continuity

(a) 驅 動

	方式	2 分割 2 相	2 相 2 重
	시비율의 範圍		
電動機電流	$0 \leq \beta \leq 0.5$	$\xi \geq \frac{e^{-\rho_0(0.5-\beta)} - e^{-\rho_0/2}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})}$	左 同
	$0.5 \leq \beta \leq 1$	$\xi \geq \frac{1 + e^{-\rho_0(1-\beta)} - 2e^{-\rho_0/2}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})}$	左 同
리액터電流	$0 \leq \beta \leq 0.5$	$\xi \geq \frac{e^{-\rho_0(0.5-\beta)} - e^{-\rho_0/2}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})}$	$\xi \geq \frac{e^{-\rho_c(0.5-\beta)} - e^{-\rho_c/2}}{2(1 - e^{-\rho_c/2})} \cdot \frac{R}{R_c} \cdot \frac{e^{-\rho_c(0.5-\beta)} - e^{-\rho_c/2}}{2(1 + e^{-\rho_c/2})}$
	$0.5 \leq \beta \leq 1$	$\xi \geq \frac{1 + e^{-\rho_0(1-\beta)} - 2e^{-\rho_0/2}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})}$	$\xi \geq \frac{1 + e^{-\rho_0(1-\beta)} - 2e^{-\rho_0/2}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})} \cdot \frac{R}{R_c} \cdot \frac{1 - e^{-\rho_c(1-\beta)}}{2(1 + e^{-\rho_c/2})}$

(b) 回 生

	方式	2 分割 2 相	2 相 2 重
	시비율의 範圍		
電動機電流	$0 \leq \beta \leq 0.5$	$\xi \geq \frac{2 - e^{-\rho_0(0.5-\beta)} - e^{-\rho_0/2}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})}$	左 同
	$0.5 \leq \beta \leq 1$	$\xi \geq \frac{1 - e^{-\rho_0(1-\beta)}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})}$	左 同
리액터電流	$0 \leq \beta \leq 0.5$	$\xi \geq \frac{2 - e^{-\rho_0(0.5-\beta)} - e^{-\rho_0/2}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})}$	$\xi \geq \frac{2 - e^{-\rho_0(0.5-\beta)} - e^{-\rho_0/2}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})} + \frac{R}{R_c} \cdot \frac{e^{-\rho_c(0.5-\beta)} - e^{-\rho_c/2}}{2(1 + e^{-\rho_c/2})}$
	$0.5 \leq \beta \leq 1$	$\xi \geq \frac{1 - e^{-\rho_0(1-\beta)}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})}$	$\xi \geq \frac{1 - e^{-\rho_0(1-\beta)}}{2(1 - e^{-\rho_0/2})} + \frac{R}{R_c} \cdot \frac{1 - e^{-\rho_c(1-\beta)}}{2(1 + e^{-\rho_c/2})}$

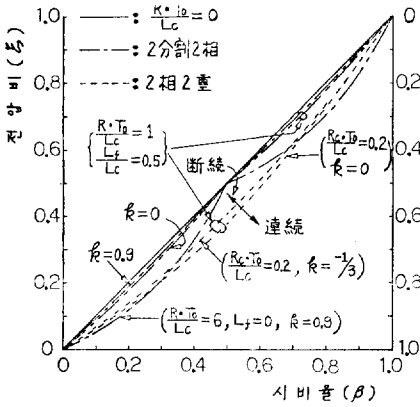


그림 5.  $L_c$  전류의 연속경계조건  
 Fig. 5. Boundary condition of continuous and discontinuous smoothing reactor current

양방식에 대한 발전기전류 및  $L_c$  전류의 연속조건을 표 1에 표시한다. 참고로 양방식에 대한 구동시의 조건도 표시한다. 양방식은 회로조건이 다르므로 여기에서는 저항  $R$ 을  $R = R_c + R_m$ 로 분리하여,  $R_c$ 는  $L_c$ 의 저항,  $R_m$ 은 발전기 회로의 저항으로 구분했다. 또한  $\rho_0 = T_0 / \tau$ 이고,  $\rho_c = R_c T_0 / L_c (1 - k)$ 이다. 그림 5에  $L_c$  전류의 연속경계조건의 계산예를 표시한다. 여기에서 본 방식에서는  $R T_0 / L_c, L_f / L_c, k$ 에 의해 정해지지만, 종래의 2상 2중방식에서는 이 외에  $R_c T_0 / L_c$ 에 의해서도 변하여  $R_c T_0 / L_c$ 가 커질수록 연속범위는 좁아진다. 양방식 공히  $R T_0 / L_c$ 가 작을수록,  $L_f$ 가 클수록 연속범위는 넓어진다. 종래방식에 있어서  $R T_0 / L_c = 1, R_c T_0 / L_c = 0.2, L_f / L_c = 0.5$ 의 경우의 경계가 그림 5의 점선으로서,  $k = 0$ 에 비하여  $k$ 를 負의 값 (그림에서는  $k = -1/3$ )으로 크게 할수록 연속범위는 넓어진다. 이에 대하여 본 방식에서는  $k$ 를 正으로 크게 할수록 연속범위가 넓어져서  $R T_0 / L_c = 1, L_f / L_c = 0.5$ 인 경우에 종래방식과 비교하면, 연속범위가 대폭으로 넓어지는 것을 알 수 있다. 일례로 본 방식에서  $R T_0 / L_c = 6, k = 0.9, L_f = 0$ 로 하여도 연속범위는 종래방식과 비슷하다.

다음 발전기전류의 연속경계조건은 표 1에 표시하는 바와 같이 식은 같지만,  $k$ 의 값을 종래방식에서는 負(실용적으로는  $-0.3 \sim -0.4$ )의 값으로, 본 방식에서는 正의 값으로 취하기 때문에 결과적으로 본 방식의 연속범위가 넓게 된다. 그림 5에서 一點鎖線은 본 방식에서의 발전기전류의 연속경계도 표시하고 있는 것이다.

발전기전류가 단속하는 경우, 예를들면 전류평균치를 구하기 위해서는, 그림 4 (b)의 전류지속시간  $t_{D1}$ 과  $t_{D2}$ 를 구할 필요가 있다.  $0 < \beta \leq 0.5$  영역에 대해서, (1)식의  $I_1$ 은  $I_1 = 0$ 이며, (2)식의 초기치  $I_2$ 는, (1)식에서  $t = \beta T_0$ 일때의 값이 되고, 또한 (2)식에서  $t = t_{D1}$ 일때  $i_2 = 0$ 가 되는 관계로부터,

$$t_{D1} = \tau \cdot \ln \frac{0.5 - (\xi - 0.5)^{-\rho_0 \beta}}{1 - \xi} \quad (10)$$

가 얻어진다.

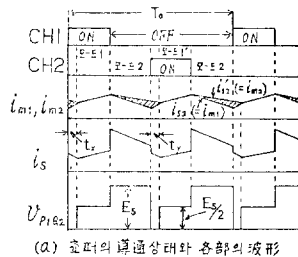
$0.5 \leq \beta \leq 1.0$ 의 영역에서는, (4)식에서  $I_0 = 0$ 이며,  $t = (\beta - 0.5) T_0$ 일때의 값이 (1)식의  $I_1$ 의 값이 되고, (1)식에서  $t = t_{D2}$ 일때  $i_1 = 0$ 인 관계로부터,

$$t_{D2} = \tau \cdot \ln \frac{0.5 - \xi e^{-\rho_0 (\beta - 0.5)}}{0.5 - \xi} \quad (11)$$

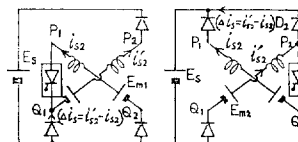
가 된다. 이들 두 식으로부터 전류지속시간  $t_{D1}, t_{D2}$ 는  $\rho_0, \beta, \xi$ 의 함수로 표시되나 일반적으로  $\rho_0$ 가 작을수록  $t_{D}$ 는 크게되어 연속상태로 되기 쉽다.

### 3.2 발전기의 전류분담 특성

2 分割한 발전기군을 그림 1과 같이 병렬 접속하는 방식에 있어서는, 속도변동이 큰 直捲機의 경우는 각 발전기군의 전류분담의 차는 작아서 문제가 없지만 분권특성의 발전기에서는 일반적으로 각 발전기특성의 차이, 각발전기군 枝路의 저항분 및 인덕턴스분의 차이등에 의해  $i_{m1}$ 과  $i_{m2}$ 의 평균치는 상당한 차이를 갖게되어 전류분담이 균일하게 안된다. 그런데 본 방식에서는  $0.5 \leq \beta \leq 1.0$ 의 영역에서 2분할한 발전기군이 항상 직렬접속되기 때문에  $i_{m1} = i_{m2}$ 가 된



(a) 2 分割의 導通상태와 各部分의 波形



(b)  $t_r$ 의 등가회로 (c)  $t_f$ 의 등가회로

그림 6.  $i_{m1} < i_{m2}$ 의 경우의 파형과 등가회로  
 Fig. 6. Waveforms and equivalent circuit in the case of  $i_{m1} < i_{m2}$

다. 그러나  $0 < \beta \leq 0.5$ 의 영역에서 양발전기군이 병렬 접속되는 모오드2의 기간이 존재하기 때문에, 이 영역에서는  $i_{m1} \neq i_{m2}$ 가 된다. 이하 분권기 또는 타역자기( $L_f = 0$ )를 대상으로 전류분담특성에 대하여 고찰한다. 그림 6(a)에 이 경우의  $i_{m1}$ ,  $i_{m2}$ ,  $i_s$ ,  $P_1$   $Q_2$ 간 전압  $V_{P1Q2}$  등의 파형을 표시한다. 단 모오드2의 기간에서는  $i_{m1} = i_2 < i_{m2} = i_2'$ 의 경우를 취하고 있다. 여기에서 기간  $t_x$ 는 그림 6(b)의 증가회로로, 기간  $t_y$ 에서는 그림 6(c)의 증가회로로서  $i_2'$ 는 감소하고,  $i_2$ 는 증가하여  $i_2 = i_2'$ 의 시점에서 다음 모오드1 또는 1'에 이행한다. 기간  $t_x$ 와  $t_y$ 는 도통소자가 다름뿐 회로조건은 같다. 이 회로의 동작은 직병렬초퍼의 동작과 같지만, 본 방식에서는 동작주기가  $T_0/2$ 가 되기 때문에 전류맥동률이 작게 되어 불평형의 정도를 개선할 수 있다. 여기에서 계산을 간단히 하기 위하여 저항분을 무시하고,  $E_{m1} = E_{m2}$ 의 경우의 전류분담 특성을 조사한다. 두 발전기군의 전압비  $b = E_{m2}/E_{m1}$ 이라 하고,  $i_{m1}$ 의 평균치  $I_{m1}$ 과  $i_{m2}$ 의 평균치  $I_{m2}$ 와의 차  $\Delta I_m$  (그림 6(a)의 斜線部의 평균치)을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta I_m = \frac{E_s T_0}{L_c (1-k)} \frac{(0.5 - \beta)^2}{2(1-\beta)(b-1) - 1} \quad (12)$$

여기에서,  $(I_{m1} + I_{m2})/2 = I_m$ 라 하고,  $\Delta I_m/I_m$ 을 불평형률이라 정의한다. 불평형률을  $E_s T_0/L_c I_m$ 으로 나누어 규격화한 불평형률의 계산예를 그림 7에 표시한다. 그림에서  $\Delta I_1$ 과  $\Delta I_2$ 는 각각  $k=0$ 에서의  $i_{m1}$ 과  $i_{m2}$ 의 최대치와 최소치와의 차를 표시한다. 이 그림으로부터 전압비  $b$ 와 평활용리액터의 결합계수  $k$ 가 작을 수록 전류분담이 균일하게 됨

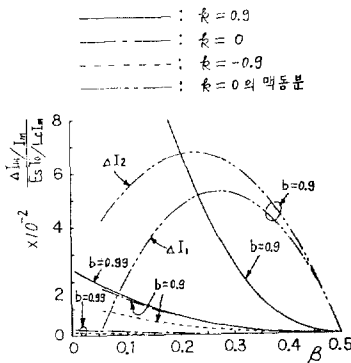


그림 7. 각 발전기군의 전류 평균치의 차와 맥동분  
Fig. 7. Difference between the average armature currents and the armature current ripple

을 알 수 있다. 여기에서  $b = 1$ 이면  $\Delta I_m = 0$ 이고,  $\Delta I_1 = \Delta I_2$ 가 된다. 본 방식에서의 불평형률은, 전류평형화작용이 있는 직병렬초퍼방식에서의 불평형률과 비교하면 현저하게 작은 값이다.<sup>8)</sup>

#### 4. 回生制動特性

回生制動的 경우, 직류발전기의 전기자가 발생하는 全電力을 制動電力이라 하며, 이것은 전원측에 回生되는 回生電力과 저항에서 소비되는 發電制動電力과의 合으로 표시된다.<sup>9)</sup>

##### 4.1 制動電力 및 制動토크

발전기가 발생하는 제동전력은, 발전기의 단자전압  $E_m$ 에 발전기의 평균전류  $I_m$ 을 곱함으로써 구해지며, 제동토크는 토크정수  $k_T$ 에 발전기의 평균전류  $I_m$ 을 곱함으로써 얻어진다. 그런데 필요로 하는 제동전력 또는 제동토크에 의하여 발전기전류는 연속 또는 단속하게 되므로 각 조건하에서의 제동전력  $P_m$ 과 제동토크  $T_m$ 을 산출한다.

(a)  $0 < \beta \leq 0.5$ 의 영역

연속시 : (1)식과 (2)식을 적용하여

$$P_m = E_m \cdot I_m = E_m \cdot \frac{2}{T_0} \left\{ \int_0^{\beta T_0} i_1 dt + \int_0^{(0.5-\beta)T_0} i_2 dt \right\} = \frac{E_m^2}{R} \cdot \xi (\xi + \beta - 1) \quad (13)$$

$$T_m = k_T \cdot I_m = k_T \cdot \frac{2}{T_0} \left\{ \int_0^{\beta T_0} i_1 dt + \int_0^{(0.5-\beta)T_0} i_2 dt \right\} = k_T \cdot \frac{E_s}{R} (\xi + \beta - 1) \quad (14)$$

가 된다. 토크정수  $k_T$ 는 회전속도를 각속도  $\omega$ 로 표시하면 이것은 전압정수와 같은 값이다.

단속시 : (1), (2)식 및 (10)식을 적용하여

$$P_m = E_m \cdot I_m = E_m \cdot \frac{2}{T_0} \left\{ \int_0^{\beta T_0} i_1 dt + \int_0^{t_{D1}} i_2 dt \right\} = \frac{E_s^2}{R} \cdot 2 \xi \left\{ (\xi - 0.5) \beta - \frac{1-\xi}{\rho_0} \ln \frac{0.5 - (\xi - 0.5)e^{-\rho_0 \beta}}{1-\xi} \right\} \quad (15)$$

$$T_m = k_T \cdot I_m = k_T \cdot \frac{2 E_s}{R} \left\{ (\xi - 0.5) \beta - \frac{1-\xi}{\rho_0} \ln \frac{0.5 - (\xi - 0.5)e^{-\rho_0 \beta}}{1-\xi} \right\} \quad (16)$$

가 된다.

(b).  $0.5 \leq \beta \leq 1.0$ 의 영역

연속시 : (1)식과 (4)식을 적용하여

$$P_m = E_m \cdot I_m = E_m \cdot \frac{2}{T_o} \left\{ \int_0^{(\beta-0.5)\tau_o} i_o dt + \int_0^{(1-\beta)\tau_o} i_1 dt \right\}$$

$$= \frac{E_s^2}{R} \cdot \xi (\xi + \beta - 1) \quad (17)$$

$$T_m = k_r \cdot I_m = k_r \cdot \frac{E_s}{R} (\xi + \beta - 1) \quad (18)$$

단속시 : (1), (4)식 및 (11)식을 적용하여,

$$P_m = E_m \cdot I_m = E_m \frac{2}{T_o} \left\{ \int_0^{(\beta-0.5)\tau_o} dt + \int_0^{t_{D2}} i_1 dt \right\}$$

$$= \frac{E_s^2}{R} \cdot 2 \xi \xi (\beta - 0.5) + \frac{\xi - 0.5}{\rho_o} \ln \frac{0.5 - \xi e^{-\rho_o(\beta-0.5)}}{0.5 - \xi} \quad (19)$$

$$T_m = k_r \cdot I_m = k_r \cdot \frac{2 E_s}{R} \left\{ \xi (\beta - 0.5) + \frac{\xi - 0.5}{\rho_o} \ln \frac{0.5 - \xi e^{-\rho_o(\beta-0.5)}}{0.5 - \xi} \right\} \quad (20)$$

가 얻어진다. 전류가 연속하는 경우에는,  $\beta < 0.5$  또는  $\beta > 0.5$ 에 관계없이,  $P_m$  (13식과 17식) 및  $T_m$  (14식과 18식)은 同一式으로 표현된다. 전압비  $\xi$ 를 퍼라미터로서 시비율  $\beta$ 와 규격화한 제동전력  $P_m / (E_s^2 / R)$ 의 관계를 그림 8에 표시한다. 좌표의 원점에서부터 어느정도의 제동전력을 갖는 부분(제동전력이 거의 0인 장소)까지는 전류가 단속하는 영역이다. 전압비  $\xi$ 가 클 수록 최대제동전력은 커진다. 그리고(13, 14) (17식 및 18식)으로부터 아는 바와 같이 전류가 연속하는 범위에서  $P_m$  및  $T_m$ 은 평형계수  $\rho_o$ 와 無關係이다. 단속하는 범위에서는  $\rho_o$ 가 클 수록  $P_m$ ,  $T_m$ 은 커지지만 그 차이는 微小하여,  $\rho_o = 0.01 \sim 1.0$ 에서

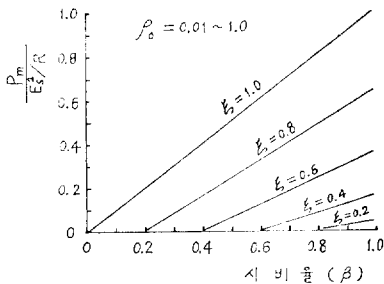


그림 8. 시비율에 대한 제동전력  
Fig. 8. Relations between braking power and conduction-ratio

거의 같은 값을 갖는다. 그러므로 어느정도 이상의 제동전력을 얻기 위해서는 발전기전류가 연속하도록  $\beta$ 의 값을 제어할 필요가 있다. 제동토크  $T_m$ 은,  $P_m$ 의 값을  $E_m$ 으로 나누고  $k_r$ 를 곱해준 관계로서, 계산예를 생략하지만,  $P_m$ 의 특성과 유사하다.

4.2 回生電力과 회생효율

다음은 전원에 회생되는 회생전력  $P_r$  및 회생효율  $\eta$ 에 대하여 고찰한다. 회생전력  $P_r$ 은, 전원전압  $E_s$ 와 전원에 회생되는 평균전류  $I_s$ 를 곱하므로써 얻어진다.

(a)  $0 < \beta \leq 0.5$ 의 영역

연속시 : 그림 3(a) 및 (1), (2)식을 적용하여,

$$P_r = E_s \cdot I_s = E_s \cdot \frac{2}{T_o} \left\{ \int_0^{\beta\tau_o} i_1 dt + \int_0^{(0.5-\beta)\tau_o} 2 i_2 dt \right\}$$

$$= \frac{E_s^2}{R} \left\{ 2(\xi - 1) + \beta(3 - 2\xi) + \frac{(1 - e^{-\rho_o\beta})(1 - e^{-\rho_o(0.5-\beta)})}{\rho_o(1 - e^{-\rho_o\cdot 0.5})} \right\} \quad (21)$$

단속시 : 그림 3(a), 그림 4(b) 및 (1), (2)식과 (10)식을 적용하여

$$P_r = E_s \cdot I_s = E_s \cdot \frac{2}{T_o} \left\{ \int_0^{\beta\tau_o} i_1 dt + \int_0^{t_{D1}} 2 i_2 dt \right\} +$$

$$= \frac{E_s^2}{R} \cdot \frac{2}{\rho_o} \left\{ (\xi - 0.5)(1 + \rho_o\beta e^{-\rho_o\beta}) + 2(\xi - 1) \ln \frac{0.5 - (\xi - 0.5)e^{-\rho_o\beta}}{1 - \xi} \right\} \quad (22)$$

(b)  $0.5 \leq \beta \leq 1.0$ 의 영역

연속시 : (1)식 및 그림 3(a)를 적용하여

$$P_r = E_s \cdot I_s = E_s \cdot \frac{2}{T_o} \int_0^{(1-\beta)\tau_o} i_1 dt$$

$$= \frac{E_s^2}{R} \left\{ (2\xi - 1)(1 - \beta) + \frac{(1 - e^{-\rho_o(1-\beta)})(1 - e^{-\rho_o(\beta-0.5)})}{\rho_o(1 - e^{-\rho_o\cdot 0.5})} \right\} \quad (23)$$

단속시 : (1), (11)식 및 그림 3(a), 그림 4(b)를 적용하여,

$$P_o = E_s \cdot I_s = \frac{2}{T_o} \int_0^{t_{D2}} i_1 dt$$

$$= \frac{E_s^2}{R} \cdot \frac{2}{\rho_o} \left\{ \xi(1 - e^{-\rho_o(\beta-0.5)}) + (\xi - 0.5) \ln \frac{0.5 - \xi e^{-\rho_o(\beta-0.5)}}{0.5 - \xi} \right\} \quad (24)$$

가 얻어진다.  $\xi$ 를 퍼라미터로서  $\beta$ 에 대하여 규격화

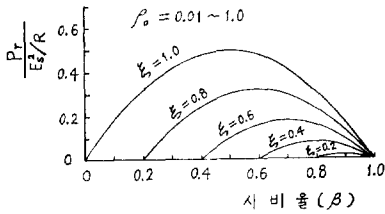


그림 9. 시비율에 대한 회생전력

Fig. 9. Relations between regenerative braking power and conduction-ratio

한 회생전력과의 계산예를 그림 9에 표시한다. 제동 전력과 같이  $\rho_o$ 의 값에 대해서 회생전력치의 변동은 극히 미소하며,  $\xi$ 가 클 수록 최대회생전력은 커짐을 알 수 있다.

그리고, 회생효율  $\eta$ 는 다음식으로 정의된다.

$$\eta = \text{회생電力}(P_r) / \text{全制動電力}(2 P_m) \quad (25)$$

그러므로  $\eta$ 의 값은 (21)식 / {2 × (13)식}, (22)식 / {2 × (15)식}, (23)식 / {2 × (17)식}, (24)식 / {2 × (19)식}으로 구해진다.

또한, {全制動電力(2 P<sub>m</sub>) - 회생電力(P<sub>r</sub>)} = 發電制動電力으로서, 저항 및 초퍼회로에서 소비되는 전력이다.

### 5. 實驗 및 考察

轉流回路 및 스나바(snubber) 회로를 포함한 본 초퍼방식의 主實驗圖를 그림 10에 表示한다. 實驗用 直流機의 定格은 2.2 kW, 100 V, 1800 rpm의 直捲機 2臺로서, 電機子回路의 全抵抗은 1.2 Ω이다. 또 L<sub>c</sub> 인덕턴스분은 6.2 mH이고, 抵抗分은 0.8 Ω이다. 초퍼주기는 5 mS 一定이고, E<sub>s</sub>는 70 V로 유지했다. 그리고, 發電機電壓 E<sub>m</sub>은 回生動作에 수반하여

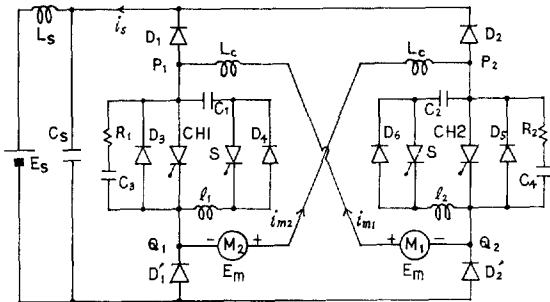
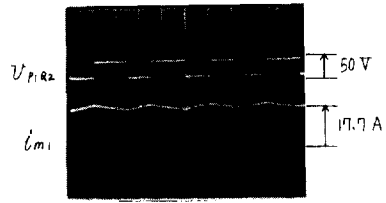
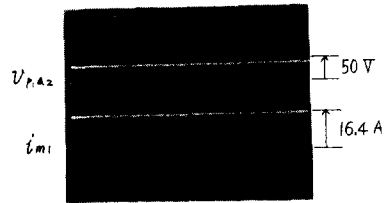


그림 10. 실험회로

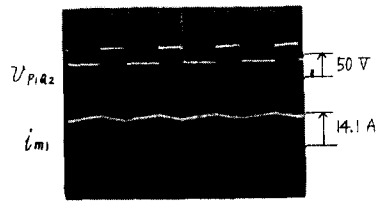
Fig. 10. An experimental circuit



(a) β = 0.7



(b) β = 0.5



(c) β = 0.3

그림 11. 동작파형례

Fig. 11. Operating waveforms

變化하므로, 發電機의 界磁捲線을 他勵磁로 定格電流를 흘리는 상태에서 電機子를 固定하여, 이것에 직렬로 電源을 접속함으로써, 等價의인 發電機의 發生電壓源으로서 동작시켰다.

그림 11에 동작파형예를 표시한다. 時比率이 0.5의 부근에서 電機子電流  $i_m$ 은 純直流에 가까운 파형을 표시하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 12는 時比率

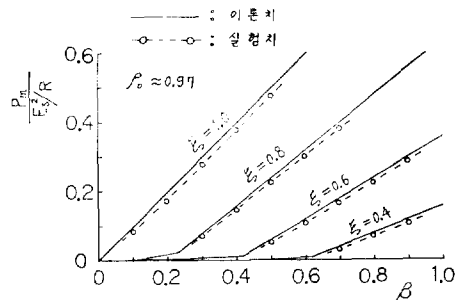


그림 12. 시비율에 대한 제동전력 P<sub>m</sub>

Fig. 12. Relations between braking power and conduction-ratio



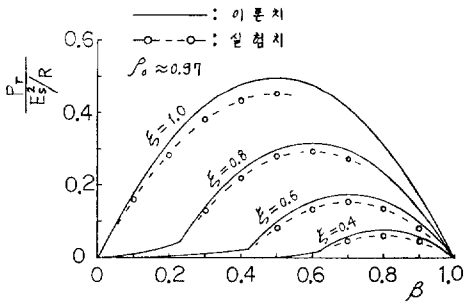


그림 13. 시비율에 대한 회생전력 Pr

Fig. 13. Relations between regenerative braking power and conduction-ratio

에 대한 制動電力을, 그림 13은 회생電力의 관계를 표시한다. 理論値에 따른 실험결과가 얻어지고 있지만, 多少의 差가 있다. 이것은 다이리스터 및 다이오드 등의 順電壓降下損 및 스나바 (snubber) 회로, 電機子 電流의 맥동에 기인하는 損失등을 고려하지 않았기 때문이라 생각된다.

### 6. 결 론

2분割2相 초퍼에 대하여 이론 및 실험적으로 고찰한 결과 종래의 2相2重 초퍼 방식과 비교하여 다이오드 2개가 증가하는 단점이 있지만, 回路要素가 같은 경우, 本方式이 발전기전류의 연속범위가 넓어지므로, 電流脈動率이 작아지며, 平滑用 리액터의 용량을 경감할 수 있는 장점을 갖는다. 또한 2相2重 방식에서는 存在하지 않는 발전기전류의 전류평형화 작용이 있으며, 전류불평형을 고찰한 결과 상당히 작은 값을 갖는 것을 확인했다. 그러므로 交叉界磁制御가 가능한 直捲機 이외의 分捲特性의 발전기운전도 가능함을 지적했다. 그리고 本方式에서의 制動電力 및

회생電力의 관계식을 유도하였으며, 실험적으로 고찰했다.

本 研究는 韓國科學財團의 1983年度 後半期 研究費支援計劃에 의한 것임을 밝힘과 同時에 關係各位에 감사하는 바입니다.

### 參考文獻

- 1) 초췌제어방식전문위원회: "초췌제어 핸드북" 電氣学会, 1980. pp. 158 ~ 195
- 2) 成戶, 四方: "電鉄における 회生 브레이크 併用 초췌제어장치" 三菱電機技報, Vol. 53, No. 12, 1979
- 3) 川田: "営団有楽町線用 초췌제어電車" 電氣鉄道, Vol. 28, No. 4, 1974
- 4) 松田, 古質, 川井: "今後の 초췌제어電車" 東芝レビュー, Vol. 30, No. 2, 1974.
- 5) 大野, 赤松: "車兩制御用多重 사이리스타 DC 초췌제어 방식의 解析" 電氣学会論文誌(B), Vol. 88, No. 3, 1968.
- 6) 奏泉寺: "초췌제어가 다른 電氣機器에 及ぼす 影響" 電氣四学会連合大会, No. 106, 1973
- 7) R.A.VAN ECK: "The separately excited DC traction motor applied to DC and single phase AC rapid transit systems and electrified railways, Part. I" IEEE Trans, Vol. IGA-7, No. 5, 1971
- 8) 韓, 林, 上田: "2분割2相 초췌의 特性" 電氣学会論文誌 (B), Vol. 102, No. 12, 1982
- 9) 曾根: "直並列 초췌와 그 電流平衡特性" 電氣鉄道研究会資料, RT-72-3, 1972.
- 10) 木村, 塩谷: "直流他勵電動機의 초췌제어에 의한 회생制動について" 電氣学会論文誌 (B), Vol. 97, No. 7, 1977.