

# Load Insensitive DC Chopper의 特性解析에

## 關한 研究

論 文

28~1~4

### A Study on the Analysis of the Load Insensitive DC Chopper

元 鍾 洙\* 朴 相 律\*\*  
(Jong Soo Won, Sang Yul Park)

#### Abstract

The most difficult problem encountered in the DC Chopper is the improvement in its output waveforms and the commutation failure.

Thus, this paper deals with the Load Insensitive DC Chopper that produces a quasi-pure square wave over the entire load range, and doesn't fail the commutation. The authors compared voltag and current waveforms from the laboratory model with those from the computer simulation, and its characteristics is discussed.

#### 1. 緒 論

半導體 技術의 進步에 따라 直流電力 變換裝置로 DC 초퍼가 開發되어 急速히 普及되고 있으며, 이에 對한 많은 論文이 發表되었으나, 大部分의 研究가 초스 초퍼의 이의 變形回路에 關한 것이었다. 초스 초퍼에서는 轉流失敗를 防止하기 위한 補充電回路가 必要할 뿐만 아니라, 이의 轉流펄스 電流가 負荷로 흐르기 때문에 非對稱波에 의한 高調波 成分이 增加하므로 電動機 過熱의 原因이 된다. 그러나 Load Insensitive DC 초퍼는 초스 초퍼의 負荷에 나타나는 轉流펄스를 完全히 除去하여 理想的인 矩形波 出力을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 補充電回路없이도 轉流失敗 없이 安定된 動作을 하고, 轉流失敗가 일어났을 때에도 自然히 回復될 수 있는 利點을 갖고 있다. 이러한 Load Insensitive DC 초퍼가 1975年 Barna Szabados에 의하여 提示된 이후에 이에 대한 解析이나 特性에 대한 研究가 거의 없었으므로 本 論文에서는 이를 디지털 컴퓨터를 使用하여 解析하고 그 特性을 實驗結果와 比較함으로써 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 設計를 可能하도록 하였다.

#### 2. Load insensitive DC 초퍼

그림 1은 초스 초퍼 回路를 表示한 것이다. 콘덴서 C가 그림과 같이 充電이 되어 있을 때 SCR S<sub>1</sub>을 導通시키면 C의 極性이 反轉되고 다시 S<sub>2</sub>를 導通시키면 S<sub>1</sub>은 強制轉流되고, 電源 E에서 始作하여 콘덴서 C, SCR S<sub>2</sub>, 리액터 L<sub>1</sub>, 負荷로의 回路가 構成된다. 따라서 콘덴서 C가 充電되고, 負荷에는 그림 2의 빗금친 부분과 같은 轉流펄스가 나타나게 된다. 이러한 轉流펄스는 負荷에 過電壓을 걸리게 하는 原因이 되고, 또한 電動機 負荷일 때는 高調波 成分으로 因하여 過熱이 된다. 그리고 만약 콘덴서 C가 그림 1에 表示한 極性으로 充電되지 못한 狀態에서 SCR S<sub>2</sub>을 導通시키면 轉流失敗를 惹起하여 負荷에 對한 電壓制御를 不可能하게 한다. 그러므로 콘덴서 C를 항상 充電시켜 줄 수 있는 補充電回路를 追加하거나 轉流失敗가 일어났을 때 負荷電流를 一時的으로 遮斷하여 制御機能을 回復할 수 있도록 하여야 한다. 그러나 그림 3에 圖示된 Load Insensitive DC 초퍼는 轉流回路가 負荷와 完全히 獨立되어 있으므로 轉流失敗가 거의 일어나지 않으며, 또한 만약 轉流失敗가 일어났을 경우에도 自然히 回復될 수 있는 機能을 가진다.

\* 正會員 : 서울대 工大 電氣工學科 副教授

\*\* 正會員 : 서울대 大學院

接受日字 : 1978年 11月 29日

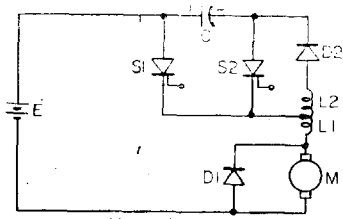


그림 1. 존스 쇼퍼 회로  
Fig. 1. Jones Chopper circuit.

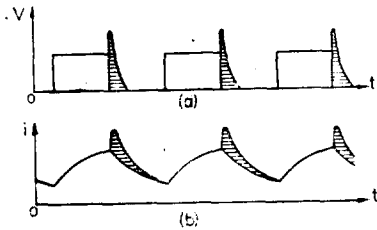


그림 2. 존스 쇼퍼회로의波形  
(a) 負荷電壓 (b) 負荷電流  
Fig. 2. Waveforms for Jones Chopper.  
(a) Load voltage (b) Load current.

그림 3에서 콘덴서 C가 그림과 같이 충전되어 있다고假定하고 S<sub>1</sub>과 S<sub>3</sub>를 導通시키면, S<sub>1</sub>을 통해서 負荷電流가 흐르는 한편 L<sub>1</sub>과 C를 통한 공진회로가 형성되므로 콘덴서 C가 反對方向으로 다시 충전되고 충전이 끝나면 S<sub>3</sub>는 자연히 오프된다. 온 시간이 지난 후 S<sub>2</sub>를 導通시키면 콘덴서 C와 다이오드 D<sub>1</sub>을 통해서 S<sub>1</sub>에 逆電壓을 가하게 되어 S<sub>1</sub>은 強制轉流 되고, 電源電流는 S<sub>2</sub>와 콘덴서 C를 통하여 흐르게 된다. 따라서 콘덴서 C가 다시 충전되므로 S<sub>2</sub>는 자연히 오프되고, L<sub>2</sub>에 남은 殘留에너지는 다이오드 D<sub>2</sub>를 통해서 放電한다. 한편 S<sub>2</sub>이 오프되면 負荷가 還流다이오드 D<sub>1</sub>을 통해서 短絡되므로 負荷가 저장되어 있던 에너지는 還流다이오드 D<sub>1</sub>을 통해서 放電하게 된다.

위에서 說明한 바와 같이 轉流콘덴서 C는 L<sub>2</sub>와 S<sub>2</sub>를 통해서 충전되고 S<sub>3</sub>와 L<sub>1</sub>을 통해서 極性이 反轉된다. 그리고 다이오드 D<sub>1</sub>이 導通되어 S<sub>1</sub>에 逆電壓을 가하게 되므로 轉流회路는 負荷와 完全히 獨立되어 있다. 따라서 負荷는 轉流의 影響을 받지 않아 理想的인 矩形波出力을 얻을 수 있다.

존스 쇼퍼는 負荷變化에 따라 轉流콘덴서가 충분한 轉流 에너지를 확보할 수 없을 경우에 轉流失敗가 發生하게 된다. 그러나 Load Insensitive DC 쇼퍼에서는 轉流회路가 負荷와 獨立되어 있으므로 負荷變化에 관계없이 항상 충분한 轉流에너지를 확보할 수 있어 轉流失敗가 거의 없다. 만약 轉流失敗가 일어났을 경우에도 다음 사이클에서 콘덴서를 다시 충전시킬 수 있으므로 轉流失敗가 自然히 회복된다.

펄스발생회로는 그림 3과 같이 톱니波 발생기로 부터 얻은 電壓과 기준전압을 비교하여 Duty-cycle을 변화시킬 수 있는 矩形波 電壓을 얻어서 이를 push-pull 증폭기 및 펄스 트랜스를 使用하여 S<sub>1</sub>, S<sub>3</sub> 및 S<sub>2</sub>에 필요한 펄스를 얻었다. 톱니波 발생기는 회로를 간략하게하기 위해서 UJT 발진회로의 콘덴서 電壓을 使用하였고 比較회路는 능동증폭기를 使用하였다.

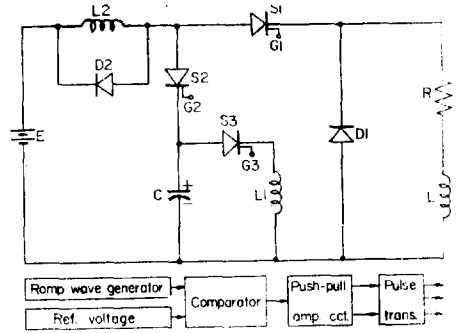


그림 3. Load Insensitive DC 쇼퍼와 펄스 發生회路의 構成圖

Fig. 3. Load Insensitive DC Chopper and block diagram of pulse generating circuit.

### 3. 디지털 컴퓨터에 의한 解析

표 1은 그림 3에 圖示한 Load Insensitive DC 쇼퍼의 動作過程을 Binary logic을 사용하여 表示한 것이다. 표 1에서 "1"은 導通狀態를 "0"은 오프狀態를 나타낸다.

표 1. Load Insensitive DC 쇼퍼의 動作 모드  
Table 1. Operation modes for the Load Insensitive DC Chopper,

Logic state Mode	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
I	1	0	1	0	0
II	1	0	0	0	0
III	0	1	0	1	0
IV	0	0	0	1	1

그림 3에서 使用한 모든 SCR과 다이오드는 導通狀態의 전압강하가 없고 오프狀態의 抵抗이 무한대인 理想的인 스위치로 假定하고 인덕터 L<sub>1</sub>과 L<sub>2</sub>는 각각 R<sub>1</sub> R<sub>2</sub>라는 卷線抵抗을 갖고 있는 것으로 본다. R-L 負荷에 對하여 표 1의 모드에 따라 微分方程式을 세우면 식 (1)~식 (7)과 같다.

모우드 I

$$L_2 \frac{di}{dt} + R_2 i + V_{S1} + L \frac{di}{dt} + Ri = E \quad (1)$$

$$\frac{1}{C} \int_{-\infty}^t idt + V_{S3} + L_1 \frac{di}{dt} + R_1 i = 0 \quad (2)$$

모우드 II

$$L_2 \frac{di}{dt} + R_2 i + V_{S1} + L \frac{di}{dt} + R i = E \quad (3)$$

모우드 III

$$L_2 \frac{di}{dt} + R_2 i + V_{S2} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t idt = E \quad (4)$$

$$L \frac{di}{dt} + R i + V_{D1} = 0 \quad (5)$$

모우드 IV

$$L_2 \frac{di}{dt} + R_2 i + V_{D2} = 0 \quad (6)$$

$$L \frac{di}{dt} + R i + V_{D1} = 0 \quad (7)$$

$i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_L$ ,  $V_C$ 의 狀態變數를 각각  $X(1)$ ,  $X(2)$ ,  $X(3)$ ,  $X(4)$ 라 하고 Binary logic을 使用하여 狀態變數 函數를 構成하면 式 (8)~(11)과 같다.

$$\dot{X}(1) = (X(4) - VS3 - R1 * X(1)) * S3 / XL1 \quad (8)$$

$$\dot{X}(2) = (E - VS1 - R * X(3) - R2 * X(2)) * S1 / (XL2 + XL) + (E - VS2 - X(4) - R2 * X(2)) * S2 / (XL2 - (R2 * X(2) + VD2) * D2 / XL2) \quad (9)$$

$$\dot{X}(3) = (E - VS1 - R * X(3) - R2 * X(2)) * S1 / (XL2 + XL) - (R * X(3) + VD1) * D1 / XL \quad (10)$$

$$\dot{X}(4) = (X(2) * S2 - X(1) * S3) / C \quad (11)$$

각 素子의 電壓과 電流를 Binary logic을 使用하여 表示하면 式 (12)~(21)과 같다. 각 素子에 걸리는 電壓은 오프 狀態에서 電流는 導通狀態에서 計算하고, 保持電流 以下의 微小電流는 無視한다.

$$VS1 = (E + VD1) * (1 - S2) + (VS2 + X(4) + VD1) * S2 \quad (12)$$

$$VS2 = (E - X(4)) * (1 - S1) + (E - XL2 * \dot{X}(2) - R2 * X(2) - X(4)) * S1 \quad (13)$$

$$VS3 = X(4) \quad (14)$$

$$VD1 = -(E - XL2 * \dot{X}(2) - R2 * X(2) - VS1) \quad (15)$$

$$VD2 = -(R2 * X(2) + XL2 * \dot{X}(2)) \quad (16)$$

$$XIS1 = (X(3) - XID1) * D1 \quad (17)$$

$$XIS2 = X(2) * S2 \quad (18)$$

$$XIS3 = X(1) * S3 \quad (19)$$

$$XID1 = X(3) * D1 \quad (20)$$

$$XID2 = X(2) * D2 \quad (21)$$

윗 數式에 對한 計算過程을 나타내는 플로우 차ार्ट는 그림 4와 같다.

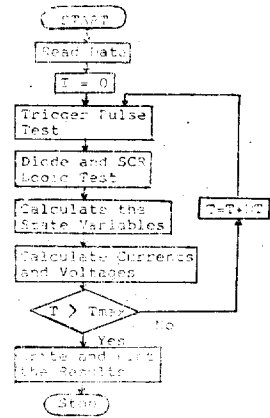


그림 4. Load Insensitive DC 초퍼의 시뮬레이션을 위한 플로우 차아트

Fig. 4. Flow chart for the simulation of the Load Insensitive DC Chopper.

#### 4. 計算 및 實驗結果와 그에 對한 檢討

計算은 Runge Kutta 4-th order 方法을 使用하였

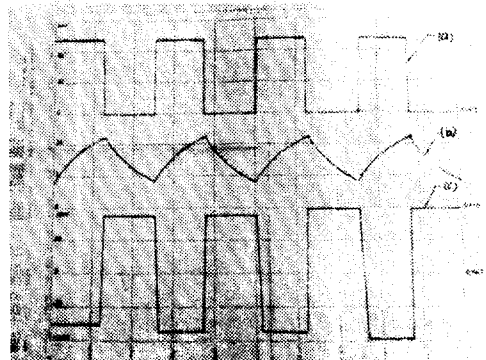


그림 5. 컴퓨터 計算에 의한 波形

Fig. 5. Computer output of the Load Insensitive DC Chopper.  
(a) Load voltage. (b) Load current.  
(c) Condenser voltage.



그림 6. R-L 負荷波形

Fig. 6. R-L load wave forms.  
(a) 負荷電壓 波形 (b) 負荷電流 波形  
(a) Load voltage. (b) Load current.

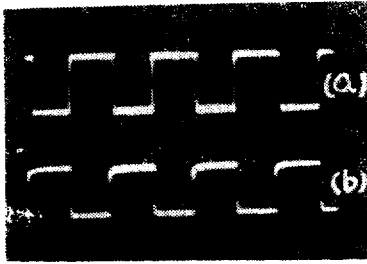


그림 7. (a) 콘덴서 電壓波形 (b) 負荷電壓波形  
Fig. 7. (a) Condenser voltage. (b) Load voltage.

으며, 計算에 使用한 各 回路 定數는 다음과 같다.

$E=50[V]$   $R=8[\Omega]$   $L=20[mH]$   $L_1=0.5[mH]$   
 $L_2=1[mH]$   $C=10[\mu f]$   $R_1=0.1[\Omega]$   $R_2=0.1[\Omega]$   
그림 5와 그림 8은 위에 주어진 定數를 使用하여 計

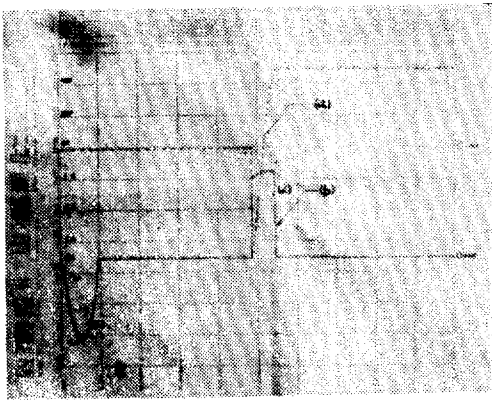


그림 8. 컴퓨터 計算에 의한 波形  
(a)  $S_1$  電壓波形 (b) 콘덴서 電流波形  
Fig. 8. Computer output of the Load Insensitive DC chopper.  
(a)  $S_1$  voltage. (b) Condenser current.

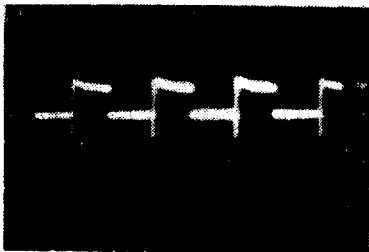


그림 9.  $S_1$  電壓波形  
Fig. 9. Voltage waveform for  $S_1$ .

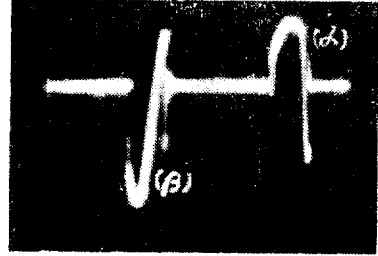


그림 10. 콘덴서 電流波形  
Fig. 10. Current waveform for condenser.

算한 結果를 나타낸 波形이고 그림 6, 그림 7과 그림 9, 그림 10은 實驗結果에 대한 波形이다.

그림 5. 그림 6, 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 Load Insensitive DC 초퍼에서는 轉流펄스의 影響이 전혀없는 理想的인 矩形波 出力을 얻을 수 있다. 그림 6-(a)와 그림 7-(b)는 負荷電流 및 콘덴서 電壓과 比較하기 위해서 重複시켰다. 그림 9는 SCR  $S_1$  양단 電壓波형을 나타낸 것이고 그림 8-(a)는 이를 1週期에 대하여 확대해서 計算한 結果이다.

그림 8-(a)에서 0 볼트 以下인 部分, 즉 逆電壓이 걸린 部分이 回路의 터언 오프 시간에 해당하며, 主 SCR  $S_1$ 의 터언 오프 時間보다 걸어야 한다. 本 研究에서 計算한 回路의 터언 오프 時間은 그림 8-(a)에서 알 수 있는 바와 같이  $36[\mu sec]$  정도이었다.

그림 8-(b) 및 그림 10의 (a)는 콘덴서의 充電電流를 表示한 것으로서  $S_2$ 에 흐르는 電流와 같고, (b)는 콘덴서의 放電電流로,  $S_3$ 에 흐르는 電流와 같다. 그림 8-(b) 및 그림 10의 波形을 觀察해보면 電流波形은 큰  $\frac{di}{dt}$  를 갖고 있으므로 이러한 電流가 흐르는  $S_2$ 는 큰  $\frac{di}{dt}$  定格을 가져야 한다. 그리고 負荷電流보다 큰 펄스狀의 電流가 흐르는 관계로 큰 서어지 反復電流 定格을 갖는 것이어야 한다. 같은 理由로  $S_3$ 도 역시 큰 서어지 反復電流 定格을 가져야 한다. 그림 10과 그림 8-(b)를 比較해보면, 그림 10에서는 약간의 逆方向 電流가 存在하는 것을 볼 수 있는 바 이는 SCR을 理想的인 스위치로 假定하였기 때문에 일어난 차이점으로 볼 수 있다. 實際의 SCR에서는 Recovered charge 特性때문에 逆方向으로 微小電流가 흐른다<sup>6),7)</sup>.

그림 8-(b)와 그림 10의 (a)部分의 充電電流가 0이 되어  $S_2$ 가 OFF된 후에  $L_2$ 에 남은 殘留에너지는 다이오우드  $D_2$ 를 통해서 放電한다. 그러므로  $D_2$ 가 없으면 콘덴서를 계속 充電시키게 되어 콘덴서에 걸리는 電壓을 上昇시키는 要因이 된다. 本 實驗에서는 直流

分捲發電機에 의해서 초퍼를 單獨 運轉한 結果 콘덴서 電壓이 電源電壓의 8倍 정도까지 上昇하였기 때문에 並列負荷를 연결하여 內部인덕턴스에 의한 影響을 감소시켰다. 그러나 電源으로 蓄電池와 같은 理想的인 電源을 使用하던 콘덴서의 電壓上昇을 抑制할 수 있다 負荷로 直流直捲電動機를 사용한 경우의 負荷電壓 및 電流 波形은 그림 11과 같고 이를  $R-L$  負荷에서의 波形인 그림 6과 比較해 보면 電動機 負荷에서는 그림 11-(a)의  $(\gamma)$ 부분과 같은 逆起電力 波形이 나타난다. 이  $(\gamma)$ 部分은 電流波形이 不連續일 때 나타나게 되고 電流가 連續일 경우에는 나타나지 않는다. 同 그림에서  $(\alpha)$ 부분은 主SCR이 導通되어 있는 경우이고,  $(\beta)$

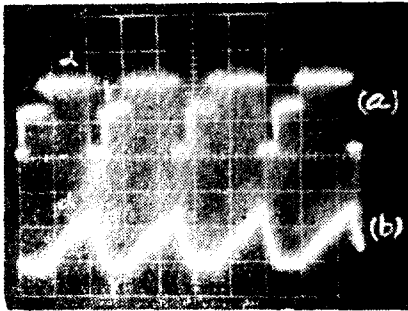


그림 11. 電動機負荷波形  
(a) 電壓 (b) 電流  
Fig. 11. Waveform for motor load.  
(a) Voltage. (b) Current.

는 還流다이오우드가 導通되어 있는 期間이다.

그림 11로부터 Load Insensitive DC 초퍼는  $R-L$  負荷 뿐만아니라 電動機 負荷의 경우에도 逆起電力을 포함한 理想的인 矩形波 出力電壓을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 電動機 負荷나 큰 誘導性 혹은 容量性 負荷에 대해서도 負荷에는 轉流의 影響이 없으므로 安定된 動作을 할 수 있다

### 5. 結 論

Load Insensitive DC 초퍼를 Binary logic을 使用하여 解析하고 그 特性을 實驗結果와 比較한 바 그 結果는 서로 잘 一致하였으며 다음과 같은 特徵을 갖고 있음을 알 수 있었다.

1. 完全한 矩形波電壓 波形과 理想的인 電流波形을

얻을 수 있었다.

2. 轉流回路가 負荷와 完全히 獨立되어 있으므로 轉流失敗가 거의 없고, 轉流失敗가 일어났을 때도 自然히 回復될 수 있다.

3. 轉流電流가 主 SCR  $S_1$ 으로 흐르지 않으므로 主 SCR을 效率의으로 利用할 수 있다.

4.  $S_2$ 는 큰  $\frac{di}{dt}$  定格과 큰 서어지 反復電流 定格을 가져야 하나 平均電流 定格은 問題되지 않는다.

5.  $S_3$ 도 큰 서어지 反復電流 定格을 가져야하고 平均電流 定格은 관계가 없다.

6. 電源에 인덕턴스 成分이 있을 때는 殘留에너지를 放電시키지 못하므로 콘덴서 電壓이 크게 上昇한다.

本 研究로부터 컴퓨터 시뮬레이션을 通하여 用途에 適合한 最適特性을 갖는 초퍼를 設計할 수 있고, 콘스 초퍼보다 優秀한 몇가지 特性을 갖고 있음을 알 수 있다. 특히 電源에 인덕턴스 成分이 거의 없는 蓄電池로 驅動하는 電氣自動車 등에 本 Load Insensitive DC 초퍼를 使用하면 轉流失敗를 防止할 수 있어 安全한 運行을 할 수 있고, 또한 驅動用 電動機의 過熱도 輕減시킬 수 있으리라고 본다.

### 設 號 說 明

$R_1$ : 인덕터  $L_1$ 의 卷線抵抗  $[\Omega]$

$R_2$ : 인덕터  $L_2$ 의 卷線抵抗  $[\Omega]$

$L_1=XL1$ : 인덕터  $L_1$ 의 인덕턴스  $[mH]$

$L_2=XL2$ : 인덕터  $L_2$ 의 인덕턴스  $[mH]$

$R$ : 負荷抵抗  $[\Omega]$

$L=XL$ : 負荷인덕턴스  $[mH]$

$S_1, S_2, S_3$ : SCR  $S_1, S_2, S_3$ 의 論理變數

$D_1, D_2$ : 다이오우드  $D_1, D_2$ 의 論理變數

$VS_1, VS_2, VS_3$ : 各各  $S_1, S_2, S_3$ 의 兩端電壓

$VD_1, VD_2$ :  $D_1, D_2$ 의 兩端電壓

$i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}$ : 인덕터  $L_1, L_2, L_3$ 에 흐르는 電流

$V_c$ : 콘덴서 電壓

$XIS_1, XIS_2, XIS_3$ : SCR  $S_1, S_2$  및  $S_3$ 의 電流

$XID_1, XID_2$ : 다이오우드  $D_1$ 과  $D_2$ 의 電流

$X(1), X(2), X(3), X(4)$ :  $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, V_c$ 를 나타내는 狀態變數

### 參 考 文 獻

1. International Rectifier, "SCR Applications Handbook", International Rectifier Corp., 1st ed., 1974.
2. Masahiko Ibamoto, "Magnetic Control Thyris-

- tor Chopper Equipment for Battery Vehicle”, IEEE Trans. Vehicular Tech., Vol. VT-23, NO. 1, Feb., 1974.
3. Barna Szabados, “A Load Insensitive Chopper”, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-20, pp.130-137, Aug., 1973.
4. G.N. Revankar, “Digital Computation of SCR Chopper Circuit”, IEEE Trans. Ind. electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-20, NO.1, Feb., 1973.
5. Tamer Kutman, “A Method of Digital Computation for SCR Circuits”, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-21, No.2, May, 1974.
6. G.N. Revankar, Pradeep K. Srivastava, “Turn-off Model of an SCR”, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-22, No.4, Nov., 1975.
7. F.E. Gentry, Nick Holonyak, Jr., F.W. Gutzwiller and E.E. Von Zastrow, “Semiconductor Controlled Rectifier”, Prentice-Hall India, 1974, pp.248-258.
8. Min Ho Park, “Power Electronics”, Copyright by S.N.U., 1975.
9. Andrew J. Humphrey, “Inverter Commutation Circuits”, IEEE Trans. Ind. G. App., Vol. IGA-4, No.1, Jan/Feb., 1968.
10. Mita Ray and Asit K. Datta, “Optimum Design of Commutation Circuit in a Thyristor Chopper for DC Motor Control”, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-23, No.2, May, 1973.
11. Takashi Tsuboi, “Newly Developed Thyristor Chopper Equipment for Electric Railcar”, IEEE Trans. Ind. App., Vol. IA-9, No.3, May/Jun., 1973.
12. G.N. Revankar, Pradeep K. Srivastava and Rajan N. Jawle, “Computer Analysis of SCR Circuits”, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-22, No.1, Feb., 1975.
13. G.N. Revankar and V.K. Tandon, “Ideal Choppers and Pulse width Modulated Converter Systems”, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-22, No.3, Aug., 1975.
14. Parkash D. Damle, “A Digital Computer Program for Chopper-Fed DC Motors”, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-22, No.3, Aug., 1975.
15. Parkash D. Damle, G.K. Dubey, “Analysis of Chopper-Fed DC Series Motor”, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-23, No.1, Feb., 1976.