

Thyristor 回路制御와 解析動向

— 차례 —

- 1. 序 論
- 2. Power electronics의 構成
- 3. 各種 Thyristor 回路의 制御特性
- 4. Thyristor 回路의 數學的 解析
- 5. Thyristor 回路制御의 解析手法<sup>9), 10)</sup>
- 6. 結 論

1. 序 論

최근 4,5년내에 갑자기 外國文獻에 Power electronics란 말이 흔히 쓰여져 있고,<sup>1),2)</sup> 요즘에 와서는 거의 보편화 된 術語로 되어 있다. 이는 이 分野의 重要性을 의미하는 것이라고 보아진다.

그러나 Power electronics의 誕生歷史가 짧고, 分野의 歸屬이 헷드다는 점에서 學問的인 體系를 갖추지 못하고 있는 實情이다. 이에 대한 W.E. Newell<sup>3)</sup>는 Thyristor 등의 半導體素子의 應用은 점점 넓어지고 重要한 分野를 形成하고 있으므로 이제부터 "Powerelectronics"라고 부르자고 強力하게 주장하였고, 그림 1과 같이 Powerelectronics는 Power, Electronics 그리고 Control의 分野의 境界領域이라고 定義를 내리는 동시에 "Powerelectronics Emerging from Limbo"라는 題目으로 이 分野가 現在의 處地를 發表하였고 이 分野가 脫出해야 한다고 主張하였다. 筆者도 이에 同感하마 있어 "Powerelectronics의 背景"<sup>4)</sup>이라 하여 Power에서 Power로 끝나지만, Electronics, Power 및 Control의 3分野의 有機的 形成에서 이 分野가 이루어진다고 力說하였다.

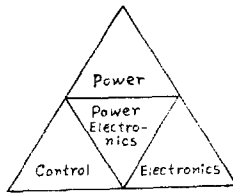


그림 1. Powerelectronics의 境界領域

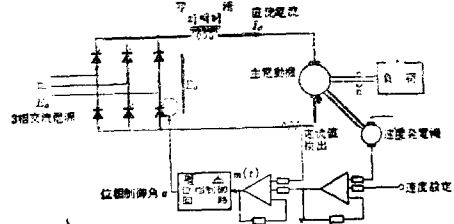
이렇게 強調하는 動機는 원래 電氣工學을 크게 區分하여 Electronics, Power 그리고 Control로 나눌 수 있다고 할 때 과연 이들 각 分野에 종사하는 專門家들이 探索의 혹은 規範的인 研究開發의 노력에서 이 領域에 技術革新을 이루어 놓은 것이 Powerelectronics 分野라는 생각조차 하지않게 된다. 그렇다고 해서 Powerelectronics 分野에서 활발히 活動하고 있는 專門家가 이러한 無關心에 도전할만큼 재치있는 結合力도 없기 때문이다.

\* 正會員 : 서울大工大教授(工博)當學會調査理事

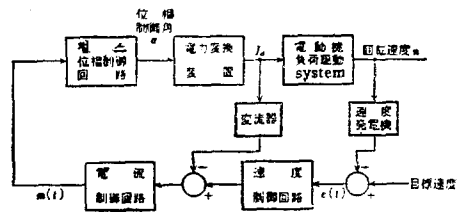
이와 같은 사항에서 Powerelectronics가 Limbo에서 脫出하려면 이미 分野가 産業에 革新을 가져온데 대해 대비할만한 理論的 혹은 數學的인 바탕을 마련하여야 한다. 그래서 本文에서는 Powerelectronics를 構成하는 Thyristor 回路制御의 數學的 解析의 過程을 소개하고, 最近의 動向을 살펴보기로 한다.

2. Powerelectronics의 構成

序論에서 표기한 바와 같이 Power, Electronics 그리고 Control의 有機的 結合이 Powerelectronics를 構成시킨 일 예를 들면 그림 2와 같은 Static Leonard System가 있다. 여기서 보다 시피 電力用半導體 Thyristor 이것으로 變換回路를 만든 電力回路 그리고 直流電動機를 구동함에 있어 速度制御를 하기 위한 制御回路에 의해 feed back制御 system가 구성되었다.



(a) 靜止 Leonard System



(b) 制御 System Block Diagram

그림 2. 靜止 Leonard方式에 의한 速度制御 System 全體의 制御 block diagram는 그림(b)와 같이 된다. 일반적으로 이러한 Thyristor 制御 System에서 앞에서 이야기한 3分野가 담당하는 役割을 살펴

보면 다음 그림 3과 같고 그것이 지니고 있는 역할은 크다.

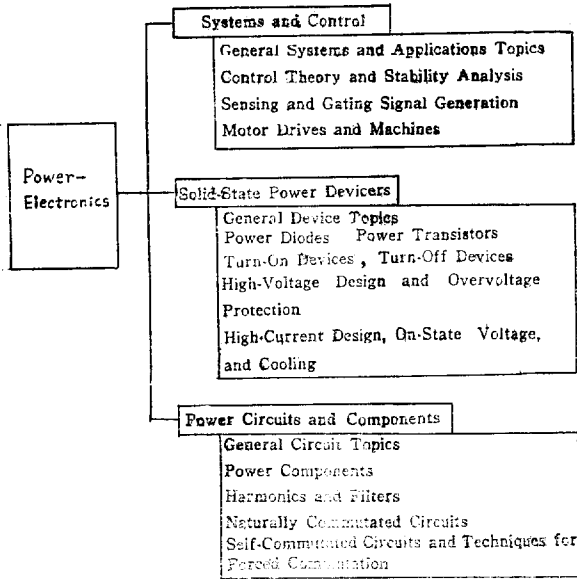


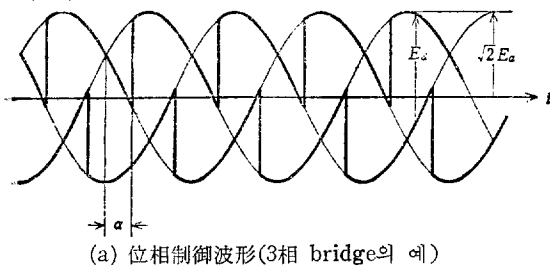
그림 3. Powerelectronics를 각분야

### 3. 各種 Thyristor회로의 制御性能

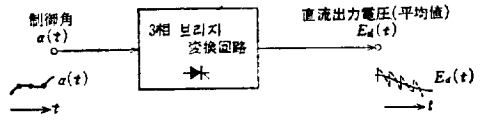
Thyristor電力變換裝置의 큰 特徵은 交流와 直流의 相互間의 電氣에너지의 形態를 變換하는 機能만이 아니라, 同時에 Thyristor裝置를 通過하는 電氣에너지 量도 制御하는 機能을 가지고 있는 點이다. 최근에는 直流 chopper, 交流調整 cyclo-converter등과 같이 變換은 없으나 負荷의 制御를 目的으로 하는것도 많다.

이중 어떠한 Thyristor回路에서도 게이트의 trigger 時點을 變化시키므로써 그 出力波형을 調整하고, 이에 따라서 制御의 목적인 電壓, 電流 및 周波數등 電氣量을 變化시킬 수 있다. 그런데 制御方式은 같은 Thyristor回路일지라도 다르고 다음 3가지로 區分된다.

- (a) 位相制御(phase Control 그림 4)
- (b) 周波數制御(frequency Control 그림 5)
- (c) 幅變調制御(pulse Width Modulation Control 그림 6)

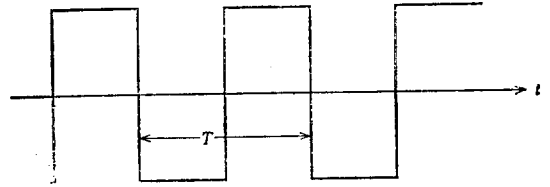


(a) 位相制御波形(3相 bridge의 예)

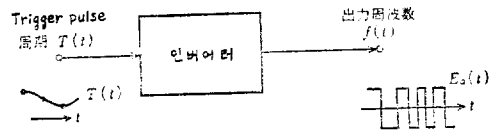


(b) (a)의 制御特性 block圖

그림 4. 位相制御

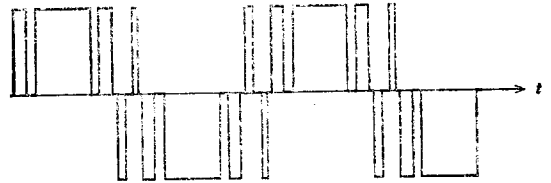


(a) 周波數制御波形(方形波 인버터)

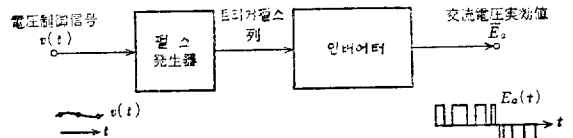


(b) (a)의 制御特性 block圖

그림 5. 周波數制御



(a) PWM制御波形(브리지 인버터)



(b) (a)의 制御特性的 block圖

그림 6. 幅變調制御

位相制御는 他勵式變換回路, 交流回路調整回路 및 Cyclo-Converter<sup>4)</sup>등의 出力波形이고, 그림 4(a)는 3相 bridge變換回路의 出力波形的 예이다. 制御는 그림 (b)와 같이 한다.

周波數制御는 自動逆變換回路에<sup>5)</sup> 있어 제일 많이 사용되고, 制御方式은 그림 5 (a)의 短形波調整 즉, 周期調整이 된다. 그림(b)와 같이 펄스周期 T를 操作入力으로 하여 出力周波數 f를 制御한다.

幅變調制御<sup>6)</sup>는 인버터의 交流出力電壓 또는 直流 Chopper의 出力電壓을 보다 精密히 制御하는 경우이고, 그림 6 (a)는 이것을 표시한다. 이것은 그림 (b)와 같이 電壓制御信號에 의해 복잡한 트리거·펄스를 발생하고 있다.

이상과 같이 여러가지 形態의 Thyristor 회로가 있으나 결국 그들의 制御方式는 위의 세가지 方法으로 歸着된다는 것을 알 수 있다.

4. Thyristor 회로의 數學的 解析

(a) Thyristor 회로의 解析

Thyristor는 非對稱導電要素이고, 따라서 사이리스터 회로의 解析에는 반드시 非線形問題가 포함된다. Thyristor를 理想的인 素子(順方向時 電壓降下零, 導通時 및 逆方向時 電流零)라고 하면 그렇게 힘든 線形特性은 아니나, 이 程度의 것에 대해서도 現在 統一的으로 取扱하는 解析方法이 確立되어 있지 않다.

물론 사이리스터를 簡單한 理論에 의해 統一的으로 취급하는 解析法은 期待하기 어려우나, 最近, 여러가지 面에서 사이리스터에 대한 새로운 試圖를 하고 있다. 現在 사용되고 있는 手法를 兪거하여 보면 (1) Fourier 展開法에 의한 取扱, (2) 개개의 微分方程式에 의한 取扱, (3) 狀態空間法에 의한 解析<sup>7),8)</sup> (4) Simulation에 의한 解析 등등 각자의 특징을 가지고 있다. Thyristor 회로의 解析으로서 가장 發展한 것은 狀態空間法에 의한 時間離散值系로서의 解析이고, 이 手法는 線形的 負荷회로에 대해서는 대충 完成을 보았으나 時變數 Parameter를 가진 負荷 및 非線形負荷를 가진 系의 適用은 금후의 問題로 남아 있다.

(b) Thyristor 制御System

Powerelectronics는 그림 2에서 보는 바와 같이 사이리스터裝置를 통과한 電氣에너지를 이용하는 負荷(機械 및 工學的 Process)까지 포함한 全體로서의 System을 하나의 制御 System로 본다. 사이리스터裝置는 操作部이고, 制御要素의 중요한 부분이므로 이것을 포함한 制御 System를 Thyristor 制御 System라고 부르고, 이 일례로서 그림 2(a)에 Leonard System를 표시하였다. 壓延機, 抄紙機 등의 경우 電動機가 구동하는 Roller의 回轉速度的 制御에서 速度發電機의 速度檢出에 의해 目標速度간의 差가 있으면 이것이 位相制御회로의 入力信號를 作成하도록 制御裝置에 의해 Feed-Back 制御 System을 構成하며는 目標速度에 追從되는 速度制御가 可能하다. 이와 같이 電力變換의 機能과는 별개로 System全體의 制御特性이 指定된 條件을 만족하도록 動作하는 性能이 要求된다. 좀 더 速度를 精密하게 制御하려면 Cascade 制御方式이 채용되고 이 경우에는 電流와 速度的 두개의 feed-back가 이루어지고, System全體의 制御 Block Diagram는 그림 2(b)와 같다.

보통의 制御 System와 對比하여 보면 이 경우에는 電力變換裝置는 制御要素의 중요한 부분의 하나이고, 對象 Process의 操作量을 발생한다. 따라서 일반 制御 System와 같이 Thyristor 制御 System 解析 및 設計에 있어서 安定性, 過度應答 등의 解析이 필요하고, 動的인 特性의 數學的 取扱이 요구되기 때문에 특히 여기서 고려하여야 할 것은 變換制御裝置의 數學的 表示法이 問題가 된다. 이 目的을 위해, Thyristor 變換器의 連續 Model 혹은 離散值 Model에 의한 여러가지 表現法이 提案되어 있고, 이 分野에 있어서의 金후의 研究가 期待된다.

5. Thyristor 회로의 解析手法<sup>9),10)</sup>

(a) Fourier 展開法

Thyristor 회로에 주는 電壓, 電流, 혹은 Thyristor 회로에 의해 發生하는 電壓, 電流를 展開하여 周波數領域에서 解를 얻는 方法이고, 그림 7(a)는 간단한 Invertor인 Thyristor 회로이다. 負荷 R, L일 때 入力버터 出力電壓  $e_a$ 는

$$e_a = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4E_o}{\pi n} \sin n\omega t \tag{1}$$

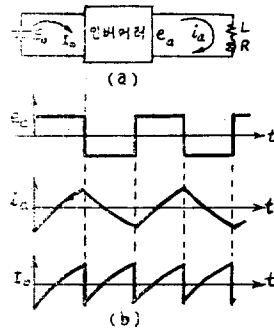


그림 7. 간단한 Thyristor 회로

負荷의 임피던스에 대한 電流는

$$Z_a(n\omega) = R + jn\omega L$$

$$i_a = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4E_o}{\pi n \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \tan^{-1} \frac{n\omega L}{R}) \tag{2}$$

위의 식과 같이 周波數領域, 特別 基本波成分 또는 特定的 高調波들의 對應이 確實히 되어 있다.

(b) 狀態空間法

Thyristor, Diode를 포함한 일반 Thyristor 회로는

回路중의 이러한 素子の 導通, 非導通에 따라 結線狀態 즉 mode가 推移되어 간다. Thyristor 回路의 解析에 있어 먼저 mode分析이 必要하다.

일반적으로 Thyristor 回路에 있어 mode數  $m$ , 각각의 mode繼續時間을  $T_i (i=1, 2, 3 \dots m)$ 라고 하면

$$V_i = Z(i)(p) \cdot I_i \quad p: \text{演算子} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_i(t_i^+) \\ I_i(t_i^+) \end{bmatrix} = B_i \begin{bmatrix} V_i(t_i) \\ I_i(t_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)는  $i-1$ 번의 mode에서  $i$ 번째에 변화하는 回路의 結線狀態의 推移를 나타내는 식이고, 식(3)은  $i$ 번째의 mode期間에서의 回路方程式을 표시하고,  $Z_i(p)$ 는 이 期間의 임피던스行列,  $B_i$ 는 이 狀態推移行列,  $t_i, t_i^+$ 는 각 mode변화시점의 直前과 直後의 時間을 표시한다. 식(3)은 식(5)로 또 電壓 Vector는 식(6)으로 표시된다.

$$pI_i = A_{i1}I_i + D_iV_i \quad (5)$$

$$pV_i = A_{i2}V_i \quad (6)$$

狀態 Vector  $X_i$ 로서  $\text{col}(V_i, I_i)$ 를 택하면

$$pX_i = A_iX_i \quad (7)$$

단,

$$X_i = \text{col}(V_i, I_i) \quad A_i = \begin{bmatrix} A_{i2} \\ D_i \quad A_{i1} \end{bmatrix}$$

따라서 일반적으로 Thyristor 回路는 식(4), 식(7)에 의해 다음 두 식의 方程式으로 기술된다.

$$pX_i = A_iX_i \quad (8)$$

$$X_i(t_i^+) = B_iX_i(t_i) \quad (9)$$

즉 Thyristor 回路는 식(8), 식(9)로 표시된 時間離散值系를 푸는 문제로 귀착된다.

(c) Simulation에 의한 解析

精密한 解析을 하고 變換裝置의 各部波形을 검토하려면 Simulation에 依存하여야 한다. Thyristor 回路의 動作狀態를 精密하게 model化하려면 Thyristor의  $V-I$ 特性的 非線型性, turn off에 따르는 回路變數의 理論條件등 그 數式的인 表現이 극히 복잡하고 Simulation도 容易하지 않다.

Thyristor 回路의 Simulation에는 analog 方式과 digital方式이 使用된다. 즉 比較的 小規模의 回路의 解析에는 analog가 便利하고, digital는 大規模이고 精密한 解析에 적합하다.

analog simulation 에 兩單한 直列인버터의 原理 回路를 그림 8에 표시하였다. 두개의 非線型 Thyristor에서

$$Th_1 \text{은} \quad iTh_1 = f(v_1)$$

$$Th_2 \text{는} \quad iTh_2 = f(v_2)$$

또 線型인 回路部分에서는

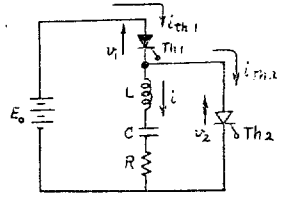


그림 8. 直列인버터 回路

$$v_2 = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt$$

의 관계에서 Thyristor의 on, off까지  $f$ 중에 포함시키면

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= f^{-1}(iTh_2 + i) \\ v_2 &= E - v_1 \\ L \frac{di}{dt} &= v_2 - Ri - \frac{1}{C} \int idt \\ iTh_2 &= f(v_2) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

에 의해 그림 9와 같이 analog의 計算機의 要素를 組合하여 trigger順序에 따라  $sw_1, sw_2$ 를 開閉하면된다.

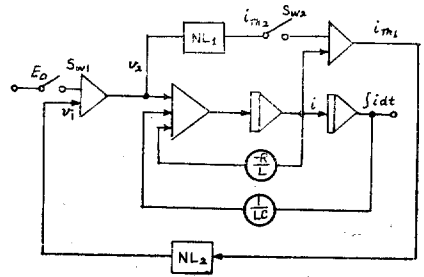


그림 9. analog 計算機結線

이와 같이 analog Simulation는 簡便한 長點을 가지고 있으나, 그림 10과 같이 回路나 Thyristor의 動特性에 對應하는 問題가 있고, 포함된 Diode의 選擇, 時間係數의 選擇에 注意하여야 한다.

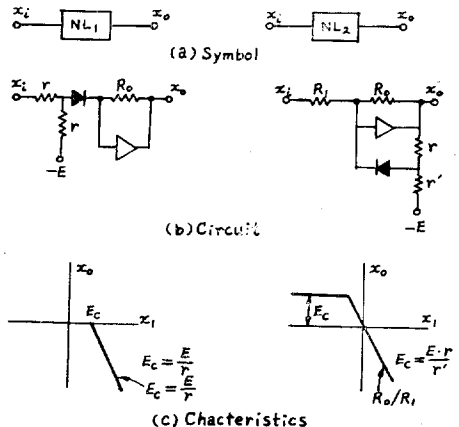


그림 10. Thyristor 特性을 표시하는 非線型 回路

Digital Simulation 이것은 각 Thyristor, Diode를 on, off의 두 狀態의 수위치로 생각하고, 이러한 狀態의 可能한 모든 組合에 대한 電氣回路의 解析 programming을 준비하고, 이러한 것을 가지고 回路電壓, 電流의 論理判斷에서 주어진 Thyristor, Diode의 動作에 따라 計算한다. 그림 11은 일반적인 flow chart이다. 入力 Data로서는 각 素子數, 素子定數, 素子の 接續된 節點의 번호를 回路圖에서 일러서 주면 된다<sup>1)</sup>, 計

$AX + Bu$ 의  $A, B$ 行列이 구해진다.<sup>2)</sup>

이것에 의해 주어진 初期條件에 대해, 節點電壓, 수위치素子電壓, 電流가 계산된다<sup>3)</sup>, 여기에서 수위치의 on, off가 決定되고<sup>4)</sup>, mode가 變化됐는가를 判定한다<sup>5)</sup>. mode變化가 없으면 큰 step幅  $H_1$ 으로 積分演算이 進行되나<sup>6)</sup>, 어느 step期間에 mode變化가 있으면 그 step의 끝에 수위치電壓, 電流가 計算되고, 이것에 의해 mode의 變化가 檢出된다. 여기서 積分의 繼續을 중지하고, 그 step의 初期狀態를 最終狀態에서 逆方向으로 積分하므로써 計算이 되고 mode變化直前の 狀態에 돌아간다<sup>10)</sup>. 여기서 부터 작은 step幅  $H_2$ 로 積分이 進行된다<sup>11)</sup>. 이 경우 4, 5, 6의 過程에서 mode變化의 判斷이 이루어진다. mode變化가 있으면<sup>6)</sup>에 들어가 새로운 mode의 方程式이 구해지고, 다음 step가  $H_2$ 의 幅으로 積分된다. mode의 變化가 없으면 그냥 積分이 進行하나,  $M$  step 계속하면 또 다시  $H_1$ 의 step幅의 積分에 돌아간다. 이상과 같은 過程에서 自動的으로 計算이 進行된다.

6. 結論

Thyristor回路는 電力變裝置로서 하나의 制御系에 포함되어 있다. 다시 말하면 Thyristor制御 System는 세分野 즉 Power, Control 그리고 Electronics의 結合이라는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 制御要素는 결국 位相制御, 周波數制御 및 變調制御의 3가지로 歸着되고, 이의 解析, 手法은 連續 model, 離散 model에 의한 여러가지 手法이 提案되고 있다.

筆者는 위에서와 같이 Powerelectronics 分野에서 可能한 數學的表現으로 理論을 追求하자는 意圖에서 나열하여 보았으나 여러가지 未備된 點이 있어 充分한 表現이 되지 못하였다. 앞으로 補充하도록 노력하며 이 分野의 Limbo에서의 脫出을 希望하고 있다.

參考文獻

- 1) H.F. Storm, "Solid-state Power Electronics in U.S.A." IEEE Spectrum, Vol. 6, pp.49-59, Oct. 1969.
- 2) W.E. NEWELL "Power Electronics-Emerging from Limbo" IEEE Trans. on Industry Application, Vol. IA-10, No.1 Jan./Feb. 1974.
- 3) 朴旻鎬 "Powerelectronics의 背景"大韓電氣學會誌, Vol. 25, No. 2, pp.175-181, 1976.
- 4) B.R. Pelly: "Thyristor Phase-Controlled Conv-

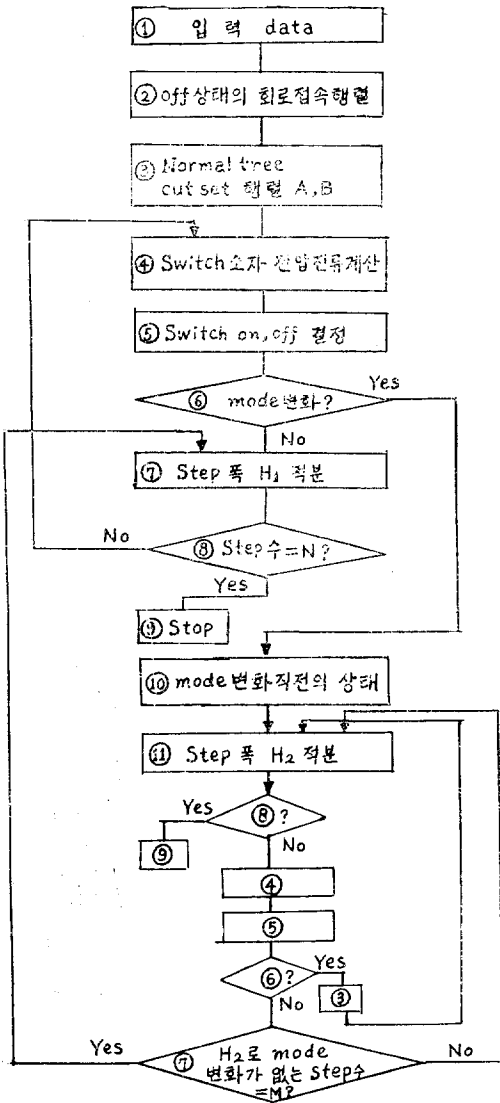


그림 11. Flow Chart

算機에서는 入力 data에 따라 全수위치素子が 오프 狀態로서의 回路換續行列이 정해지고<sup>2)</sup>, 이것에 의해 Normal tree, 基本 Cut set 行列, 標準微分方程式  $\dot{X} =$

erters and Cycloconverters," New York, Wiley-Interscience, 1971.

5) B.D. Bedford and R.G. Hoft "Principle of Inverter Circuits," New York, Wiley, 1964.

6) R.W. Johnson: "Modulating Inverter System for Variable-Speed Induction Motor Drive (G.M. Electrovair II)" IEEE Trans, PAS-88, 2 pp.81-85, Feb. 1969.

7) Achans, et al: "Systems, Networks & Computation," McGraw-Hill, 1974.

8) J.T. Tou: "Modern Control Theory" McGraw-Hill 1962.

9) 原田: "Thyristor 回路의 解析法" 日本電氣學會雜誌 Vol. 195, No.6, June 1975, pp.526~533.

10) Thyristor Electronics編集: "Thyristor裝置" 丸善株式會社(單行本)

<p.27에서 계속>

表 4. 水銀整流器와 싸이리스터變換所의 比較

項 目	水銀整流器變換所	싸이리스터變換所
電壓電流定格	制約있음	任意
異常現象	逆弧는 不可避	적다
過負荷耐量	크다	그다지 크지않다
點弧回路	보통	약간 복잡
保守	복잡	간단
運轉準備期間	필요	필요없음
效率	좋다	약간 떨어진다
by pass valve	필요	필요없음
建設面	化成室, 組立室이 필요	特別室은 필요없음
價格面	費用低下期待難	素子量産化로 費用低減이 기대됨

바. 高調波, 高周波誘導導害對策

사. 싸이리스터 밸브(valve)의 小形化

以上的 여러가지 問題點이 해결된다면 經濟性, 信賴性도 증대되기 때문에 앞으로는 보다 많이 이 싸이리스터 變換裝置가 直流送電에 이용될 것으로 전망된다.

參 考 文 獻

1. 日本電氣學會大學講座 水銀整流器, 電氣機械工學 V
2. 日本電氣協同研究會 高電壓直流送電, 1963. 12.
3. 町田武彦: 直流送電系의 制御, 保護方式의 開發과 安定度向上對策에 관한 研究(電研報告 No. 65064) 1965. 11.
4. 町田武彦: 最近의 直流送電의 動向과 技術的 課題 (電研綜合報告書 No.3) 1969. 8.
5. 町田武彦者: 直流送電 東京電機大學 出版局 1971.

會員에게 알리는 말씀

會員여러분의 健勝하심을 仰祝합니다.

빛나는 租國의 繁榮과 보다 잘살기위한 근면, 자조, 협동의 새마을정신으로 힘찬 전진의 노래가 배아리치고 있는 이때 우리는 더욱 總和團決로서 健全한 社會氣風 助成으로 庶政刷新推 進에 더욱 앞장서서 근면, 검소한 生活로 職場에서나 家庭에서나 自己일에 充實하여야 할 것 입니다.

따라서 庶政刷新에 關한 大統領閣下의 指示와 政府의 庶政刷新推進對策(自體監査嚴正實施, 不合理한 制度改善, 생활주변정화운동, 自體教育強化, 對民啓導活動展開等)을 會員 여러분께 서는 가족, 친지, 동료직원 및 모든 사람에게 이같은 사항을 주시 시키시어 健全한 社會氣風 助成에 솔선수범하여 주시기 바랍니다.

1976年 7月 日

大韓電氣學會長 白