

# Thyristor Switch를 사용한 無効電流 補償에 관한 研究

論 文
28~12~ 3

## A Study on Reactive Current Compensation Using Thyristor Switch

朴 旻 鎬\* · 李 福 鎔\*\*  
(Min-Ho Park, Bock-Yong Lee)

### Abstract

Improvement of power factor is achieved by reactive-current compensation, connecting power condenser to the circuit.

This paper describes a method of reactive-current compensation, employing thyristor switching of capacitor banks without any breaker.

This method reduces supply transients to the minimum by means of connecting condenser, because thyristor is triggered at zero point in condenser current.

The reactive current detection and the experimental system to trigger thyristor at appropriate moment are given.

The results show the fast reactive-current compensation on the condition of minimum transient.

### 1. 序 論

送配電系統의 無効電流 補償은 力率의 改善을 의미하며, 이 力率의 改善은 一般의 同期調相機와 電力用 콘덴서로서 이루어진다. 이들의 補償容量은 負荷에 흐르는 無効電流가 變化함에 따라서 수시로 같이 變化되는 것이 제일 바람직하다. 이 경우는 同期調相機에 의한 것이 신속하고 부드럽게 수행될 수 있으나 機械設備가 비싸며 또한 유지하는데도 많은 경비가 든다.

한편 콘덴서에 의한 力率改善은 위의 調相機에 비해 設備가 싼 반면에 階段的 力率補償만 可能하다. 그러나 容量을 달리하는 數個의 콘덴서를 組合選擇하여 負荷의 力率變動에 대응하여 自動的으로 最適狀態로 投入한다고 하면 위에 기술한 調相機와 等價가 된다고

본다.

이 경우에 가장 중요한 것은 電力回路에 콘덴서를 組合하여 連結시키는 스위치 作用이고 종래의 機械의 스위치로는 절대 불가능하다. 그래서 I.R. Smith<sup>1)</sup>는 이 機械의인 스위치 대신 싸이리스터스 위치를 使用하여 試圖하였다. 이 경우는 同一容量의 콘덴서로 組合數에 制限이 있으며 3相 스위치 投入이 2/3사이클 걸린다.

本 研究에서는 스위치로 싸이리스터스 위치를 使用하고 負荷의 無効電流를 零으로 하는 制御시스템을 도입하여 負荷의 力率變動을 항상 最適值의 力率로 調整하려고 한다.

### 2. 最適콘덴서에 의한 無効電流 補償

補償前의 電流力回路에 있어 無効電流  $I_0$ 는 식 (1)과 같이 表示되고  $I$ 는 回路電流의 크기이며,  $\theta$ 는 電壓과 電流의 位相角이다. 이 無効電流의 補償은 回路에 콘덴서를 連結하므로써 이루어진다.

\* 正會員 : 서울工大 電氣工學科教授(工博)

\*\* 正會員 : 大宥工業專門大 專任講師

接受日字 : 1979年 10月 2日

$$I_q = I \sin \theta \quad (1)$$

基本的 補償回路는 그림 1과 같고 콘덴서 C의 容量은 負荷의 無効電流를 最小로 하는 값으로 選定하고, 이 C를 回路에 連結하기 위하여 逆並列로 連結된 싸이리스터 Th와 다이오드 D를 使用하다. 여기서 Th는 스위치 역할을 한다.

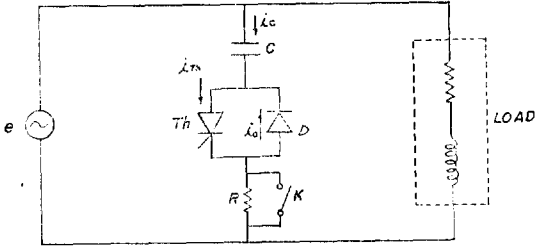


그림 1. 基本的인 補償回路  
Fig. 1. Basic capacitor compensation circuit.

Th가 오픈된 상태에서 電源電壓을 넣으면 D를 통하여 電源電壓의 負(-) 最大値까지 콘덴서에 電荷가 充電되고, 콘덴서는 그 最大充電電壓을 그대로 維持한다. 이때 D를 통하여 흐르는 充電電流를 制限시키는 抵抗 R은 充電完了후 스위치 K에 의하여 短絡시킨다.

다음 Th에 의한 콘덴서의 連結은 連結로 因한 過度現象을 最小로 하기 위하여 그림 2의 콘덴서 電流  $i_c (=i_{Th})$ 가 0인 點, 즉 供給電源의 負(-) 最大値인 A 點에서 連結되도록 한다. 그러면  $i_c$ 는 AB기간동안은 Th를 통하여 흐르고, BC기간동안은 D를 통하여 흐른다. 이 連結된 상태를 계속 維持하기 위하여 Th는 C點에서 다시 스위치 되어야 하며, 다음 싸이클에서도 이에 對應하는 點에서 스위치 되어야 한다.

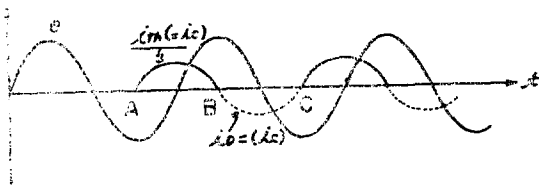


그림 2. 콘덴서 연결시 과도현상을 없애기 위한 스위칭 결과 콘덴서의 전압 전류파형.

Fig. 2. Waveforms of condenser voltage and current, and switching points of condenser circuit.

콘덴서 回路의 遮斷은 싸이리스터 트리거 信號가 截止되면 다음 電流가 零인 點에서 자연적으로 行해지며

콘덴서는 다이오드를 통해 供給電源의 負(-) 最大値까지 再充電되어 콘덴서 連結前의 상태를 그대로 維持한다.

이 콘덴서의 連結은 싸이리스터 스위칭 作用으로 行해지며 이 싸이리스터의 트리거 信號는 負荷의 無効電流에 의하여 動作된다.

콘덴서 電流는 負荷의 無効電流의 變化에 對應하여 같이 變化되어야 하지만 콘덴서 電流를 線型으로 變化시킨다는 것은 불가능한 일이며 그림 3과 같이 한相에 各各 容量이 다른 n個의 콘덴서를 最適條件으로 選擇 連結한다면 負荷에 흐르는 最大 無効電流를  $I_{qm}$ 이라 할때 콘덴서에 의한 補償후의 無効電流오차의 最大크기  $\delta I_c$ 는 식 (2)와 같이 表示된다.

$$|\delta I_c| = \frac{I_{qm}}{2^{n+1} - 1} \quad (2)$$

이때 電力回路에 連結되는 콘덴서의 電流容量은 식 (3)과 같이 選定할 必要가 있으며, 이 條件을 最適條件이라 한다.

$$I_{Ci} = 2^{i-1} I_{C1} \quad (i=2, 3, 4, n) \quad (3)$$

여기서  $I_{C1}$ 는 첫번째 콘덴서의 電流容量으로  $I_{C1} = 2|\delta I_c|$ 의 關係가 있다.  $I_{Ci}$ 는 i번째 콘덴서의 電流容量이다.

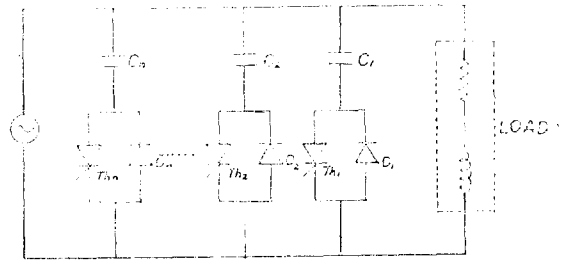


그림 3. 전력회로 구성도  
Fig. 3. Power circuit diagram.

### 3. 實驗的인 制御 시스템

그림 4는 임의의 순간에 精確하게 補償回路의 싸이리스터를 選擇하고 트리거시키기 위하여 使用한 블럭線圖를 나타낸 것이다.

本 實驗에서 콘덴서는 2개 使用하였다. 이 시스템의 動作과 理論을 記述하면 다음과 같다.

#### 3.1. 無効電流 檢出

電壓과 電流가 이루는 位相角이  $\theta$ 인 경우 電流를  $e = \sqrt{2} E \sin \omega t$ 라 할때 電流는  $i = \sqrt{2} I \sin (\omega t - \theta)$ 이다.  $\omega t = \pi$ 인 경우 電流는  $i_x = \sqrt{2} I \sin (\pi - \theta)$

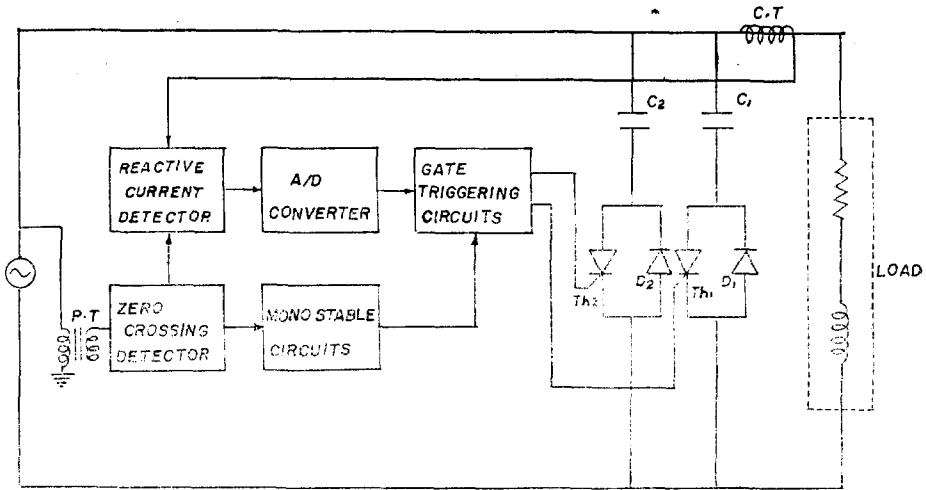


그림 4. 제어회로의 블록선도  
Fig. 4. Block diagram of the control circuit.

$= \sqrt{2} I \sin \theta$ 로 無効電流의 最大値를 나타낸다.

그림 5는  $\omega t = \pi$ 인 순간에 흐르는 電流, 즉 無効電流의 最大値를 檢出하는 回路로 감소方向의 電流 제로크로징의 짧은 펄스가  $T_r$ 의 베이스에 加해지면 그 짧은 동안 C.T 2차측 電流가 C에 充電되며, 이 充電電壓은 無効電流의 最大値에 相當하는 電壓이다.

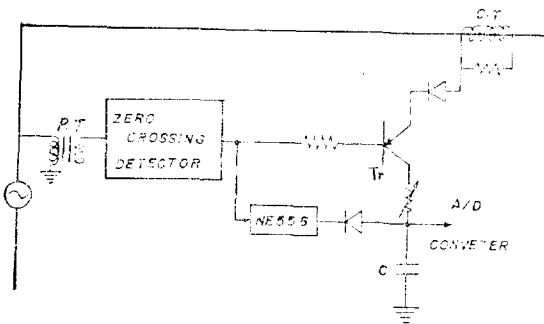


그림 5. 무효전류 검출회로  
Fig. 5. Reactive current-detective circuit.

그림 6은 電壓波形成과 감소방향의 電壓 제로크로징의 펄스를 나타낸 것이다.

그림 5의 NE 555은 전압 제로크로징으로부터 나오는 펄스를 180°이상 연장시켜 다이오드에 加해줌으로 C에 充電된 電壓이 싸이리스터 스위칭作用이 끝날때 까지 放電됨을 防止하며 그후 放電의 通路가 된다.

그림 7은 반파정류된 C.T 2차측 電流와 그림 5의 C에 充電된 電壓을 나타낸 것으로, 이 電壓은 電源電壓의  $\omega = \pi$ 인 순간의 電流, 즉 無効電流의 最大値에 대응되는 電壓이다.

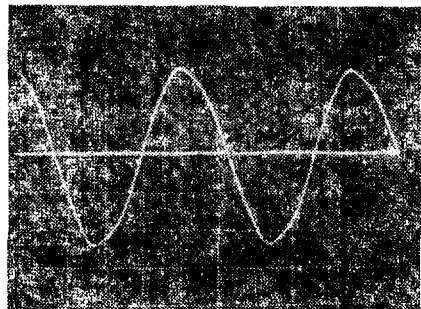


그림 6. 부하전압과 제로크로징 펄스  
Fig. 6. Waveform of load voltage and zero crossing pulses.

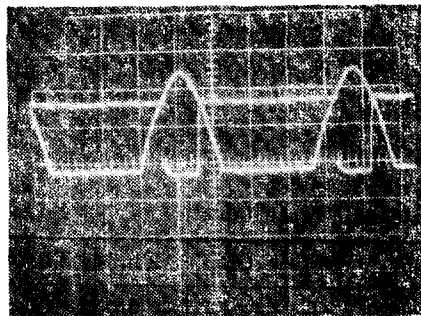


그림 7. 반파정류된 C.T 2차 전류와 그림 5의 C에 충전된 전압  
Fig. 7. Have-wave rectifying C.T secondary current and charging voltage on fig 5-C.

3.2 A/D 變換器

一般的으로 電力用콘덴서를 한相에  $n$ 個 使用할 때 조할될 수 있는 數는  $2^n - 1$ 個이다. 따라서 A/D 變換器의 분할수도  $2^n - 1$ 個가 必要하다. 本 實驗시스템에 서는  $n=2$ 이므로  $2^2 - 1 = 3$ 個의 분할회로를 使用하였다.

그림 8은 A/D變換器의 회로를 나타내며 분할회로에 쓰인 抵抗은 OP암프의 基準點의 電位를 결어주는 것으로 이 抵抗值는 식 (3)의 電力用콘덴서의 電流容量에 대응되기 때문에  $R_3 = 2R_2 = 4R_1$ 의 關係가 있고,  $V_{CC}$ 에 의해 OP<sub>1</sub>에 결어주는  $R_1$  양단간의 電壓은 負荷에 흐르는 無効電流가 식 (2)의  $\delta I_C$ 와 같을 때 그림 5의 C에 充電되는 電壓과 같도록 한다.

터로 보내 작은 容量의 콘덴서로부터 電力回路에 連結시키기 위한 回路로 이 論理回路에 대한 眞理表를 求하면 表 1과 같다.

3.3 게이트 트리거 回路

A/D變換器의 出力은 無効電流 檢出과 同時에 임의로 나온다. 따라서 前述한 바와같이 過度現象이 最小인 상태에서 스위칭作用을 하기 위하여는 싸이리스터 트리거 信號가 供給電源의 負(-) 最大値인 點에서 개시되어야 하므로 이때까지 트리거 信號를 지연시킬 必要가 있다.

3相 電力回路인 경우 각相의 콘덴서를 그림 9와 같이 연결하면 AB상간의 콘덴서  $C_{AB}$ 는  $V_{AB}$ 의 負(-) 最大値,  $C_{BC}$ 와  $C_{CA}$ 는  $V_{BC}$ 와  $V_{CA}$ 의 正(+)의 最大値로 充電되므로, 계기用 變成器 P.T를 AB상간에 설치하여 電壓제로크로징을 한다면  $Th_{BC}$ 는 제로크로징으로부터  $30^\circ$  뒤인 그림 10의 A點  $Th_{AB}$ 는 제로크로징으로부터  $90^\circ$  뒤인 B點,  $Th_{CA}$ 는 제로크로징으로부터  $150^\circ$  뒤인 C點에서 펄스를 發生하는 모노스태이블 出力을 A/D變換器 出力과 AND시켜 트리거 시켜야 한다.

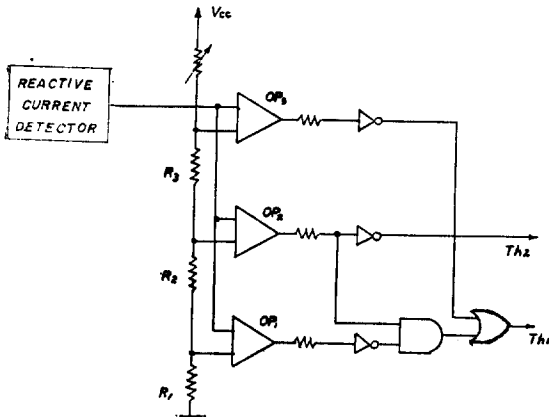


그림 8. A/D 변압기  
Fig. 8. A/D converter

無効電流가 檢出되지 않는 정상시 OP암프의 出力들은 모두 1이다. 無効電流가 檢出되어 그림 5의 C에 電位가 그림 8의  $R_1, R_2, R_3$ 의 基準電位보다 低될 경우 OP<sub>1</sub>, OP<sub>2</sub>, OP<sub>3</sub>의 出力은 차례로 1에서 0으로 變한다. 그림 8의 오른쪽은 이 出力을 해당되는 싸이리스

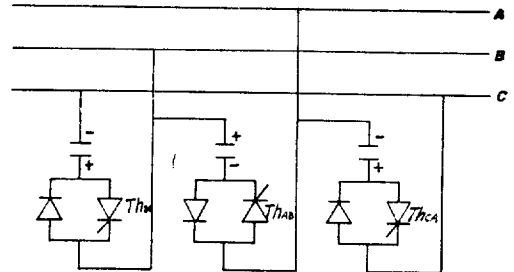


그림 9. 3상 콘덴서 보상회로  
Fig. 9. 3-Phases condenser compensation circuit

표 1. 진리표  
Table. 1. Truth table

OP <sub>1</sub>	OP <sub>2</sub>	OP <sub>3</sub>	Th <sub>1</sub>	Th <sub>2</sub>
1	1	1	0	0
0	1	1	0	1
0	0	1	1	0
0	0	0	1	1

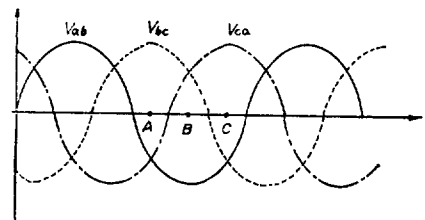


그림 10. 각상 트리거 점  
Fig. 10. Each phase triggering points.

그림 11은  $Th_{AB}$ 에 加해지는 트리거 펄스와  $Th_{AB}$ 에 흐르는 전류를 나타낸 것이고 그림 12는 속응성을 알기 위해 그림 5의  $T_r$ 에 가하는 信號를 2싸이클 동안

加하고 1사이클 동안 추가하지 않을 때  $V_{BC}$ 상에 연결된 콘덴서에 흐르는 電流를 나타낸 것이다.

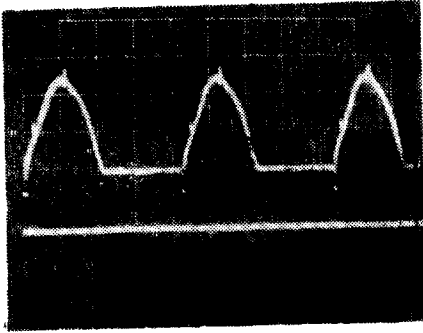


그림 11.  $Th_{AB}$ 의 트리거 펄스와 전류  
Fig. 11. Trigger pulse and current.

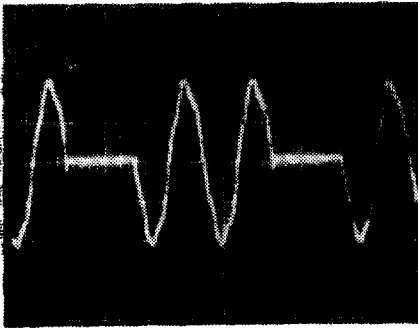


그림 12. 그림 9의 AB상 콘덴서의 전류  
Fig. 12. Condenser current in fig 9  $C_{AB}$

#### 4. 檢 討

1) 無効電流를 電源측에서 檢出할 때, 콘덴서가 連結되어 無効電流가 補償되면 그림 5의 콘덴서 C에 電壓이 充電되지 않기 때문에 補償된 다음 사이클에 싸이리스터에 트리거 信號를 주지 못한다. 따라서 無効電流 檢出用으로 쓰인 C.T는 電力用콘덴서 回路 뒤쪽인 負荷측에 連結하여야 한다.

2) 모노스테이블의 出力펄스는 싸이리스터 動作電流로 말미암아 각 싸이리스터의 트리거點인 그림 10의 A.B.C點보다 각각 2~3° 더 지연시켜야 한다.

3) 3相 電力回路에서 電力用콘덴서를 그림 9와 같이 連結하고 P.T와 C.T를 單相 1個씩만 使用하여 制御 回路를 構成할 경우 C.T는 相에 設置되고, P.T는 線間에 設置되므로, C.T에 흐르는 相電流와 線間電壓이 순抵抗負荷時도 位相이 30°차가 나므로 無効電流 檢出用으로 쓰이는 電壓제르코로징 펄스는 30° 뒤에 나오

는 것을 써야 한다.

#### 5. 結 論

1) 그림 1의 콘덴서를 主回路에 連結하거나 遮斷時 그림 12에서와 같이 콘덴서 電流가 零인 點에서 온, 오프되므로 별도의 遮斷器를 必要로 하지 않고 싸이리스터로 스위칭 역할을 충분히 할 수 있었다.

2) 負荷의 變動에 따라 그림 5의 C에 充電되는 電壓이 그림 7에서와 같이 1사이클 以內에 完全 放電후 再充電되므로 1사이클 以內에 最適인 상태의 콘덴서로 連結되어 速應性이 입증되었다.

3) 그림 10에서 3相이 모두 1/180초(1/3사이클) 사이에 트리거되므로 콘덴서가 連結時 電源電壓에 미치는 영향이 종래의 것보다는 매우 적음을 알 수 있다.

以上 샘플시스템에서의 實驗은 종래의 것 이상으로 매우 만족할만한 結果를 보여주고 있어 앞으로의 使用에 있어서도 전망이 밝을 것으로 生覺된다.

#### 參 考 文 獻

- 1) P.G. Sen, "Smooth Control of Reactive Power Using Static Devices," Trans. IEEE Magn., Vol. MAG-4, No. 3, pp. 325~329, 1968.
- 2) A. Refsum, "Switched Capacitor-Inductor in Multiphase Systems," Proceedings of the Ninth University Power Engineering Conference, University of Cambridge, pp. 236~241, 1974.
- 3) I.R. Smith and Gerald K. Creighton, "Reactive Current Compensation by Switched Capacitors," IEEE Trans. on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. IECI-22, No. 2 pp. 75-78, Feb, 1975.
- 4) 朴旻鎬著, 電力電子工學, 信興出版社, 1978.
- 5) Grfham D.R. and J.C. Hey, General Electric "SCR Manual," Fifth Edition, General Electric Company, 1972.
- 6) 角田秀夫, OP Amp의 基本과 應用, 東京電氣大學 出版局, 1977.
- 7) David F. Stout and Milton Kaufman, "Hand book of Operational Amplifier Circuit Design." 1974.