

Thyristor와 電動機 制御

朴 旻 鎬*

— 차 레 —

- 1. 電氣機械와 그 背景
- 2. Thyristor의 應用
- 3. Solid-State Motor Control
 - 3-1 直流電動機制御
 - 3-2 交流電動機의 制御
 - 3-3 卷線型 誘導電動機
 - 3-4 Commutatorless Motor
- 4. 展 望

1. 電氣機械와 그 背景

종래 電氣工學은 電磁氣現象의 應用工學으로서 그 定義 또는 範圍는 比較的 確實하였다. 그러나 最近의 電氣工學은 急激히 分野가 擴大 發展되었다. 이 擴大中에서는 종래의 電氣工學의 基盤위에 蓄積된 것도 있고, 全然 다른 系列에서 發展된 것도 있으나 이것을 相對로 하고 있는 사람에 電氣技術者가 많으므로 이것도 電氣工學의 範圍라고 생각되고 있다. 如何間「電氣工學」의 學問의 定義를 쉽사리 내릴 수가 없고, 또 이것이 時代에 따라 變化하는 것도 當然하다. 이와같이 現在의 電氣工學은 그 幅의 넓이에 있어서도 또 質에 있어서도 20~30年前의 그것과는 姿勢를 달리하고 있다. 그러나 그 取級對象에서 energy, material, information의 3가지가 電氣工學의 主軸을 이루고 있다는 것만은 確實하다.

이중의 energy分野에서 한 形態를 이루고 있는 것이 電氣機器이다. 위에서 말한 바와 같이 電氣工學의 變遷에 따르는 影響이 電氣機器에 波級된 歷史的 過程을 들여보면 다음과 같다.

J記號法: 電氣工學의 第1의 波級은 Steinmetz氏의 *J*의 記號法이다. 1916年 “Alternating Current Phenomena”의 著書에서 *J*의 記號法을 世界에 發表하였다. 이것을 發表하기 前까지는 General Review誌에 每月 *J*記號法의 論文을 發表하고 Vector의 概念을 確立하였다. Zürich 會議에서 Vector의 回轉方向을 反時計方向으로 決定할 때 Stienmetz氏는 時計方向의 主張者로서 有名하였다. 오늘날 우리는 Impedance를 $r + jx$ 로 表示하게 되었다.

對稱座標法: 電氣工學의 第2의 波級은 1928年의 Chales L. Fortesque의 “Method of Symmetrical Coordinate”의 著書發表이고¹⁾, Kirchhoff氏의 法則을 全部 對稱分으로 改쳐쓰는 새로운 體系이고, 實로 多相交流回路의 研究에 不朽의 功績을 남겼다고 할 수 있다.

Tensor 解析: 電氣工學의 第3의 波級은 Gabriel Kron의 Tensor解析이고, 電氣量을 直軸과 橫軸으로 分解하는 方式을 主張하였다. 1942年 發行한 “The Application of Tensors to the Analysis of Rotating Electric Machinery”에는²⁾ 基本的인 回轉機를 model로 하여 等價回路를 構成하는데서 始作하여 Tensor analysis에 의해 거이 모든 重要한 回轉機의 本質의 動作特性을 誘導하였다. 1959年 MIT 教授인 D.C. White, H.H. Woodson는 “Electromechanical Energy Conversion”著書에서는³⁾ Kron과는 달리 model은 卷線中의 電流 때문에 機械의 air gap內에 생기는 電界E 및 磁界 H를 使用하여 回轉機의 特性을 算出하였다. 勿論 tensor解析에 의한 것이다.

이리하여 Electric Machine의 名稱은 점차로 Electro-mechanical Energy Conversion이라는 새로운 表現方法이 탄생하게 되었다.

Thyristor의 開發: 電氣工學의 第4의 波級은 G.E.社가 1958年에 SCR thyristor를 發明한 것이다. 이때문에 電氣機械의 새로운 制御方式이 展開되었다. Kusko는 1972年 IEEE Spectrum誌에 “solid-state motor control”이라는 새로운 말을 使用하였다⁴⁾. Thyristor와 電動機制御의 密接한 關係를 表現하였고, 또 Thyristor의 電動機制御에서의 價値를 “Thyristors are workhorses in widely used motor drives that cover a broad range of power and speed.”라고 말

* 正會員: 서울工大教授(當學會編修理事·工學博士)

하였다.

2. Thyristor의 應用

(2-1) Thyristor의 表現과 電力變換

Thyristor라는 이름은 1957年 Germanum PNPN Switching transistor를 RCA社가 開發하여, 종래의 Thyratron 特性에 비유하여 이름을 부쳐 發表한 것이 最初이다. 때를 같이하여 G.E社에서 SCR가 開發되었고, 이에 따라서 LAS, LASCOR, GTO, SCS, SSS 그리고 Triac의 solid state power device가 생겼다. IEC에서는 3개 이상의 junction을 가지고 switching 特性이 있는 bistable semiconductor의 總稱을 Thyristor라고 한다. 그림 1은 Thyristor 중 제일 많이 사용하는 代表的인 SCR, Triac의 Junction diagram과 symbol을 表示한 것이다.

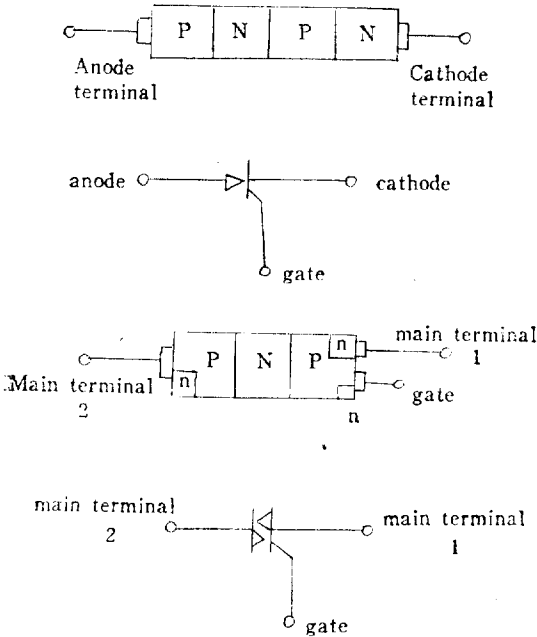
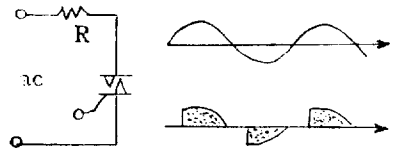
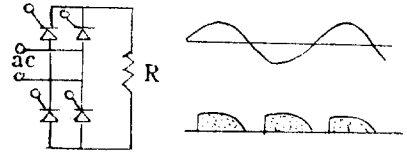


그림 1 Junction diagram & Symbol of SCR, Triac

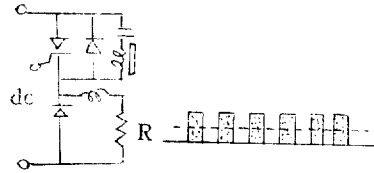
이러한 素子로 構成된 回路에서 생기는 出力波形은 電源(ac 혹은 dc), 負荷의 種類 또 制御特性에 따라 여러가지 狀態로 할 수 있다. 그림 2는 抵抗負荷時의 出力電壓波形의 形態를 表示한 것이다. 그림(a)는 phase shift에 의한 ac power control이고, 그림(b), 그림(c)는 phase shift, chopper에 의한 de power control이다. 그리고 그림(d), (e)는 power의 周波數變換이고, 전자는 自動 inverter, 후자는 cyclo-converter方式 이된다.



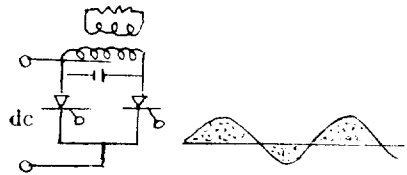
(a) ac phase shift control



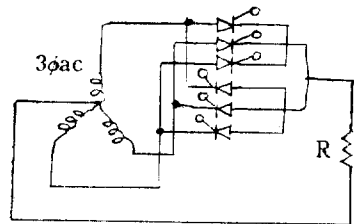
(b) Phase shift ac-dc cont.



(c) Time Ratio control



(d) Variable frequency



(e) Cyclo-Converter frequency control

그림 2 Out put wave forms by convertor or inverter

Thyristor가 탄생하여 약 10年間の 定格의 増加 또 價格과 將來의 推移를 1970年 J.D McColl가 Electrical Times에 發表하였다⁴⁾. 그림3은 이것을 表示한 것이다.

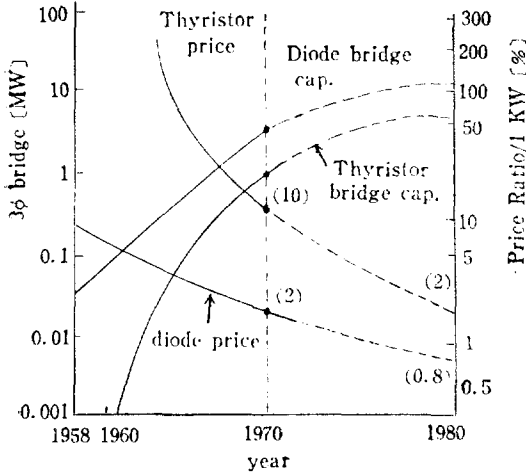


Fig 3 Estimation of price & capacity for Thyristor and diode

Thyristor, Diode의 價格의 大幅的인 低減과 容量의 増加에 期待가 된다. cost down과 그 需要는 서로 因果關係가 있으므로 Thyristor의 利用은 今後 더욱 旺盛하리라 생각된다.

이와 같은 Thyristor 利用은 工業技術全體를 構成하고 있는 大家族중에 새로이 侵入하여 長點 缺點을 모두 가지고 있음에도 불구하고 自己自身の 立場을 主張하고 있다. 즉 素子自體는 "on" "off"의 作用을 하면서 電力의 變換(conversion), 制御(control) 그리고 開閉(switching)의 優秀한 長點과 한편 이에 따르는 高調波分(harmonic content)波形, noise 등⁵⁾의 缺點을 질머지면서도 Solidstate Power Electronics 技術分野를 開拓하고 있다.

(2-2) Powerelectronics

Thyristor에 의한 電力變換은 앞에서 說明하였다. 여기서 아는 바와 같이 電氣의 姿勢는 電壓, 電流, 周波數의 3가지 要素로 되어 있다. 通信, 電子의 分野에서는 이러한 3개를 자유로이 사용하여 많은 技術을 展開하였다. 그러나 電力에서는 周波數에 대해서는 直流 아니면 交流 60Hz의 商用周波數의 범위를 벗어나지 못하였다. 즉 通信, 電子技術의 自由度 3에 대해 電力技術은 2에 지나지 않았다. 이제 경제성과 신뢰성이 우수한 周波數變換器가 생긴다고 하면 周波數를 固定한 상태로 개발되어 왔던 從來의 電力技術에 革新的 進歩를 가져올 것이라 생각된다. Solid-state Power Device에 의한 frequency changer가 이것을 해결하는 도중에 있다. 그리고 이러한 device는 power分野에 侵入하여 electronic power conversion 또는 Power

electronics分野를 개척하고 있다.

앞에서 이야기한 電氣工學의 對象에서 energy의 形態와 그 變換關係를 표시하면 그림 4와 같다. 이 중에서 電氣工學分野라고 생각되는 부분을 나열하면 그림 5와 같다⁶⁾.

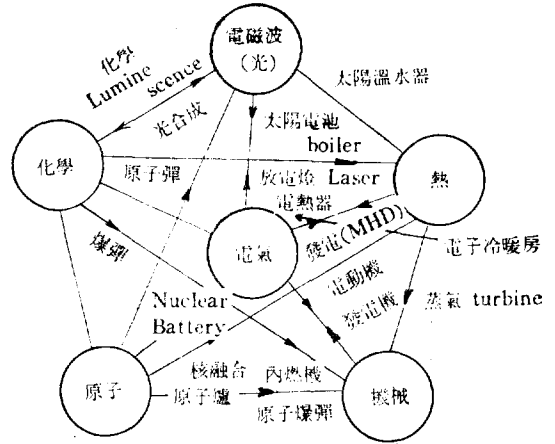


Fig 4 energy distribution and conversion

Powerelectronics란 電力産業用的 electronics라고 말할 수 있고 電力工學과 電子工學의 重疊, 融合되는 工學의 分野이고, (1) Solid state power device에 의한 電力變換, 制御, (2) Computer 및 이와 관련된 應用技術로서의 情報處理의 電力系의 利用 (3) Plasma, Super conduction, Laser의 3가지 分野를 말한다.

이 定義는 廣義의 解析이 된다. 여기서 學問의 領域이나 範圍라는 靜的問題에 중점을 둘 것이 아니라, 技術發展의 過程과 技術革新이라는 動的인 의미에서의 Powerelectronics를 생각한다고 하면 (1)의 分野 즉 그림(5)의 點線部分내의 것이 그 主體라고 생각하는 것이 제일 타당하다고 본다.

IEEE Spectrum誌에⁷⁾ H.F Storm는 "The Field of Conversion and Control implemented by Solid-State Device is generally referred to as Powerelectronics"라고 定義를 내린 이유도 여기에 있다고 본다. 즉 Powertransistor, Silicon diode, Thyristor 등 固體素子를 이용한 power의 變換, 制御分野를 말한다. 이러한 素子는 on, off의 動作을 하는 單純한 素子가 電力變換, 制御에 중요한 役割을 하는 근거는 어디에 있느냐 하면

i) on, off 制御: 眞空管, transistor의 增幅回路를 사용한 制御는 素子自體의 耐熱상의 問題에서 power에 限界가 있다.

큰 power가 變換, 制御에는 損失이 수반하지 않는

Thyristor의 on, off方式을 사용하여야 한다.

ii) on off의 許容 cycle이 크다: 制御의 值를 높이기 위해서는 on, off의 許容回數가 커야 한다. 大電力의 on, off에서 數百 cycle의 速度로 動作할 수 있는 것은 thyristor素子만이다.

iii) Contactless switch: response가 빠르고 maintenance free인 것은 Thyristor이다.

이와 같은 動作을 위해서는 電子工學의 배경이 절대로 필요하다. 즉 Powerelectronics에 있어 電子回路는 사람의 神經系에 비한다면, 血管系, 筋肉系에 해당되는 것은 電力回路가 된다. 따라서 電力回路의 對象에 electronics의 效果를 充分히 이용하여 이것이 가지고 있는 可能性을 最大한 확대하여 電力의 "needs"

에 보다 "match"한 新技術을 開發하고 새로운 事態에 대응하는 素質이 어느때 보다 높기 要請된다. 그리고 이 分野가 크게 성장한 현재 또 이 分野가 power에서 시작하여 power로 끝나는 만큼 電氣技術教育의 면, 電氣技術者의 마음가짐에 영향을 주는 것만이 사실이다. 즉 solid state power device가 power分野에서 活用되는 限 電子回路의 지식없이는 Thyristor를 조화있게 사용할 수 없다.

앞으로는 현재의 Power electronics分野가 점차로 發展하여 가까운 장래에 情報處理의 判斷機能도 加해될 정도로 發達할 可能性이 있다. 그 이유는 Thyristor에 論理素子의 組合에 의한 制御가 半導體應用技術로서 점점 發展을 일으키고 있기 때문이다.

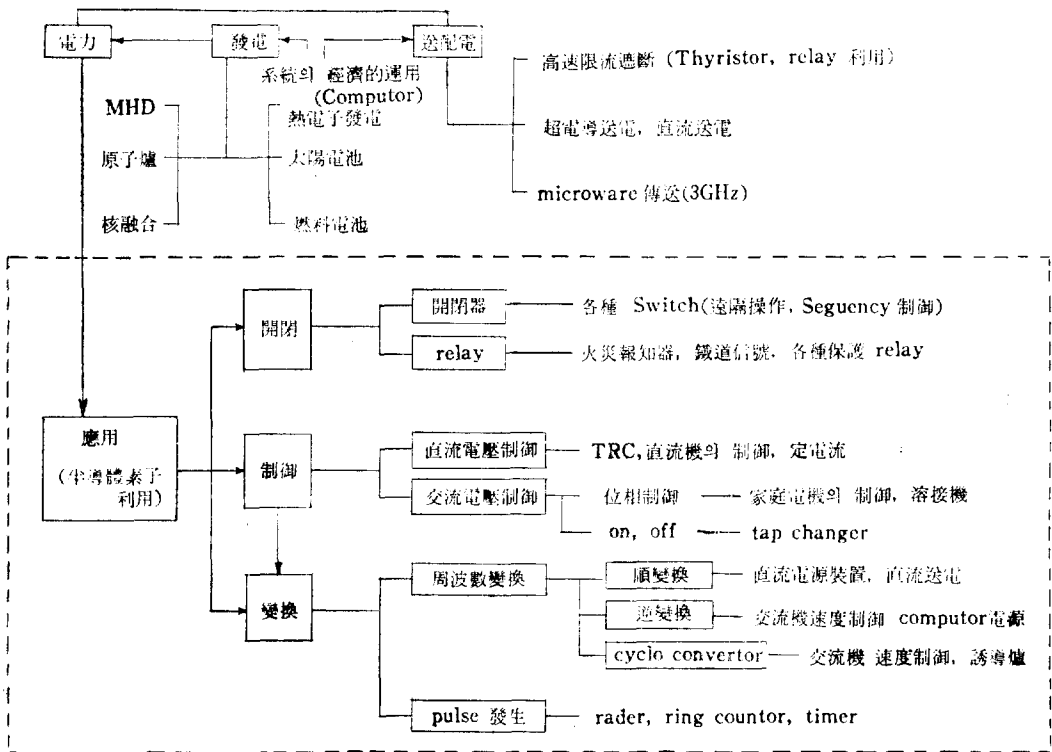


그림 5 Powerelectronics

3. Solid-State Mortor Control

Thyristor가 처음으로 脚光을 받은 것은 電動機制御에의 適用이다. 그림 5에서 아는 바와 같이 현재의 Power electronics分野에서 電動機制御는 극히 그 일부에 지나지 않으나 이것이 가지고 있는 意義는 크다.

3-1 直流電動機制御

直流電動機는 交流電源에서 整流된 直流로 運轉하는

Static Leonard System를 取하는 경우가 第一 많다. 종래의 水銀整流器로 하던 方法이 소멸되고 대신 Thyristor의 急激한 開發 즉 大容量, 耐壓, 그리고 電流容量의 增大로 이미 10,000KW容量의 直流電動機의 電源으로서 Thyristor bridge回路가 實用되고 있다.

3KW이하는 單相整流, 500KW까지는 3相, 500KW 이상에서는 6相의 電源이 使用된다. 이 System의 用途로서는 製鐵工業 關係에서 分塊 mill, Plate mill, Hot Strip mill, Tandem cold mill, 製紙 抄紙機, Process處理機 등 精密하고 敏速한 速度制御가 要求되

는 경우에 適用된다. 그리고 小容量의 것은 machine tool, extruder 그리고 conveyor등에 使用된다. 이 Static Leonard System이 널리 使用되는 理由は 어느 電動機制御보다 價格이 싸고, 速度調節範圍가 armature電壓調節에서 1/10(定格速度以下)까지 可能하고, 또한 Field를 弱하게 하여 2~3배의 速度制御를 할 수 있다. 그림 6(a)는 Static Leonard system를 表示한 것이다. 또 한편 可逆運轉方式은 여러가지 방식이 있으나 그림 6(b)에 표시한 두群의 整流裝置를 逆並列接續한 것이다.

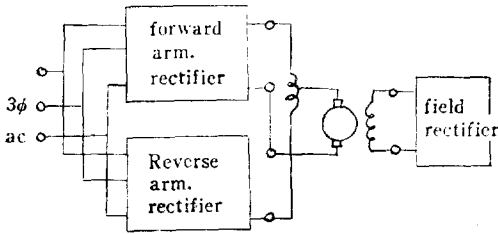
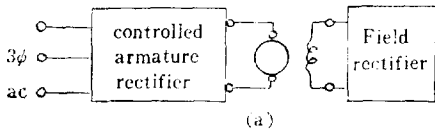


그림 6 Rectifier de motor drine

直流電動機制御의 이 방식에 關한 Thyristor裝置構成上의 問題點은 거의 解決되었으나, 大容量化와 單相回路에의 適用에 따르는 問題點이 남아있고

- i) 整流回路高調波의 直流電動機에 미치는 영향, 즉 銅損增加, 整流의 惡化, 그리고 補極磁束의 eddy current에 의한 位相 delay등이다.
- ii) Thyristor의 定格과 負荷와의 合理的 適合方法 즉 負荷의 Pattern이 주어졌을 때 第一 經濟的인 裝置며 또 返復負荷時 Thyristor의 接合部 溫度上昇과 定格의 Parameter등이다.
- iii) 交流電源에 含有되는 高調波의 問題 등이 남아 있다.

直流電動機를 制御하는 다른 方法으로서는 Thyristor의 出現에 의해 새로 開發實用化되고 있는 것은 TRC 즉 Chopper方式이고 그림 7과 같고 그림 1(d)의 回路를 電機子回路에 挿入한 것이다.

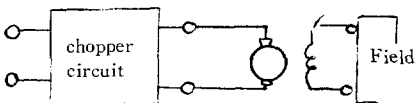


그림 7 dc chopper motor drive

이 방식은 주로 蓄電池를 energy源으로 驅動되는

電氣車, 電氣 bus등에 使用되고 最近에는 1500V의 直流電源에서 直接 chopper를 利用하여 電氣車의 速度制御를 한다. 종래의 制御用 抵抗器代身 chopper에 의해 制御하므로 電氣車의 力行, 回生制動의 경우 損失을 억제한다. 그러나 直流電源에 흐르는 電流는 pulse狀이고 많은 高調波를 포함하므로 電氣車輪용으로 利用될때는 通信線의 誘導障害가 問題가 된다.

이 System에 있어서 chopper의 周波數選定, LC filter의 設置등이 問題가 되고, 今後 chopper方式의 容量增大에 따라 많은 검토가 필요하다.

3-2 交流電動機의 制御

Invertor에 의한 制御: Invertor에 의한 可變周波數制御는 電動機自體가 直流電動機에 비해 整流子가 없으므로 整流의 問題가 없고 構造는 硬固하다. 그러나 電源周波數와 同期 또는 약간의 slip로 電動機가 回轉하므로 精密速度制御는 종래 固難하였으나 그림 8과 같이 Invertor의 可變周波數를 電源周波數로 하여 速度制御를 하고 그 精度는 0.1%程度까지 높일 수 있다. 周波數의 可變範圍는 10~200Hz程度이다. 그리고 對象電動機는 籠形誘導電動機, Reluctance電動機, 同期電動機등이다.

그림에서 ac를 dc로 變換하여 다시 可變周波數의 ac

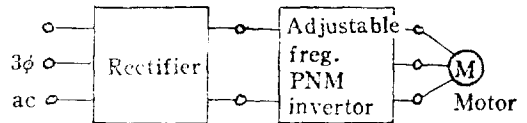


그림 8 a typical inverter ac motor drive

電源으로 convert하여 電動機를 驅動한다. KW當의 Invertor cost는 rectifier의 그것에 비해 약 2배라한다. 따라서 變換裝置는 DC電動機의 3배가 된다.

可變周波數로 運轉할때 負荷에 要求되는 特性이 定出力이나 定 torque特性이나에 따라 制御方式이 달라진다. 定出力 特性의 경우는 速度의 如何에 關係없이 出力이 一定하여야 하므로 高速이 될수록 torque는 低下한다. 따라서 勵磁電流를 無視한 1次電流는 slip가 작은 範圍에서는 電動機의 端子電壓은 一定이 유지할 必要가 있다. 한편 定 torque特性에서는 出力이 速度에 比例하여 크게 된다. 따라서 1次電流는 速度에 比例하여 커야 한다. 즉 端子電壓과 周波數의 比例關係 $V/f = \text{一定}$ 이 되도록 制御할 必要가 있다.

또 電動機에 따라 Invertor出力電壓의 波形에 影響이 있다. 誘導電動機의 경우는 Invertor의 出力電壓의 step는 6相에 相當하고 그림 9(a)이라도 이때 5次,

7次...의 高調波는 回轉子回路의 誘導作用에 의해 等價的으로 制動이 잘 되는 回路라고 생각되고, 또 leakage reactance가 크므로 電源에 高調波가 포함되어도 電

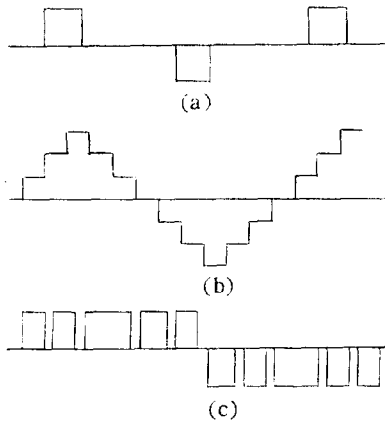


그림 9 output waveforms from Inverter

流波形的 distortion은 적고 問題가 되지 않으나 同期電動機의 경우는 그림(b)의 12相 이상이 要望된다. 5次, 7次등의 低次高調波의 電流가 많이 흘릴때 同期機에서는 固定子와 回轉子間은 spring系를 形成하고 있으므로 特히 第5調波는 逆回轉磁界가 되어 damping torque를 減少하고 振動을 發生한다. 12相에 相當하며는 低調波가 11次이고 含有量도 적고 이 調波의 回轉速度도 빠르고 回轉子는 機械的으로 應答이 느리므로 安定運轉이 된다. 한편 波形的 正弦波化에서 pulse-width modulation (PWM)이 低速度波形에서 使用된다. 이 方法에는 3가지가 있고, 半波周期에서 4개 내지 6개의 pulse로 固定하고, pulse width가 變調된다. 다음 pulse周期와 幅에 따라 pulse數를 증가시키는 方法이다. 그림 9(c)와 같이 pulse數를 固定시키고 pulse幅을 正弦波로 근사하게 한다. 이것은 fast turn off의 Thyristor가 要求되면 commutation loss는 크다.

3-3 卷線型誘導電動機

卷線型에서는 回轉子의 에너지는 籠型제와 달리 電動機外部에서 發散하거나 또는 線路에 返還하게 된다. 그림 10(a)는 전자이고 그림 (b)는 후자의 경우가 된다.

3-4 Commutatorless Motor

直流電動機는 그 構造는 弱하나 制御에 있어서는 그 어느 電動機보다 우수하다. 그래서 이와 유사한 特性을 가지면서 整流子를 使用하지 않은 Commutatorless motor는 同期機의 構造에 依存하면, 그 周波數를

回轉子의 回轉速度와 항상 一致하도록 closed loop를 使用하여 脫調도 일어나지 않고, 速度는 直流機와 같이 界磁의 세기와 電源電壓의 크기에 따라 달라지게 만든것이다. 그림 11은 이것을 표시한 것이다. 이때 open loop가 되면 단순한 inverter에 의한 同期機驅動에 지나지 않는다. 그림(a)는 3相交流電源을 整流하여

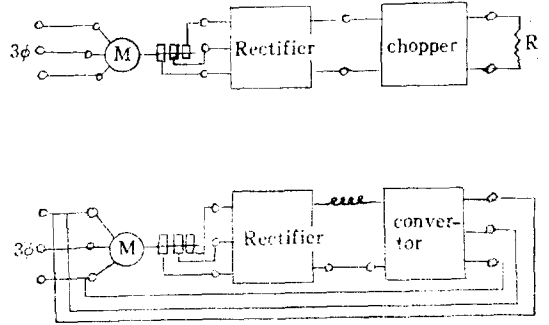


그림 10 wound-rotor motor drives.

다시 可變周波數의 3相交流로 變換하여 同期電動機를 驅動한다. 이 경우 回轉子의 位置를 Distributor에 의해 檢出하고, 回轉子가 所定의 位置에 왔을 때 Inverter의 所定의 Thyristor에 gate信號를 보내도록 되어 있으므로 Inverter의 周波數는 恒常 回轉周波數와 一致된다. 따라서 直流機의 整流子에 相當한 것이 Distributor와 Inverter이고 速度制御는 整流器側의 點弧角을 制御하여 直流電壓을 加減하므로써 이루어 진다.

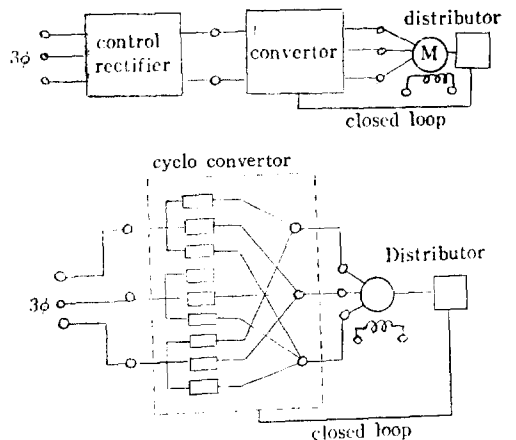


그림 11 Commutatorless motor

그림(b)는 cyclo-converter方式이고, line commutation이므로 轉流는 安定하나 制御方式은 복잡하다.

Commutatorless Motor, 때로는 Thyristor motor라고 불리우는 이 電動機는 直流機에 비해

i) 保守가 簡單하며 高速化 大容量化가 쉽다. 현재의 直流機는 整流子때문에 5,000rpm, 5,000KW이상이 곤난하다.

ii) 入力電壓을 높일 수 있다. 즉 直流電壓에 限界가 있다. 直流機에서는 segment電壓이 技術적으로 30V정도이다.

iii) 速度制御裝置가 簡單하고 逆回轉이 용이하다.

앞으로의 이 方面의 研究로서는

a) 卷線의 inductance가 크고, 轉流時의 重疊角이 크다.

b) 起動瞬時의 回轉位置에 의한 起動 torque가 脈動한다.

등을 改良하여야 한다. 이제 이 새로운 電動機는 종래의 電磁機械와 solid state control device와의 가장 밀접한 System에서 탄생하게 되었다. 1973년 IEEE Spectrum⁽⁹⁾에는 "Thyristor and transistor motors have graduated from the laboratory into commercial applications"이라고 하여 commutatorless motor의 實用화가 주장되고 있다. 1920年代에서 30年代를 걸쳐, 미국, 독일을 中心으로 하여 研究하였던 Alexanderson⁹⁾의 Thyatron motor, Stöhr의 逆起電力轉流形의 Commutatorless motor 등의 研究努力에도 불구하고 實用化는 되지 못하였다. 그 理由를 簡單히 말해서 Thyristor와 時代를 같이 하지 않았다는 데 있다.

4. 展 望

Thyristor應用은 이제 자기 分野를 確保하고 있는 동시에 끝없는 發展을 하고 있다. 여기서 다시 한번

생각할 것은 최초의 Thyristor의 脚光은 電動機制御에 基因되고 또한 Thyristor의 惠澤에 의해 電動機制御에 革新을 가져 왔다. 實로 Thyristor와 電動機制御는 깊은 因果關係가 있다.

小型機器, 家庭機器등의 適用에서 부터 종래 機械的으로 이루어진 動作을 Powerelectronics的으로 動作시키게 되었고, 社會에 있어서의 電氣機械가 占領하고 있는 比率를 점차로 增大시켜가고 있다.

月面에서 電氣自動車가 달리고, 海洋에서도 電氣 robot의 出現이 멀지 않다고 생각된다. 電氣技術이 power와 electronics의 融合에 의해 未來의 社會는 점점더 電氣的으로 되리라고 豫想된다.

參 考 文 獻

- 1) C.L. Fortesque: Method of Symmetrical coordinate, Wiley 1927
- 2) Gebriel Kron: The Application of Tensors to the Analysis of Rotating Electric Machinery,
- 3) D.C. White & H.H.: Electromechanical Energy Conversion Woodson Wiely. 1958
- 4) J.D. McColl: Electrical Times, (April, 1970)
- 5) H.A. Gauper.: IEEE Spectrum, (October, 1971).
- 6) 宮入庄太: 파우워 에레क्ट로닉스, 丸善, 1974
- 7) H.F. Storm: IEEE Spectrum (Octo. 1969)
- 8) J. Inugaki: IEEE Spectrum (June. 1973)
- 9) E.F.W Alexanderson: IEE., Vol. 53 (Nov. 1934).