

◆ 技術解説

機械制御動力으로서의 電動機의 動向

梁培德* · 李奉珍**

—차 레—

- 1. 序 言
 - 2. 電動機의 種類와 그 進歩의 概要
 - 3. 機械整流子의 回避의 動向
 - 4. 半導體素子에 의한 回轉機驅動 및 制御法의 進歩
 - 5. 誘導電動機의 速度制御
 - 6. 制御機械로서 Servo Motor
 - 7. 結 言
- 參考文獻

表 1. 回電機의 種類

- (1) 直 流 機
 - 普通直流機 : 分卷, 直卷, 複卷
 - 單極機(homopolar machine)
 - 無整流子電動機*1 : Thyristor motor, Hall-motor, Transistor motor
 - 回轉形增幅機*2 : Amplidyne, Meterdyne, Rototrol motor
 - 直流 Servo-motor : Print-motor, Minimum-Inertia motor
- (2) 誘 導 機
 - 單相상자形 誘導電動機 : 抵抗分相形*3, Shading Coil motor, Condenser motor, Monocyclic motor
 - 二相상자形 誘導機 : 二相 servo-motor
 - 三相誘導機 : 보통 상자형, 특수 상자형(2중 상자형), 卷線形(Selbius)
- (3) 同 期 形
 - 單相同期機
 - 三相同期機
 - 反動電動機(單相, 三相)
 - 高周波發電機*3
- (4) 交流整流子電動機
 - 單相直卷
 - 反 發 形
 - 三相直卷
 - Schrage motor
 - Universal motor*3
- (5) 其 他
 - Hysteresis motor

1. 序 言

産業革命이 蒸氣機關의 發明에 基因하고 있음은 周知의 事實이다. 蒸氣機關을 動力으로 한 機械가 出現케 되었는데 이 機械의 動力도 그 後內燃機關, 그리고 電動機의 登場과 Flywheel式 驅動方式의 發表 등으로 機械의 動力源도 多樣化가 되었다고 하겠다.

그러나 이들 中 電動機는 電氣와 機械의 結合技術이라 하겠는데, 오늘날 機械의 system化를 重要視하는 技術의 動向으로 보아서 電動機는 電氣技術의 占有物이라고 斷言하기가 어렵고 機械技術者의 領域이라고 하기도 困難하다.

機械技術者가 理解하기엔 機械와 多少 다른 電氣的인 基礎知識을 必要로 하기 때문이다. 이에 基礎的인 知識을 機械技術者를 爲해 紹介해 보기로 한다.

2. 電動機의 種類와 그 進歩의 概要

2.1 電磁形回轉機와 그 優位性

電氣 Energy를 機械 Energy로 議換함에 있어서 電磁 Energy를 媒介로 하는 것이 電磁形電動機이다. 2次大戰以後 靜電 Energy를 媒介로 하는 靜電形電動機도 研究되었던 일이 있으나(1) 거의 實用될 수 없음이 밝혀졌다. 또 最近에는 特殊한 感光, 혹은 感熱의 材料를 사용한 熱모타(2), 光모타 등의 研究도 있으나 出力이나 效率의 點에서는 지금의 것에 비교도 되지 않는다.

따라서 power의 變換機로서 從來의 電磁形이 唯一한 것이며, 基本原理에 있어서 劃期的인 것의 出現은 當分間 期待할 수 없을 것 같다.

2.2 電磁形回轉機의 種類

* 正會員 : 韓國科學技術研究所 電氣計測研究室 先任研究員
** 韓國科學技術研究所 自動制御研究室長

*1 비교적 새로운 機種으로서 개발도상에 있다.
*2 현재 거의 제작되지 않고 있다.
*3 이 용도가 감퇴하는 경향에 있다.

Step motor*1

Linear motor(誘導形, 同期)*2

Selsyn motor

回轉變流機

電磁形電動機는 직접發電機로 될 수 있는 長點이 있다. 여기에發電機를 포함하여回轉機로서 그의種數를表 1에表示하였다. 이종류 이외에도 많은種類가 있다.

2.3 機種의 變遷 및 發展의 概要

回轉機의 議化의 主된 것을 들어 보면 다음과 같다.

(1) 單相誘導機는 反發誘導形, 抵抗分相形, Shading coil形, Condenser分相形, Mono-cyclic形 등 여러 종류가 있으나 反發誘導形이나 Mono-cyclic形은 차츰 사라지고 Condenser motor는 진보되고 보급되는 등 그機種에 따라서 盛衰가 있다.

(2) 2次戰 以後, Amplidyne 等の 回轉形增幅機가 自動制御의 進歩와 함께 登場하였으나, Thyristor의 出現에 依하여 쇠퇴하는 傾向이다.

(3) 最初 船用同期發電機의 peak負荷에 依한 電壓降下의 急速한 回復을 위하여 自動磁方式이 開發되고, 따라서 이것이 24000kVA 水車發電機에까지 適用되는 등 同期機의 勵磁方式의 進歩가 현저하다.

(4) 自動制御의 進歩에 呼應하여 D.C Servo, 二相 servo 等 機械時定數가 적은 制御用 Motor가 登場하였다.

(5) Stepping motor가 등장하여 數値制御의 工作技術에 큰 役割을 하여 왔으나 최근에는 D.C Servo motor를 사용하여 closed loop control로 되는 傾向이다.

(6) Thyristor나 powered transistor의 발전에 의하여 保守가 불필요한 無整流子 電動機가 등장하고 있다.

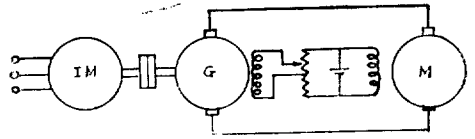
(7) 從來의 回轉運動만에 그쳤던 電動機에 直接直線運動을 줄 수 있는 同期機 혹은 誘導形 Linear motor가 탄생하였다.

(8) 지금까지 소외되었던 單極發電機가 強電磁石用發電機로서 脚光을 받고 있다. 그 배후에는 超電導나 液體集電技術 등의 周邊技術의 進歩가 있었다.

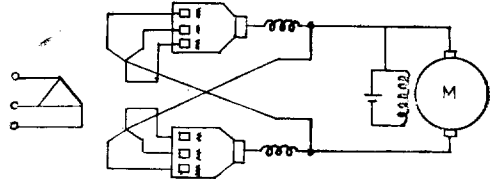
(9) 半導體素子의 利用技術이나 制御技術의 進歩에 의하여 回轉機의 驅動法이 현저하게 진보하고 回轉機에 지금까지 없던 特性을 부여할 수 있게 되었다.

(10) 容量的으로는 100萬kVA를 초과하는 大容量 Turbine發電機가 出現하였다. 이것은 冷却方式, 材料, 設計나 製造技術의 대단한 進歩에 依한 것이다.

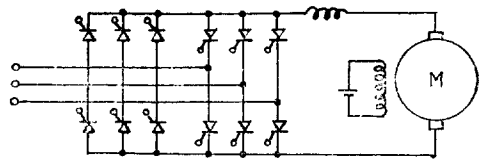
이와 같이 진보변천의 자취를 돌아보면 과거의 電動



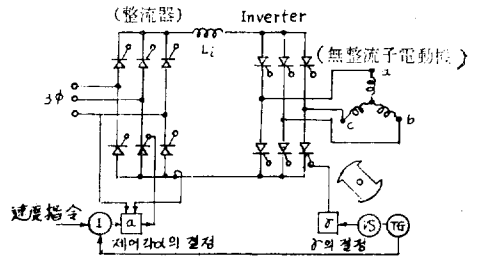
(a) Ward Leonard



(b) 靜止 Leonard



(c) Thyristor Leonard



(d) 無整流子電動機

그림 1. Leonard系의 推移

機와 지금의 그것은 참으로 隔世之感이 있다.

3. 機械整流子의 回避의 動向

3.1 Leonard系의 變遷

直流電動機의 電機子電壓을 加減하여 電動機의 速度를 制御하는 것을 一般으로 Leonard法이라 말한다. 直流電壓의 加減은 금일에 爲서는 Thyristor chopper를 사용하여 쉽게 또 효율 좋게 할 이 가능하나 Thyristor 출현 이전에는 회전기에 依한 方法으로 하였다.

그림 1 (a)는 主電動機의 電壓調整에 M-G를 사용하였다. 이것을 Ward-Leonard法이라 말한다. 製鐵所의 Mill, 新聞社의 輪轉機, 製紙工場의 종이卷取機 등 主電動機에 널리 사용되고 있는 것이다.

이것이 水銀整流器의 出現에 의하여 그림 1 (b)와 같이 개량되고 靜止 Leonard라 부르게 되었다.

Thyristor出現에 의해서 그 水銀整流器가 Thyristor로 바꾸어져 그림 1 (c)와 같이 되어서 금일에 이르고 있다.

그림 1 (d)는 整流子를 가진 主電動機의 直流機가 이것을 갖지 않는 電動機(無整流子電動機)로 議換된 것으로서 아직은 普及段階은 아니나 수년 전에 150kW급이 제작되어 운전단계에 있다.

(a)→(b)→(c)→(d)의 推移는 保守의 點으로부터 同轉形에 의한 것은 靜止形으로, 整流子를 가진 전동기는 이것을 갖지 않는 전동기에게로 移行의 傾向을 여실히 보여 주는 것으로서 Maintenance free가 현재의 產業界에서 얼마나 중요한가를 말하여 주고 있다.

3.2 整流子の作用과 缺點

同期電動機는 入力周波數 f 와 回轉周波數 $f_r = np(n: rps, p: 極對數)$ 가 一致하는 同期速度에 있어서만이 Torquer를 발생하고 負荷를 거는 것이 가능하다. 따라서 同期機에서는 入力주파수가 一定한 限 $n=f/p$ 의 同期速度만으로 운전함이 가능하다.

速度制驅가 우수한 電動機로서는 直流機와 交流整流子機를 들 수 있으나 이들은 어느 쪽도 整流子를 갖고 그의 周波數議換作用에 의하여 우수한 速度制御度이 얻어진다.

直流電動機의 整流子는 入力の 直流를 回轉周波數 $f_r = np$ 와 같은 周波數 f 의 交流로 議換한다. 따라서 어떠한 회전수에 있어서도 電機子卷線에 흐르는 電流의 周波數 f 는 f_r 에 一致하고 있는 것으로부터 항상 任意速度로 회전하는 것이 가능하다. 그렇지만 界磁電流, 電機子電流의 어느 쪽의 한쪽 또는 양쪽을 조정하면 그발생 Torque와 속도를 쉽게 조정하는 것이 가능하다.

이와 같이 整流子는 速度制御에 있어서 현저한 효과를 발휘하나 다음과 같은 缺點이 있다.

i) 補 修

電流의 斷續이 機械的으로 미치기 때문에 불꽃이 생기고 整流子表面이 損傷한다던가 brush의 粉末이 整流子片사이에 묻혀 絶線을 劣化시키기 때문에 整流子面을 항상 깨끗이 유지토록 주의하여야 하며 brush는 다모하는 것이므로 수시 바꾸어야 하는 등 보수를 태만히 해서는 안 된다.

ii) 容 量

整流子片사이의 電壓은 현재의 기술로는 25V정도가 한계이므로 brush 사이의 電壓에도 한도가 있다. 또 電流나 回轉數를 올리면 불꽃이 나게 된다.

여기서 지금의 기술로서는 직류기의 製作限界容量 kW limit는 다음 식으로 표시된다.

$$kW \text{ limit} = (1.5 \sim 2.0) \times 10^6 / rpm$$

3.3 無整流子 電動機

直流機는 整流子가 있다는 點에서 좋지 않으나 制御性에서 보면 가장 우수하다. 이 制御性을 그대로 유지하면서 整流子만을 제거할 수 없을까가 이 방면 技術者들의 꿈이었다.

直流機에서 整流子를 없애버린다는 것은 理論만으로도 불가능하므로 무엇인가로 代替시키는 方法 이의는 없다.

이 代替方法으로서 Thyristor를 사용한 것이 현재의 無整流子 電動機이다.⁽³⁾

그림 1 (d)는 無整流子 電動機의 原理이다. PS에 의하여 回轉子의 回轉位置를 檢出하고 電機子卷線의 電流와 磁極과에 회전 Torque를 발생할 수 있는 위치에 있을 때 그 卷線의 Thyristor를 on시켜 전류를 흘린다. 따라서 이 Thyristor群은 機械整流子와 전혀 똑같은 作用을 하는 것이다. 整流子는 電氣的 無接點 switch로써 代替시킨 것으로 된다.

그러나 이 無整流子 電動機에서도

- i) 過負何耐量이 直流機에 比하여 적고
- ii) 起動時에 문제가 있으며
- iii) 過度應答이 명확히 되지 않는 등

今後의 究研에 기대할 것이 많다. 또한 “無整流子 電動機”라는 이름도 아직 고정되어 있지 않은 것이다.

이것을 Thyristor-motor, Brushless-motor 등으로 부르는 사람도 있다. 따라서 이 명칭의 統一도 今後의 課題이다.

4. 半導體素子에 의한 回轉機驅動 및 制御法の 進歩

4.1 Thyristor의 進歩

Thyristor는 1957年 GE에서 發明된 것으로서 거의 20年 사이에 가정이나 工場, 電力系統, 交通 등 널리 사용되고 있는 것으로서 電力의 開閉, 議換, 制御의 技術에 革命的인 發展을 가져왔다.

電力의 議換이나 制御를 效率 좋게 이행할 수 있는 것은 ON-OFF制御를 할 수 있기 때문이다. ON-OFF制御의 열쇠를 쥐고 있는 것은 그곳에 사용된 switching素子로써 switching의 每秒當의 同數를 많이 얻을 수록 主回路의 構成은 簡便하게 될 뿐만 아니라 精度는 向上된다.

또 switching素子의 損失이 적을수록 制御時의 效率는 높게 된다. Thyristor는 극히 고성능의 switching

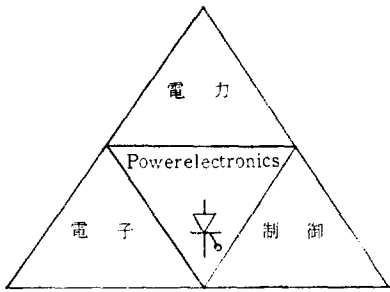


그림 2. Powerelectronics의 位置

素子로서 1sec 사이에 수백회의 ON-OFF는 쉽게 되고 또 이 경우 손실도 적다.

4.2 Powerelectronics

Thyristor의 應用分野를 最近“Powerelectronics”라고 부르고 있다. Newell⁽⁴⁾은 電氣工學의 主要分野의 電力, 電子, 制御의 3分野의 境界領域을 Powerelectronics라고 말하였다. 이 主役은 Thyristor로서 定義나 位置를 그림 2를 사용하여 표시한다.

Thyristor를 ON시키는 것은 gate에 數 Volt의 pulse 狀의 信號를 보낼 需要가 있으며 이 gate信號의 回路를 gate回路라고 말한다. IC 등이 발생되어 열가로서 또 compact하게 構成할 수 있게 되었다.

Powerelectronics의 應用은 광범위하나 가장 많이 사용되는 分野는 回轉機制御分野이다. 回轉機의 制御에는 Thyristor없이 되지 않는다고 誤하여도 과언은 아니다.

4.3 馬力時代의 回轉機와 今日的 回轉機

2次大戰 前에는 電動機의 出力을 표시함에 「馬力」단위를 사용하였다. 人類는 家畜을 이용하여 勞力의 輕減을 企及하거나 이와 같은 기계를 발명하여 가속을 機械로 대체하여 왔다. 새로이 등장하는 機械가 지금까지의 말 몇마리에 相當하는 가로써 「馬力」의 單位를 導入한 것은 자연스러운 일이다.

이 당시의 機械 즉 馬力時代의 電動機는 家畜의 代替만으로써 動作도 극히 단순한 것이었다. 또 畜力에 比하여 깨끗하고 충실하며 경제적이었다. 따라서 이 時代의 電動機는 어떻게 始動하였는가 速度와 Torque 관계는 어떠한가 效率은 좋은가? 등 주로 靜的인 特性에 主眼點을 두고 생각하였다.

大戰後 이미 말한 바와 같이 生産設備의 巨大化, 自動化, 省力化로써 여기에 사용되는 電動機는 높은 制御를 갖게 할 需要가 있다.

이 制御性의 賦與에는

- i) 回轉子를 가늘고 길게 設計하는 등 機械時定數를 적게 하며
 - ii) 電動機가 必要로 하는 Pwer를 지체없이 보낼 수 있게 하고
 - iii) 回轉體가 갖는 運動 Energy를 電源側에 回收(回生制動) 등의 需要가 있다.
- ii) iii)은 制御裝置로 쓰여진다.

制御裝置는 그림 3에 표시한 바와 같이 指令에 의하여 電力이라는 素材를 빨리 調理하여 電動機에 供給하는 部分으로써 이 경우 Thyristor는 훌륭한 調理師로 되어서 이 주역을 맡는다.

電動機와 이 制御部를 一體로 한 것이 電動機系이나 단순히 「電動機」로 말하고 이 電動機系를 制御하는 경우가 많다.

이것은 電動機의 特性이 制御部에의 依存度가 극히 큰 경우로서 이미 말한 無整流子 電動機 등은 그 좋은 例子이다. 결론하여 馬力時代의 電動機와 今日的 電動機는 性能의 點에 있어서 현저한 차이가 있다.

5. 誘導電動機의 速度制御⁽⁵⁾

誘導電動機는 그 構造가 간단하고 견고하여 製造에 있어서 여타 다른 電動機에 比하여 간단하며 그 응용 기술도 發達되어 가장 널리 보급되어 있는 電動機이다. 그러나 이 電動機의 速度制御는 다른 電動機에 比하여 까다롭고 어려운 結點을 갖고 있다. 따라서 誘導電動機의 長點을 살리고 어떻게 하여 이것에 速度制御性을 賦與할 것인가가 過去하로부터 今까지의 가장 중요한 課題이다.

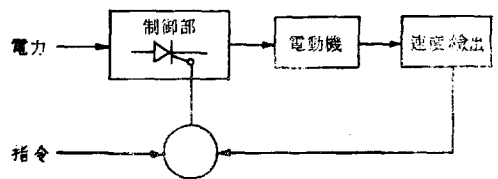


그림 3. 電動機系

5.1 速度制御의 基礎

平衡三相電源으로서 驅動되는 三相誘導電動機의 入力 P_i , 出力 P_o , 2次銅損을 P_{2c} , Slip을 S 라 하면 근사적으로 다음 식이 성립된다.

$$P_i : P_o : P_{2c} = 1 : 1 - S : S$$

보통의 운전에서는 $S=0.1 \sim 0.03$ 정도이나 電動機의 效率 η 은 概略적으로 $\eta = 1 - S = 90 \sim 97\%$, 鐵損, 1차 銅損, 機械損 등 損失을 考慮한 實際의 效率은 85% 程度로 된다.

따라서 높은 효율을 기대하려면 먼저 運轉時의 Slip S를 가능한 적게 하던가 혹은 2차의 銅損과 전력을 효과하게 利用해야 한다.

5.2 二次勵磁法

一定周波數의 入力電源으로서 速度制御를 하려면 S를 대폭으로 加減해야 되므로 效率의 현저한 低下를 면치못한다.

그래서 $P_{2c} \approx SP_1$ 의 2차銅損으로서 소비되는 電력을 電源側에 반환한다. 또는 기계출력으로 반환한다 등의 方法이 시행되어 왔다. 前者를 Scherbius法, 後者를 Kramer法, 一括하여 2차勵磁法 등으로 부르고 있다. 어느 정도 卷線形으로 되지 않으면 안되며 過去로부터 광범위하게 사용되어 왔다. 制御법위는 비교적 좁고 100~60% 정도에서 유리하다.

5.3 一次電壓制御

Torque는 거의 1次電壓의 2乘에 比例하므로 이것을 加減하여 速度制御를 할 수 있다.

이 方法은 2次銅損에 의한 發熱이 크고 效率이 나쁜 點 등의 缺點이 있으나 가격이 싸기 때문에 Crane, Elevator, 電極棒의 昇降 등 比較的 少量의 것에 사용되고 있다.

5.4 1次周波數制御에 의한 速度制御

入力周波數를 任意로 加減시키면 速度制御의 立場에서 가장 바람직한 制御가 된다. 이것은 보통形 유도전동기에 적합하고 無段階의 制御가 가능하다.

過去 이것이 사용되지 못했던 것은 信賴性이 높고 經濟的인 周波數變換器를 市場에서 求할 수 없기 때문이었다.

現在는 power electronic의 時代로서 이 要求를 만족하게 얻을 수 있는 周波數變換器 또는 Inverter가 出現하고 있어, 經濟性의 면에서도 merit가 많으므로 將來의 速度制御에 큰 역할을 하게 될 것임은 분명하다.

그림 4는 이 制御法의 한 例의 概要를 표시한 것이다. 주파수 f_1 의 三相交流로부터 點弧位相을 制御하여 任意의 直流電壓 V_d 를 얻고, 이것으로부터 Inverter로부터 다시 任意의 주파수 f_2 의 三相交流를 變換시켜서 誘導機 IM에 印加한다.

IM의 2次 Slip주파수는 $Sf_2 \approx f_s$ 로서 이것을 一定하게 制御하는 것을 「Slip 係수 一定制御」라고 말한다.

Slip주파수 一定制御로써 다음

i) V_d/f_1 ii) V_d^2/f_1 iii) V_d 를 一定하게 하면 各 경우의 Torque 對 f_1 의 特性은 그림 5와 같이 되고

- i)는 他勵直流機의 Leonard制御
- ii)는 他勵直流機의 界磁制御

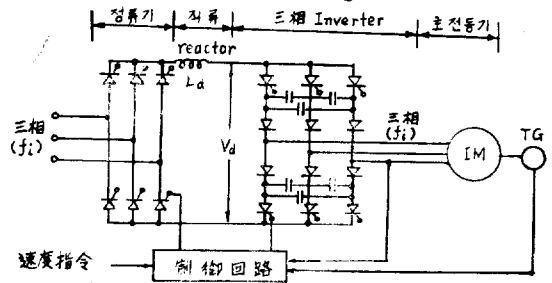


그림 4. 1次周波數制御에 의한 三相誘導機의 驅動系의 原理圖

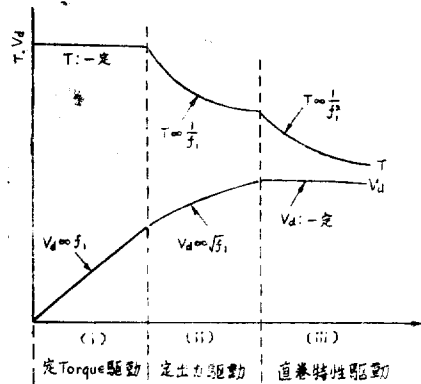


그림 5. Slip

iii)은 直流直卷機의 直卷特性에 類似한 特性으로 된다. 결론하여 制御性이 나쁘다고 생각되어 온 誘導機도 直流機와 同一한 制御性을 갖게 되었다.

6. 制御機械로서 Servo-Motor

Servo-motor는 feed back system에서 많이 사용되는 動力源으로서 다음과 같은 特性이 要求된다.

- 1) Torque/Inertier의 比가 크고 加速性和 應性이 양호할 것.
- 2) 熱容量이 커서 密閉自然空冷의 경우에도 장시간의 過負荷에 견딜 것.
- 3) 似速에서 大 Torque를 가질 것.
- 4) 유지보수가 간단할 것.
- 5) 값이 쌀 것.

Servo-motor는 用途에 따라서 小形이나 고정밀도를 要求하는 제 1차적인 제어기구에 사용되는 경우도 動力보다도 resolution이 더 중요시 되는 경우도 많다.

그러나 현재의 Servo-motor의 이용이 機械的인 動力

源으로서 軸出力을 直接 利用하려는 경향으로 되고 있기 때문에 더욱 저속에서 大 Torque를 요구하게 되고 있다.

따라서 이러한 요구에 應하여서는 DC Motor가 각광을 받고 있으며 특히 영구자석 Type의 DC Motor가 많이 개발되고 있다. 또 열용량을 높이기 위해서 heat pipe를 채용하는 DC servo-motor도 등장하고 있다.

그림 6은 F社의 22kW용 D.C Servo-motor의 특성 곡선이다.

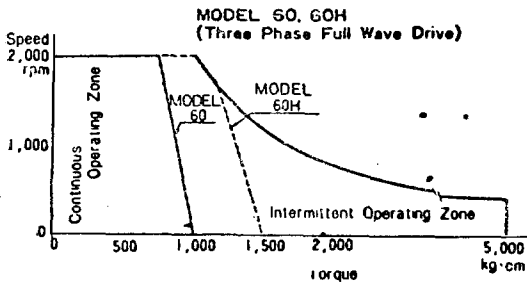


그림 6. Speed-Torque특성 22kW D.C Servo-motor

이러한 DC Servo-motor는 당분간 制御動力으로서 계속 이용될 전망이다.

7. 結 言

電動機는 이후 獨立된 機械部品으로 취급되어서 아니되며 動力 System으로서 취급되어야 할 것이다.

특히 유도전동기의 속도 可變을 생각하면 이는 driving part의 control 부분도 함께 생각하여 動力部로 보아 機械技術者의 立場에서는 電動機로 보아야 할 것이다.

이는 電氣 및 機械技術者가 關心을 가져야 할 分野로서 이 分野의 개발은 앞으로 기대되는바 크다.

참 고 문 헌

- 1) 安濃 : 電氣學會誌, 80-9 pp.1229 (1960)
- 2) 材上, 柳演 : IEEE Trans Magnetics, Mag-8, No. 3 (1972-9)
- 3) Miyairi, S. and Tunehiro Y. Intermag. Conf. Proceedings, (1963)
- 4) Newell, W.E.; IEEE Trans, Industry, Application IA-10 No.1 (1974)
- 5) J.M.D. Murphy; "Thyristor Control of AC Motors" Pergamon press, (book) 1973.

會員에게 알리는 말씀

會員여러분의 健勝하심을 仰祝합니다.

빛나는 祖國의 繁榮과 보다 잘살기 위한 근면, 자조, 협동의 새마을정신으로 힘찬 전진의 노래가 메아리치고 있는 이때 우리는 더욱 總和團決로서 健全한 社會氣風 造成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 것입니다.

따라서 政府의 庶政刷新推進을 會員 여러분께서는 가족, 친지, 동료직원 및 모든 사람에게 이같은 사향을 주지 시키어 밝은 社會建設을 위한 健全한 社會氣風 造成에 殊선수범하여 주시기 바랍니다.

1978年 1月 日

大韓電氣學會長 白