

自動磁式 交流發電機

技術解説

18~3~3

(Self-Exciting A, C, Generator)

尹 柄 義 *
(Ui Byung Yun)

1. 序 論

종래 사용되어온 교류발전기의 自動電壓調整器는 直
流勵磁機의 界磁電流를 制御함으로써 교류 발전기의 端
子電壓을 일정하게 유지하는 방식이었다. 이 경우 整定
時의 電壓變動을 적게하는 것은 비교적 용이하지만 급
격한 負荷變動에 대해서는 不便하였다. 即 발전기에 急
격한 負荷가 걸리면 발전기의 特性에 의하여 결정되는 電
壓이 순간적으로 떨어지고 또 발전기에는 複卷作用이
없고 直流勵磁機 및 制御裝置의 時定數에 의한 調整作用
의 時間的 늦음이 있기 때문에 발전기의 電壓은 더욱 降
下한다. 이 電壓降下의 방지책으로 발전기를 필요이상
크게하여 短終比를 크게하고 또 速應勵磁를 行하고 있
다. 그리고 발전기의 負荷가 誘導電動機인 경우에는 起
動電流가 크므로 全電壓起動이 가능한 것은 小容量에 限
하고 거의 모두 減壓起動을 하고 있었다.

이 難點을 補償기 위해 主回路電流에 의한 複卷特性
을 갖는 自動磁交流發電機가 개발되어 왔으며 근래에는
S.C.R. (Silicon Controlled Rectifier)의 발달에 따라 磁
氣增幅器式에서 Transistor-Thyristor 式으로 變換하고
있다. 여기서는 自動磁發電機의 基本回路 몇가지와 특
성에 대하여 略述하고 可飽和變流器를 利用한 定電壓裝
置付 自動磁交流發電機 75 KVA 에 대한 特性을 紹介하
고자 한다.

2. 自動磁方式의 分類 및 特徵

2-1 分 類

使用整流器의 種類 및 電壓調定方式에 따라 다음과
같이 분류된다.

1) Thyristor 를 사용하는 방식

Thyristor 를 主整流回路에 직접 사용하는 경우와(그
림 1-a) AVR 에 사용하는 경우가 있다(그림 1-b).

2) 可飽和鐵心을 利用한 방식

電壓調整方式에 可飽和變流器(그림 1-b) 可飽和리액
터(그림 1-c) 또는 可飽和合成變壓器(그림 1-d)를 사용

하는 自動磁方式이며 이들은 容量의 制限없이 널리 사
용되고 있다.

3) 交流勵磁機를 使用하는 方式

交流勵磁機의 構造를 回轉電機子型으로 하여 半導體
整流器를 軸上에 配置하여 勵磁하는 方式으로 Slip Ring
이 없고 Brushless 勵磁機(그림 1-e)라 불리는 것이 있다.

4) 水銀整流器를 使用하는 方式

Thyristor 또는 半導體整流器 대신에 水銀整流器를 사
용하는 方式이며(그림 1-f) 電壓은 水銀整流器의 Grid
로서 制御한다.

2-2 特 徵

以上の 自動式 交流發電方式은 종래의 直流勵磁機를
갖는 교류발전기에 비하여 다음과 같은 長點이 있다.

1) 급격한 負荷變動時의 電壓降下에 對해서는 複卷
特性이 있으므로 瞬時電壓變動率이 적고 回復時間이 극
히 빠르다.

2) 勵磁機를 軸端에 Over hang 할 필요가 없으며
로 全長이 단축된다.

3) 勵磁裝置를 配電函內에 收納하여 別置할수 있으
므로 機器配置에 유리하다.

4) 回轉式勵磁機의 整流子가 없으므로 誘導電波障
害가 없다.

5) 速應勵磁이므로 過渡安定度가 增大한다.

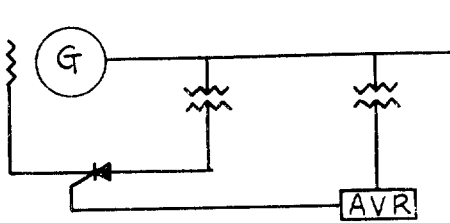
3. 勵磁方式의 說明

그림 2는 교류발전기의 自動裝置의 結線을 나타낸다.
無負荷勵磁電流는 교류발전기端子에서 直線리액터를 통
하여 얻어지며 負荷가 印加될때의 발전기 電壓降下의 補
償은 各相에 接屬되어 있는 可飽和變流器에 의해서 행
해진다. 即 直線리액터를 통한 發電機電壓에서 얻어지
는 電流와 可飽和變流器 二次電流와를 벡터의으로 加하
여 負荷에 관계없이 端子電壓을 일정하게 유지하는 것
이다.

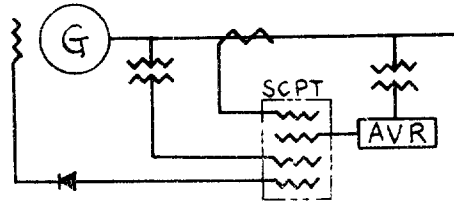
그림 2의 1相의 等價回路를 그림 3에 표시하였고 그림

* 正會員 : 利川電機 設計部 次長

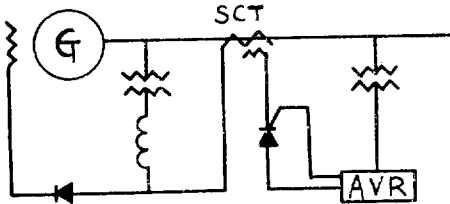
自動磁式 交流發電機



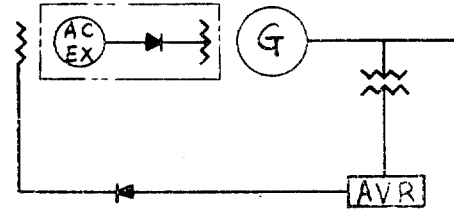
1-a Thyristor를 초 정류 회로에 사용하는 自動式



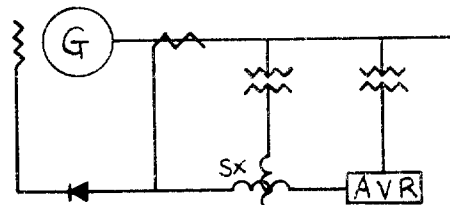
1-d 可調化 整流 변압기를 사용하는 自動式



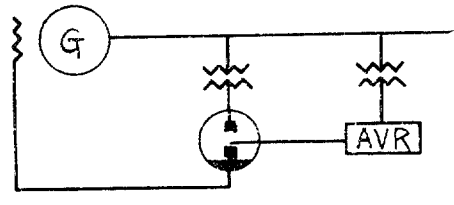
1-b 可調化 CT를 Thyristor로 제어하는 自動式



1-e 교류 勵磁機 (Brushless) 式

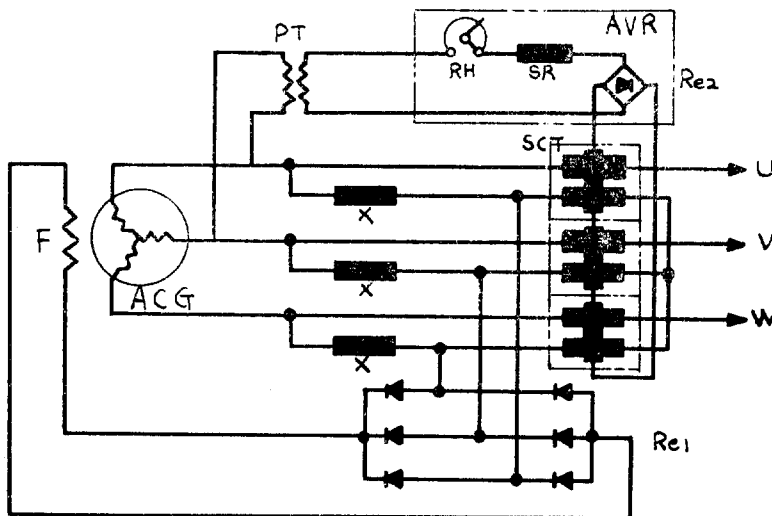


1-c 可調化 Reactor를 사용하는 自動式



1-f 수은 정류기를 사용하는 自動式

그림 1. 整流器 勵磁法의 各種



- A.C.G: 交流 發電機
- F : 界磁 卷線
- S.C.T: 可調化 變流器
- X : 直線 리액터
- SR : 可調化 電阻 리액터
- RH : 電壓 조정 抵抗器
- PT : 檢出用 變壓器
- Re1 : 主 整流器
- Re2 : AVR用 整流器
- AVR : 自動 電壓 調整器

그림 2. 可飽和變流器方式 自動磁裝置結線圖

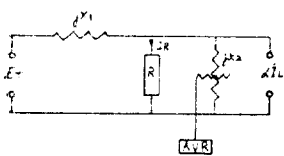


그림 3. 自動磁裝置의 1相等價回路

- ET: 交流發電機의 端子電壓
- X1: 自磁 2차의 리액턴스
- X2: 可飽和 CT의 2차 리액턴스
- I1: 負荷電流
- I2: 交流側 檢算의 界磁電流
- R: 交流側 檢算의 界磁電流
- A: 可飽和 CT의 角電壓

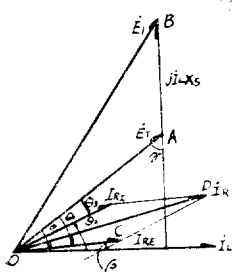


그림 4. 1相等價 回路의 벡터 圖

- EI: 交流發電機의 誘起電壓
- ET: 交流發電機의 端子電壓
- IL: 負荷電流
- IR1: IL에 의한 交流側 檢算의 界磁電流
- IRE: ET에 의한 交流側 檢算의 界磁電流
- IR: 交流側 檢算의 界磁電流
- Xs: 同期 리액턴스
- phi: 力率角

3의 벡터圖를 그림 4에 표시하였다.

그림 3과 그림 4에서 발전기電壓이 一定하게 유지되는 효과를 쉽게 알수있다. 即 발전기의 誘起電壓을 \dot{E}_I 端子電壓을 \dot{E}_T 라고 하면 $\dot{E}_I - \dot{E}_T$ 가 同期리액턴스 X_s 에 의한 電壓降下 $JX_s \dot{I}_L$ (\dot{I}_L 는 負荷電流)가 된다. 따라서 負荷電流 \dot{I}_L 의 값에 무관하게 端子電壓 \dot{E}_T 를 一定하게 하자면 \dot{E}_I 에 상응하는 界磁電流 \dot{I}_R 를 주면된다. 다시 말하면 界磁抵抗을 交流側으로 환산하여 R이라 하면 電壓 \dot{E}_T 에서 공급되는 界磁電流 \dot{I}_{RE} 는

$$\dot{I}_{RE} = \dot{E}_T \cdot \frac{X_2}{X_1 + X_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{R^2 + X_2^2}} \angle \theta_1 \dots \dots \dots (1)$$

$$\angle \theta_1 = -\tan^{-1} \frac{X}{R} \quad X = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2}$$

가 된다. (부호의 정의는 그림 3과 그림 4에 의함)

可飽和變流器를 通하여 界磁回路에 공급되는 電流 \dot{I}_{R1} 은

$$\dot{I}_{R1} = \alpha \dot{I}_L \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \angle \theta_2, \quad \angle \theta_2 = \tan^{-1} \frac{R}{X} \dots \dots \dots (2)$$

上記 (1) (2)式과 그림 4에서

$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{\pi}{2}, \quad \gamma = \frac{\pi}{2} - \theta_1, \quad \theta_3 = -(\phi - \theta_2) = \theta_1 + \frac{\pi}{2} - \phi$$

그리고 \dot{I}_{RE} 가 \dot{I}_{R1} 보다 Lag하고 있으면

$$\beta = -(\theta_1 - \theta_3) = -\frac{\pi}{2} - \phi$$

따라서 $\beta = \gamma$ 가 됨을 알 수 있다.

可飽和變流器의 變流比 α 및 $X_1 X_2$ 를 적당히 선택하면 ΔOAB 와 ΔOCD 는 相似形이 되므로 變流比 $\dot{I}_{R1}/\dot{I}_{RE}$ 는

$$\frac{\dot{I}_{R1}}{\dot{I}_{RE}} = \frac{X_s \dot{I}_L}{\dot{E}_T} \text{가 된다.}$$

이 결과 交流측 환산의 界磁電流 $\dot{I}_R = (\dot{I}_{R1} + \dot{I}_{RE})$ 는

어떠한 端子電壓 E_T 를 얻는데 필요한 발전기 界磁電流가 된다.

4. 補正回路

前述한 바와 같이 直線리액터와 可飽和變流器로서 발전기의 고유의 電壓降下の 태반을 補償할수 있지만 온도에 의한 界磁卷線抵抗의 變化 교류발전기에 直結된 原動機의 회전수의 變化 磁氣回路의 磁氣飽和 등의 영향이 발전기 端子電壓을 변화시키는 원인이 되며 電壓變動率을 더욱 적게 하기 위해서는 補正回路를 附加할 필요가 있다.

補正回路는

發電機 端子電壓 → 檢出用 P.T. → 自動電壓調整裝置 → 金屬整流器 (Rect 1) → 可飽和變流器 (Sat. C.T.) → 金屬整流器 (Rect 2) → 發電機 界磁로 回路가 구성된다.

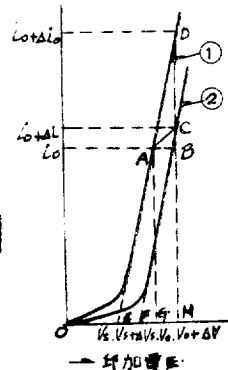


그림 5. 電壓檢出用飽和 리액터 特殊曲線

電壓檢出用 飽和리액터의 特性은 그림 5의 曲線과 같이 된다. 즉 整定電壓에 상응하는 電壓 V_0 에 대하여 電壓變動 ΔV 가 되면 制御電流 i_0 는 $i_0 = (i_0 + \Delta i_0)$ 가 되어 대폭 變化한다. 發電機 驅動用 原動機가

디젤엔진과 같은 경우는 電壓變動과 周波數變動은 동시에 일어나므로 실제의 制御電流는 $(i_0 + \Delta i_0)$ 보다 적어진다. 즉 변동후의 電壓 $(V + \Delta V)$ 에 있어서 曲線 ①은 주파수변동의 영향에 의하여 曲線 ②로 이행하는 것으로 생각된다. 그림 5에 있어서 A點에서의 切線과 纈축과의 交點을 E, C點에서의 切線과 纈축과의 交點을 F라고 하고 $OE = V_s, OF = V_s + \Delta V_s$ 라 하면

$$BC = K_f \{ (V_0 + \Delta V) - (V_s + \Delta V_s) \} - K_f (V_0 - V_s) \dots (4)$$

$$K = \frac{BC}{AB} = \left(1 - \frac{V_s}{\Delta V_0} \right) K_f$$

(4) K_f ; A點에 있어서의 飽和리액터의 利得 K_f 電壓變動과 周波數變動을 고려한 飽和리액터의 利得

(4)式에서 알수있듯이 驅動用原動機의 速度變動率이 큰 경우는 電壓檢出用飽和리액터로서는 충분한 주파수補償을 할수 없게 된다.

電流 \dot{I}_R 의 크기는 (1)(2)式 및 그림 4에서 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{I}_R^2 = \frac{X_2^2}{R(X_1 + X_2)^2 + X_1^2 X_2^2} (E_T^2 + \alpha^2 I_L^2 X_1^2 + 2 \cdot \alpha \cdot I_L \cdot E_T \cdot X_1 \sin \phi) \dots \dots \dots (5)$$

(5)式에서 X_2 에 의하여 電流 \dot{I}_R 의 크기가 變化하는

것을 알 수 있으며 可飽和變流器에는 制御卷線을 두어 여기에 直流電流을 흘려 鐵心의 飽和를 變化시켜 주면 可飽和變流器 二次리액턴스 X_2 가 變한다. X_2 에 대한 電流의 變化量 K_{SCR} 는 다음과 같이 된다.

(3)式 및 그림 4에서 (5)式은

$$I_R^2 = \frac{X_2^2}{R^2(X_1 + X_2)^2 + X_1^2 X_2^2} E_1^2 \dots\dots\dots (6)$$

따라서 $X_2 = \frac{RX_1}{\sqrt{\left(\frac{E_1}{I_R}\right)^2 - X_1^2} - R} \dots\dots\dots (7)$

(6)式에서 $K_{SCR} = \frac{\partial I_R}{\partial X_2} = \left(\frac{R}{X_2^2}\right) \left(1 + \frac{X_1}{X_2}\right) X_1 \cdot I_R^2 \dots\dots (8)$

(8)式에 (7)式을 代入하면

$$K_{SCR} = \frac{I_R^3}{E_1^2 X_1 \cdot R} \sqrt{\left(\frac{E_1}{I_R}\right)^2 - X_1^2} \left\{ \left(\frac{E_1}{I_R}\right)^2 - X_1^2 + R^2 - 2R\sqrt{\left(\frac{E_1}{I_R}\right)^2 - X_1^2} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

(9)式에서 變化量 K_{SCR} 는 直線리액터의 리액턴스 X_1 의 선택에 의하여 一方의 으로 결정되며 이 X_1 은 補正回路系의 利得에 영향을 준다. (1)(2)(3)式에서 變流比는 $\alpha = X_S / X_1$ 이 되므로 설계제작에 있어 요구되는 補正回路系의 利得이 정해지면 (7)(9)式에서 X_1, R_3 의 값을 정할 수 있다.

5. 自動磁式 交流發電機의 特性

그림 4의 설명에서 $\triangle OAB$ 를 發電機의 벡터圖로 표시했으나 일반적으로 凸極發電機의 벡터圖는 실제로 그림 6의 點線으로 표시한 바와 같이 發電機의 벡터圖와 상이하고 勵磁電流에 다소의 變化를 일으킨다. 즉 역률 ϕ 의 全負荷에서 發電機電壓을 定格値로 유지하기 위해서는 $OB=OB'$ 가 되도록 勵磁電流를 調整하면 그의 力率에서는 勵磁電流는 일치하지 않게 된다. 즉 力率 100%, 0% 間의 勵磁電流에 依한 誘起電壓은 실제로는 $C'-B'-D'$ 가 되므로 力率 100%에서는 $AC > AC'$ 가

되고 力率 0%에서는 $AD < AD'$ 가 된다. 즉 負荷力率에 의해 端子電壓에 變動을 주게 된다. 그러므로 負荷力率에 상관없이 發電機誘起電壓의 軌跡이 $C-B-D$ 에 가까운 軌跡의 非凸極교류발전기가 되면 整定후의 電壓變動率은 더욱 작게 된다.

6. 電壓의 自己確立

發電機의 운전초기의 電壓發生은 直流機와 같이 발전기 磁氣回路의 殘留磁氣에 依한다. 이것에 의하여 발전기 端子에 誘起되는 殘留電壓은 定格回轉數에 있어서 定格電壓의 4~7%이다. 電壓의 自己確立이 가능하기 위하여는 이 殘留電壓이 金屬整流器의 內部壓降復下보다 커야 한다. 即 整流器直列個數를 S 라하면 全波整流의 경우

$$2S V_i < V_R \dots\dots\dots (10)$$

V_i ; 整流器 1個의 內部電壓降下

V_R ; 殘留電壓

殘留磁氣의 大小는 비교적 履歷特性이 현저한 磁極 및 繼鐵의 材質에 의하여 결정된다. 따라서 殘留電壓은 固定子, 回轉子의 Gap의 크기에 反比例한다. 또 발전기에 短絡事故가 생겼을 때는 殘留磁氣를 감소시키므로 電壓의 電氣確立이 곤란할 때가 있다. 이와같은 경우는 Battery로서 始初에 Flashing을 해주면 된다. 殘留電壓에 의하여 定格電壓까지 電壓이 상승하는 과정은 그림 3의 等價回路 및 式 (1)에서 알 수 있는 바와같이 殘留電壓에 의하여 약간의 I_R 가 흘러 Field를 세게 하면 발전기 전압 E_1 이 증가된다. E_T 가 낮을 때에는 전류는 흐르지 않지만 E_T 가 상승하여 電壓檢出用飽和리액터의 飽和點에 도달하면 可飽和 CT의 制御卷線에 制御電流가 흐르게 되고 電壓의 上昇에 따라서 可飽和 CT의 리액턴스 X_2 가 감소함으로 X_2 에 흐르는 電流가 많아져 勵磁를 약하게 한다. 그림 7과 같이 처음에는 界磁回路의 特性曲線 OR' 에 의하여 電壓이 상승하지만 X_2 의 감소에 따라서 OR 로 이동하고 포화곡선의 交點에서 電壓은 확립한다. 이때 電壓確立의 時間은 발전기의 開路界磁時定數에 의해 달라진다.

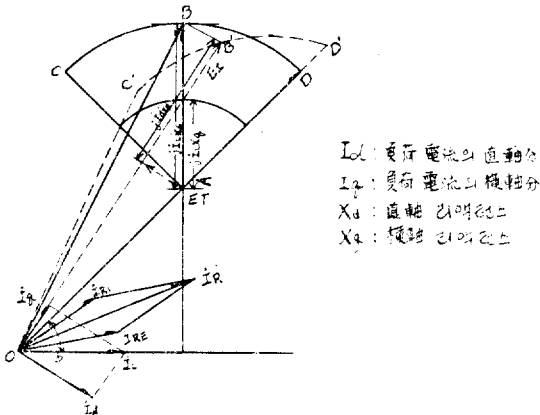


그림 6. 凸極發電機의 벡터圖

7. 自動磁 發電機의 實例

過般 利川電機에서 製作한 自動磁 交流發電機의 一例에 대하여 다음에 記述한다.

發電機仕様

定格容量	75KVA
定格電壓	220V

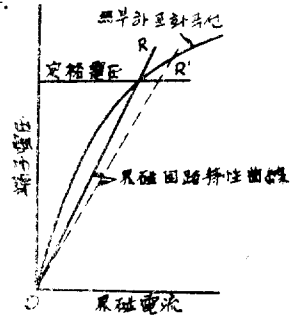


그림 7. 界磁回路特性曲線

周波數 60c/s
 回轉數 1800 r.p.m.
 力率 80%
 相數 3相
 驅動原動機 디젤엔진 100Hp
 韓國機械製 DL-6M
 勵磁方式 自勵磁 可飽和變流器

方式 磁氣增幅器式
 AVR 付

接續圖는 그림 2와 같으며 回路의 내용에 대하여는 前
 述한 바와 같다. 그림 8은 디젤엔진에 直結된 이 發電
 機의 外形치수를 나타내고 勵磁機函은 發電機本體의 上
 部에 位置하여 全體가 한 Unit로 Portable 하지 되어있
 다. 發電機 本體의 特性은 그림 9와 같다.

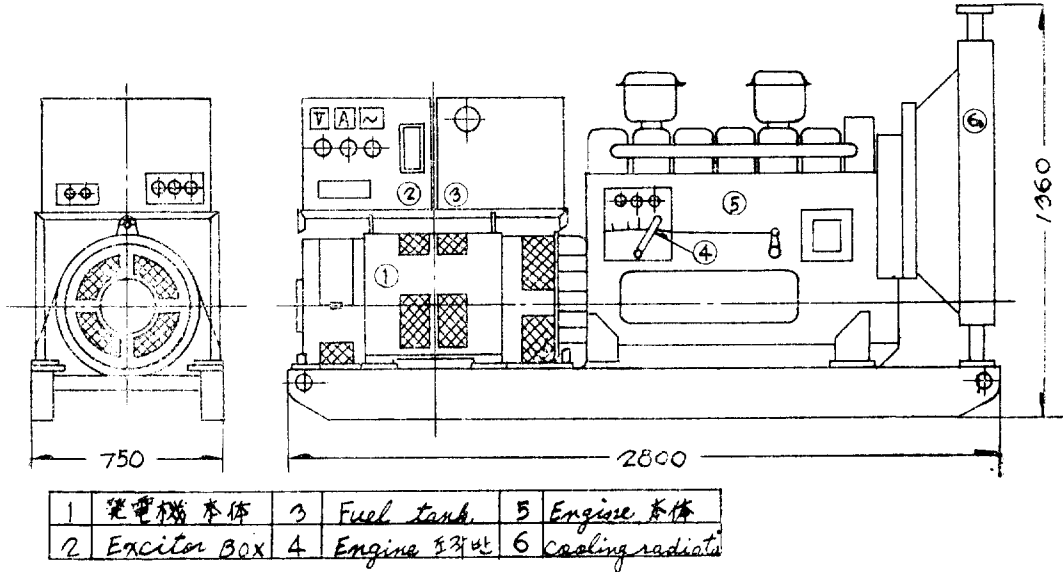


그림 8. 75KVA-4 P 디젤엔진 발전기 外形圖

7-1 整定電壓變動率

그림 10은 原動機의 速度變動率을 3.5%로 가정하였
 을때 力率 80%에서 無負荷와 全負荷間의 電壓變動率을
 表示한 것이며 이는 直線리액터의 X_1 및 可飽和 CT의
 X_2 를 변화함으로(各各에 數個의 Tap가 나와 있음) 過
 複卷으로도 할수 있다.

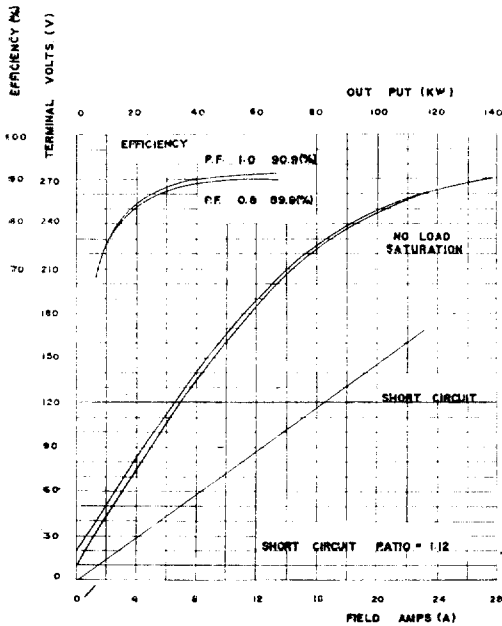


그림 9. 75KVA-4 P 교류발전기의 특성

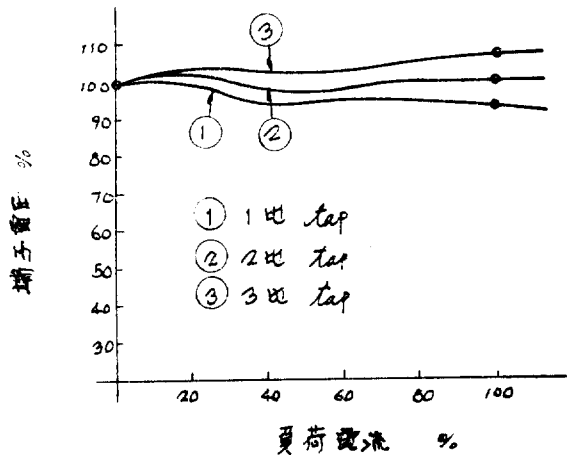


그림 10. 整定電壓變動率 75KVA-49

7-2 全負荷遮斷 및 投入

그림 11은 力率 100%의 全負荷遮斷 및 投入時의 Oscillograph의 一例를 표시한다. 이 그림에서 發電機 電壓은 數 Cycle에서 回復함을 알수있다.

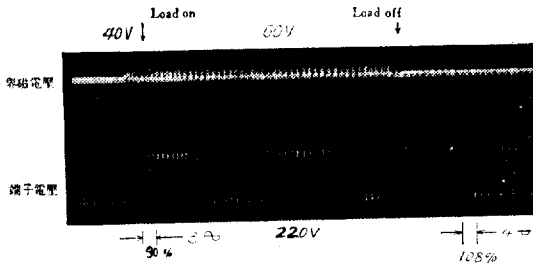


그림 11. 力率 100% 全負荷投入 및 遮斷時의 oscillograph

8. 結 論

以上 自動磁 交流發電機의 原理 構造動作特性에 대하여 略述하였으며 近來 國內에 導入되는 各種 디젤엔진

발전기는 모두가 自動磁임을 감안할때 負荷變更時의 制御特性의 優秀性外에 그 經濟性的 有利함이 原因인것 같다. 그리고 自動磁方式의 難點인 低電壓 또는 低勵磁 운전의 특수한 경우를 피할수 있는 용도라면 운전보수의 용이성과 아울러 충분한 信賴性을 가지고 船舶用 또는 非常電源用 交流發電機로서 널리 사용될 것이다.

특히 並列運轉 또는 電力線에 連結되지 아니하는 單獨機로서 運轉되는 경우라면 구배어 AVR 또는 可能和 CT 等 高級인 方式을 擇하지 않고 단순한 直線리액터와 變流器만 가지고도 만족할만한 特性을 낼수 있으며 內燃機關自體의 速度變動率을 考慮하여 使用目的에 가장 適合한 方式을 選定함이 현명하다.

參 考 文 獻

- (1) 吳炳仁: 發電機에 있어서 Brushless 勵磁式의 問題點, 電氣學會誌, Vol 17. No.2 1968
- (2) Enrico Levi: Optimizing the performance of Synchro Generator, IEEE Jun. 1967.
- (3) W. Merhof: Brushless A.C. Generator, Brown Boveri, Review Sep. 1967.
- (4) M. Itoh: Characteristics of Self-Excited A.C. Generator, Meidensha Review, Nov. 1960