船舶에 있어서의 內燃機關驅動發電機의 速度安定度에 關한 硏究

논 문
24~4~1

河 注 植*·盧 彰 注**
(Jooshik Ha) (Changjoo No)

Abstract

The speed characteristics of the diesel engines driving alternators are very important because it is directly concerned to the quality of electric power especially when electric power is supplied by a single alternator.

In this paper, the speed characteristics of the diesel engine, equipped with a centrifugal mechanical governor, driving an alternator is dealt when load changes stepwise.

The all coefficients included in the block diagram of the speed control system are estimated by actual experiments and the effects of gain change of the governor in the speed characteristics are examined theoretically and experimentally.

The obtained result seems to be satisfactory and very useful for the improvement of quality of electric power supplied by a single alternator driven by the diesel engine especially for electric power system of ships.

1. 序 論

디이젤 發電裝置는 單機로 大容量을 얻기는 困難하나 取扱이 容易하고 콤팩트 型으로 容積當出力이 커서 船舶用發電機나 自家用發電機처럼 小單位 電力發生用으로 널리 利用되고 있다. 그러나, 이 裝置에서는 船舶用發電機에서와 같이 他電力系統과 聯繫하지 않고 單獨으로 電力을 供給하는 境遇에는 그 速度制御特性이 크게 問題가 되고 있다. 즉 現在 使用되고 있는 디이젤發電裝置는 速度特性이 不良하여, 負荷變動에 따르는 速度變動이 甚할 뿐더러 速度의 off-set(殘留偏差)가 커서 良質의 電力을 얻기 困難하고 電氣機器의 故障率도 增大한다. 이에 對한 對策으로 船舶에서는 船舶建造當時 需用負荷의 2倍以上되는 큰 容量의 發電裝置를 設置하고 있는 實情[1]이며 이는 船舶의 經濟性을 크게 低下시키고 있다. 이 裝置의 原動機인 디이젤機關의 速度特性을 考察한 硏究로서 아나로구電子計算機에 依한 시뮤레숀을 通한 硏究, 機關에서 分離된 調速機만에 對한 硏究等의 結果는 지금까지 많이 發表되고[6)-11)] 있다.

筆者는 本硏究에서 디이젤 發電裝置의 速度制御系統에 對하여 그 特性을 理論的으로 解析하고 그 한 例로서 韓國海洋大學에서 自家用發電機로 稼動中에 있는 디이젤 發電裝置를 實驗用으로 選定하여 그 速度特性을 具體的으로 考察하는데 必要한 諸定數値를 實驗을 通하여 測定하는 方法을 提示함과 同時에 負荷實驗을 通하여 理論的解析結果의 妥當性을 檢討하였으며 諸定數中 速度制御系統에서 中樞的인 役割을 하는 調速機의 게인(gain)이 速度制御特性 및 安定性에 미치는 影響을 考察하였다.

本 硏究는 船舶用 디이젤發電裝置의 速度特性에 關한 全般的인 硏究를 行하고, 이의 特性을 改良하기 위한 第一段階의 硏究로서 窮極的으로는 舶用디이젤發電裝置의 速度制御特性을 改良하여 高價한 舶用電子電氣機器의 壽命을 延長시키고 船舶의 經濟性을 向上시키는데에 그 目的이 있다.

2. 理 論

2.1. 디이젤發電裝置의 速度制御系統의 블록線圖

디이젤發電裝置의 速度制御系統에 對해서 그 非線形性을 無視하고 便宜上 調速機, 機關 및 回轉系統의 3部分으로 區分하여 [2),3),5),6)]블록線圖로서 表示하면 近似的으로 그림 1과 같이 된다. 本論文에서 發電裝置, 機關, 回轉系統을 各各 다음과 같이 定義하기로 한다

發電裝置 : 디이젤機關과 發電機가 直結되어 發電할 수 있도록 된 全 裝置를 가르킴.

*正會員·韓國海洋大學副敎授(工博)
**正會員·韓國海洋大學副敎授

機關：機關中에서 調速機및 軸系를 除外하고 燃料燃燒에 依해서 回轉力을 發生하는 部分만을 가르킴.

回轉系統：發電裝置中 全 回轉部分을 가르키고 機關의 크랭크軸, 發電機의 回轉子, 그리고 이것과 聯動되는 往復運動部分中 回轉系統으로 換算된 部分도 包含된다.

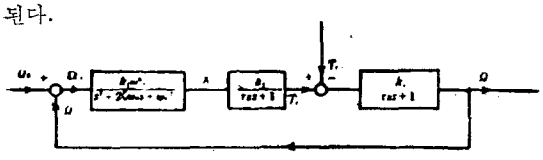


그림 1. 디이젤發電裝置의 速度制御系統의 블록線圖

Fig. 1. The block diargram of speed control system of the diesel power generating-set.

그림 1에서 各記號의 意味는 다음과 같다.

ω : 發電裝置의 角速度

$\Omega(s)$: ω의 s函數

$\Omega_R(s)$: ω의 設定値의 s函數

$\Omega_e(s)$: 角速度의 設定値와 制御値와의 差의 s函數

x : 燃料 펌프의 랙크(rack)

$X(s)$: 랙크變位의 s函數

m : 調速機內 可動部分의 等價質量으로서 랙크 本體와 이것과 聯動되는 모든 部分이 包含 됨

k_s : 調速機內에 들어있는 速度設定用 용수철係數

ω_n : 調速機의 랙크可動部分의 固有角周波數 $\left(\omega_n=\sqrt{\frac{k_s}{m}}\right)$[6]

C : 랙크可動部分의 粘性마찰抵抗係數

ζ : 調速機의 랙크可動部分의 減衰率 $\left(\frac{C}{2\sqrt{k_s m}}\right)$

k_1 : 調速機의 게인 $\left(\frac{\Delta x}{\Delta\omega_e}\right)$

τ_e : 機關의 有效回轉力

$T_e(s)$: τ_e의 s函數

$T_r(s)$: 負荷回轉力의 s函數

k_2 : 機關의 게이 $\left(\frac{\Delta\tau_e}{\Delta x}\right)$

k : 回轉系統의 角粘性마찰抵抗모우멘트係數

τ_R : 回轉系統의 時定數

J : 回轉系統의 慣性모우멘트

τ_E : 機關의 時定數

k_3 : 回轉系統의 게인 $(1/k)$

그림·1에서 랙크變位 를 入力으로하여 回轉力 τ_e를 發電하는 部分 즉 機關을 一次늦음系 $\frac{k_2}{\tau_E s+1}$로 近似시켰다. 機關에 있어서는 랙크變位가 있은 후 1~2回轉한 후에(4cycle機關에서는 2回轉, 2cycle機關에서는 1回轉) 랙크의 變位에 該當하는 回轉力이 發生하므로 時間늦음이 存在한다. 이것을 近似的으로 表示하는 것이 τ_E이다. 그러나 實際에 있어서 τ_E는 回轉系統의 時定數 τ_R에 比하여 極히 짧으므로 無視할 수 있다. 이 境遇에 그림·1의 블록線圖로 부터 $\Omega(s)$는 (1)式과 같이 된다.

$$\Omega(s)=\frac{G_0}{1+G_0}\Omega_R(s)-\frac{G_R}{1+G_0}T_r(s) \quad \cdots\cdots(1)$$

但 $$G_0=\frac{4\omega_n^2 k_1 k_2 k_3/\tau_R}{(s_2+2\zeta\omega_n+\omega_n^2)(1+1/\tau_R)} \quad \cdots(2)$$

$$G_R=\frac{k_3/\tau_R}{s+1/\tau_R} \quad \cdots\cdots(3)$$

2. 디이젤發電裝置의 速度應答特性

디이젤發電裝置의 速度制御系統은 定値制御系統이므로 一般的으로 速度의 設定値 $\Omega_R(s)$는 固定되어 있다. 따라서 以下 本論文에서는 $\Omega_R(s)=0$으로 놓고 負荷變動에 依한 $\Omega(s)$의 變化에 對하여 考察하기로 한다. 이때에 x, τ_e, ω, ω_e등의 모든 變數 및 이들의 s函數는 平衡値로 부터 빗나간 量을 나타내게 된다. 이 境遇에 速度制御系統의 特性方程式은 (4)式과 같이 된다

$$s^3+(1/\tau_R+2\zeta\omega_n)s^2+(\omega_n^2+2\zeta\omega_n/\tau_R)s+K \quad \cdots\cdots(4)$$

但 $$K=\omega_n^2 k_1 k_2 k_3/\tau_R \quad \cdots\cdots(5)$$

디이젤發電裝置의 速度制御系統에 있어서 速度의 過渡應答, 定常應答 및 安定性等은 (4)式의 特性根에 依하여 決定되므로 이 根들을 s_1, s_2, s_3라 하고 이들을 求해 보면 다음과 같다.

$$s_1=-\sigma_1,\quad s_2=-\sigma_2-j\omega_0,\quad s_3=-\sigma_2+j\omega_0 \quad \cdots\cdots(6)$$

但 $$\sigma_1=\frac{1}{3}\left(\frac{1}{\tau_R}+2\zeta\omega_n+\sqrt[3]{\frac{\sqrt{B^2+4A^3}+B}{2}}-\sqrt[3]{\frac{\sqrt{B^2+4A^3}-B}{2}}\right) \quad \cdots\cdots(7)$$

$$A=\frac{1}{3}\left\{-\frac{1}{3}\left(\frac{1}{\tau_R}+2\zeta\omega_n\right)^2+\omega_n^2+2\zeta\omega_n/\tau_R\right\} \quad \cdots\cdots(8)$$

$$B=\frac{2}{27}\left(\frac{1}{\tau_R}+2\zeta\omega_n\right)^3-\frac{1}{3}\left(\frac{1}{\tau_R}+2\zeta\omega_n\right)(\omega_n^2+2\zeta\omega_n/\tau_R)+\omega_n^2 k_1 k_2 k_3/\tau_R+\omega_n^2/\tau_R \quad \cdots\cdots(9)$$

$$\sigma_2=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tau_R}+2\zeta\omega_n-\sigma_1\right) \quad \cdots\cdots(10)$$

$$\omega_0=\frac{1}{2}\sqrt{4[\omega_n^2+2\zeta\omega_n/\tau_R-\sigma_1(1/\tau_R+2\zeta\omega_n-\sigma_1)-\left(\frac{1}{\tau_R}+2\zeta\omega_n-\sigma_1\right)^2} \quad \cdots\cdots(11)$$

(1) 過渡應答特性

筆者가 다루는 範圍는 減衰振動의 경우로서 定常運轉狀態에서 運轉中 負荷를 階段狀으로 除去하였을 때 즉 $T_r(s)=-\frac{1}{s}$인 경우를 생각한다. 이때 $\Omega(s)$는

$$\Omega(s)=\frac{k_3/\tau_R(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2)}{s(s+\sigma_1)(s+\sigma_2+j\omega_0)(s+\sigma_2-j\omega_0)} \quad (12)$$

$$=\frac{C_0}{s}+\frac{C_1}{s+\sigma_2}+\frac{C_2}{s+\sigma_2+j\omega_0}+\frac{C_3}{s+\sigma_2-j\omega_0} \quad \cdots\cdots(13)$$

따라서, 速度의 過渡應答 $\omega(t)$은 (14)式과 같이 된다.

$$\omega^{(t)}=C_0+C_1e^{-\sigma_1 t}+2|C_2|e^{-\sigma_2 t}\cos(\omega_0 t+\phi) \quad \cdots\cdots(14)$$

但 $$C_0=\frac{k_3/\tau_R}{k_1k_2k_3/\tau_R+1/\tau_R}=\frac{k_3}{k_1k_2k_3+1} \quad \cdots\cdots(15)$$

$$C_1=-\frac{k_3/\tau_R(\sigma_1^2-2\zeta\omega_n\sigma_1+\omega_n^2)}{\sigma_1[(\sigma_2-\sigma_1)^2+\omega_0^2]} \quad \cdots\cdots(16)$$

$$C_2=\frac{k_3/\tau_R[2\sigma_2\omega_0-2\zeta\omega_n\omega_0-j\underline{(\sigma_2^2+\omega_n^2-\omega_0^2-2\zeta\omega_n\sigma_2)}]}{2\omega_a(\sigma_2+j\omega_0)(\sigma_1-\sigma_2-j\omega_0)} \quad \cdots\cdots(17)$$

$$C_3=\frac{k_3/\tau_R[2\sigma_2\omega_0-2\zeta\omega_n\omega_0+j\underline{(\sigma_2^2+\omega_n^2-\omega_0^2-2\zeta\omega_n\sigma_2)}]}{2\omega_0(\sigma_2-j\omega_0)(\sigma_1-\sigma_2+j\omega_0)} \quad \cdots\cdots(18)$$

$$\phi=\tan^{-1}\frac{\sigma_2^2\omega_n^2-\omega_0^2-2\zeta\omega_n\sigma_2}{2\sigma_2\omega_0-2\zeta\omega_n\omega_0}+\tan^{-1}\frac{\omega_0}{\sigma_2}-\tan^{-1}\frac{\omega_0}{\sigma_1-\sigma_2} \quad \cdots\cdots(19)$$

(14)式에서는 C_0는 速度의 off-set로서 이에 對하여서는 다음 節에서 論하기로 한다. (14)式의 둘째항은 指數減衰函數 ($\sigma_1>0$)이고 σ_1의 크기에 影響을 주는 因數는 (7), (8), (9)式에서 檢討할 수 있다. (14)式의 세째항에 있어서 $\sigma_2>0$일 때는 減衰振動이 되겠지만 σ_1이 $1/\tau_R+2\zeta\omega_n$보다 커지면 σ_2는 負가 되어 速度制御系統은 發散한다. 그러나 實際에 있어서는 마찰抵抗이 非線形性이기 때문에 振幅이 無限히 커질 수 없고 一定振幅의 持續振動을 하게 된다.

(2) 定常應答特性

階段狀 負荷가 除去된 후 最終的으로 남는 速度의 off-set를 最終値定理에 依하여 求해 보면 (20)式과 같이 된다.

$$\lim_{t\to\infty}\omega_{(t)}=\lim_{s\to 0}s\cdot\Omega^{(s)}=\frac{G_R}{1+G_0}\Big|_{s=0}=\frac{k_3}{k_1k_2k_3+1}=\frac{1}{k_1k_2+k} \quad \cdots\cdots(20)$$

즉 off-set는 (14)式의 C_0와 같이 된다. off-set의 크기는 調速機의 게인(k_1), 機關의 게인 (k_2)및 角粘性마찰抵抗모우멘트 (k)가 커지면 적어지나 k는 그 값이 적어서 큰 影響을 미치지 않는다.

(3) 速度安定性

本制御系統의 루우프傳達函數는 3個의 根을 가지는데 그중 2個는 調速機에 依하여 定해 지고 나머지 하나는 發電裝置의 回轉系統의 時定數에 따라 定해진다 σ_1, σ_2를 (7)~(10)式에서 考察해 보면 루우프게인이 一定한 때는 $1/\tau_R$, $2\zeta\omega_n$가 커 짐에 따라 增加하겠지만 루우프게인이 커지면 σ_1은 커지고 σ_2는 적어지며 $\sigma_2=0$ 즉 $\sigma_1=1/\tau_R+2\zeta\omega_n$以上으로 루우프게인이 커지면 發散振動이 일어난다. 즉 $\sigma_1=1/\tau_R+2\zeta\omega_n$되는 點이 安定限界點 이다. 調速機의 特性이 달라지면, 즉 랙크의 可動部分의 抵抗이 커지고 强한 용수철을 使用할수록 j軸과는 멀리 負의 實軸과는 가깝게 極이 位置하게 되며 헌팅이 發生할 臨界루우프게인은 커진다. Hurwitz의 條件을 利用하여 (4)式으로 부터 이 系統의 安定條件을 求해 보면 다음式과 같이 된다.

$$(1/\tau_R+2\zeta\omega_n)(\omega_n^2+2\zeta\omega_n/\tau_R)>K>0 \quad \cdots\cdots(21)$$

具體的인 實例는 다음 節에서 實驗發電裝置를 例로 해서 論하기로 한다.

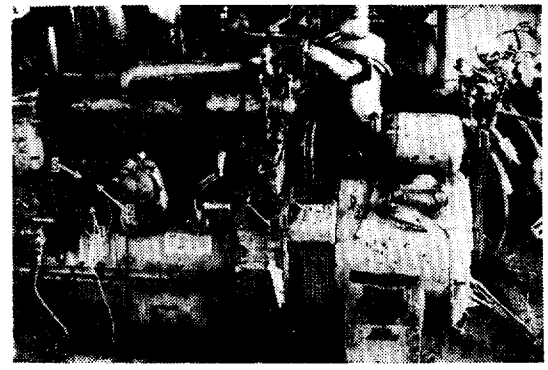
3. 實　　驗

3.1 實驗裝置 및 實驗方法

以上의 理論解析을 뒷바침하기 위하여 表·1과 같은 諸元을 갖는 發電裝置를 實驗發電裝置로 選定하여 이 發電裝置에 對하여 그림·1에 表示된 調速機의 各定數 機關의 게인 및 回轉系統의 各 定數들의 값을 運轉狀態와 同一한 條件下에서 推定한 다음 負荷實驗을 行하기로 한다.

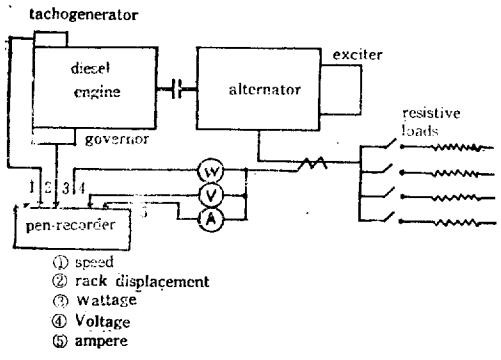
表·1 實驗디이젤發電裝置의 諸元
Table·1 Specification of experimental diesel power generating-set.

機　關	4氣筒, 1,200rpm, 4사이클 45HP, Caterpillar D—135.
交流發電機	3相, 6極, 線間電壓 440V, 容量 33.8KVA, GE.



그림·2 實驗디이젤發電裝置
Fig·2 Experimental diesel power generating-set.

그림·2는 實驗에 使用된 디이젤 發電裝置의 寫眞이며 그림·3은 實驗裝置의 系統圖로서 이 實驗에서 發電裝置의 回轉速度, 負荷의 크기(電力), 랙크의 變位는 다음과 같은 方法으로 測定하였다.



그림·3 實驗裝置의 說明圖
Fig·3 Experimental apparatus.

回轉速度：本發電裝置에 蓄電池充電用으로 附着된 小型分捲發電機를 他勵磁發電機로 結線을 바꿔 他直流電源 (12V)에서 勵磁시켜 回轉速度에 比例하는 電壓을 얻어 펜레코오우터를 利用하여 記錄할 수 있도록 하였다.

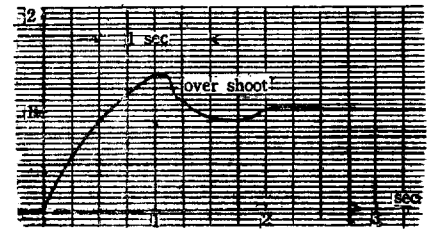
負荷의 크기：負荷는 니크롬線으로 架空電線처럼 매달고 4段으로 나이프스위치로서 投入혹은 遮斷할 수 있도록 하였고 電壓과 電流는 指示計器에 指示되도록 하였을 뿐만 아니라 어댑터를 거쳐 펜레코우더에 記錄할 수 있도록 하였다.

랙크의 變位：本實驗디이젤裝置에는 랙크變位測定裝置가 없기 때문에 랙크와 聯動하는 回轉암의 位置에 따라 電壓이 變하도록 하여 이 電壓을 펜레코우더에 記錄되도록 하였다. 그림·2에서 ①은 回轉암과 接觸되도록 만든 低抗線, ③은 回轉암의 中心이고 랙크는 ②의 內部에서 움직인다.

3.2 發電裝置의 各 定數測定

(1) 調速機의 ζ및 ω_n의 測定[6-7]

調速機의 ζ및 ω_n는 實驗的으로 推定하는 데는 여러가지 方法이 있으나 여기서는 簡單한 方法으로서 調速機의 인디셜應答(indicial response)을 測定하여 이 波形으로 부터 ζ및 ω_n의 값을 推定하기로 한다. 그러나 調速機의 인디셜應答을 測定하기 위하여 角速度 ω를 階段狀으로 變化시킨다는 것은 實際的으로 不可能하며 調速機를 發電裝置로 부터 分離시켜 實驗할 수도 없다. 따라서 本實驗에서는 다음과 같이 測定하였다. 實驗디이젤發電裝置를 他 電源과 並列運轉을 시킨 다음 實驗디이젤發電裝置에 供給되는 燃料를 徐徐히 遮斷하면 發電機는 同期電動機로 바뀌진다. 이 狀態는 運轉과 同一條件에서 調速機를 分離시켜 外部에서 定格速度로 回轉시켜 주는 것과 같다. 랙크를 人爲的으로 당기면 調速機內 聯動되는 全 機構는 人爲的으로 移動된 狀態에 놓이고 ω가 階段狀으로 變化된 것과 同一한 結果가 되므로 랙크를 人爲的으로 당겼다가 急히 놓아주면 랙크가 定格速度(1200 rpm)에 該當하는 位置로 되돌아가게 된다. 이 때의 랙크의 應答을 記錄하면 이것이 바로 調速機의 인디셜應答이다. 그림·4는 이와 같이 하여 記錄된 랙크의 變位 x의 波形이다.



그림·4 階段狀의 入力에 대한 調速機의 過渡應答
Fig.4 Transient indicial response of governor to step input.

그림·4의 應答波形은 二次늦음系統의 인디셜應答曲線과는 약간 差異가 있다. 이는 랙크의 可動部分에 僅少하게 存在하는 乾性마찰抵抗과 lost motion等의 非線形性에 起因한 것으로 생각된다. 여기서는 그림·4의 波形을 2次늦음系統의 인디셜應答으로 보고 이의 오우버슈트와 振動周期로 부터 ζ와 ω_n의 값을 求하기로 한다. 오우버슈트를 θ_m, 振動周期를 T_g라 하면 이들은 (22), (23)式으로 表示된다[15)19)].

$$\theta_m = \exp -(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2})\pi \quad \cdots\cdots(22)$$

$$T_g = \frac{2\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \quad \cdots\cdots(23)$$

그림·4의 波形으로 부터 $\theta_m = 0.21$ $T_g = 1.25$sec.이므로 ζ와 ω_n는 다음과 같이 된다.

$\zeta = 0.45$

$\omega_n = 5.62$ [rad/sec]

(2) 調速機의 게인(k_1)測定

前項의 實驗中 同期電動機로 바뀌진 狀態로서 外部電源의 周波數를 變化시켜 주어(本 實驗에서는 並列運轉하는 他 發電裝置의 回轉速度를 바꿔주었음) 實驗디이젤發電裝置의 回轉速度는 變化되고 이에 따라 랙크變位 x도 變化한다. 表·2는 回轉數變化에 對한 x의 變化量의 測定値를 表示한다.

表·2로 부터 調速機의 게인 (k_1)을 求하면 다음과 같이 된다.

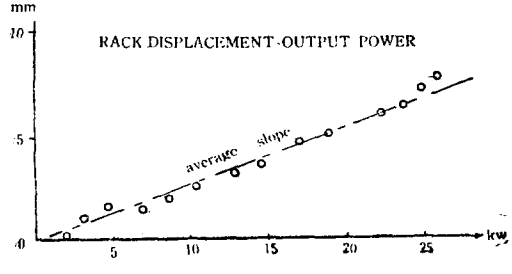
表·2 角速度에 對한 랙크變位의 比
Table.2 Rack displacement vs angular velocity variation.

rpm	1,125	1,150	1,200	1,250	1,270
ω rad/sec.	117.81	120.43	40π	130.90	132.99
rack displacement mm	−3.48	−2.32	0	2.31	3.22

$$k_1 \fallingdotseq \left(\frac{\Delta x}{\Delta \omega}\right)_{mean} = 0.44 [\text{mmsec/rad}]$$

(3) 機關의 게인(k_2)測定

실린더內 가스壓力狀態와 크랭크와 콘넷팅롯트의 相對位置에 따라 瞬時回轉力은 變하겠지만 燃料噴射量以外 다른 條件이 不變이라 하면 平均回轉力은 랙크變位 x의 函數이고 $\left.\frac{\Delta \tau_e}{\Delta x}\right|_{x=0}$ 가 動作點 近傍의 機關게인이 된다. 發電裝置를 rpm 1200으로 維持하면서 負荷를 增加시킴에 따라 랙크의 變位를 記錄한 것이 그림·5이다.



그림·5 랙크變位에 對한 出力
Fgi·5 The ratio of output power to rack displacement.

그림·5에서 平均기울기를 求하면 3.2kW/mm가 되고 이것으로 부터 機關의 게인(k_2)의 값을 計算하면 다음과 같이 된다.

$$k_2 = 3.2 \times \frac{1,000 \times 60}{2\pi \times 1,200} = 25.45 [\text{N} \cdot \text{m/mm}]$$

(4) 角粘性摩擦抵抗모우멘트係數(k)의 測定

發電裝置가 一定角速度 ω_m으로 回轉하고 있을 때, 回轉力에는 (24)式과 같은 平衡式이 成立된다.

$$\tau_0 = M_m + \frac{P_m}{\omega_m} \quad \cdots\cdots (24)$$

여기에서

τ_0; 機關에서 發生하는 總回轉力

M_m; 角速度 ω_m일 때 發電裝置 全體에서 作用하는 摩擦抵抗모우멘트

P_m; 角速度 ω_m일 때의 出力(電力)

랙크를 固定시킨 채 出力을 P_m에서 P_n로 減少시키면 機關에서 發生하는 回轉力은 變化가 없으므로[4] 發電裝置의 回轉速度는 ω_m에서 ω_n로 增加하고 摩擦抵抗모우멘트는 M_m에서 M_n로 增加되어 (25)式과 같은 새로운 平衡式이 成立한다.

$$\tau_0 = M_n + \frac{P_n}{\omega_n} \quad \cdots\cdots (25)$$

여기에서

M_n; 角速度 ω_n일 때 發電裝置 全體에 作用하는 摩擦抵抗모우멘트

P_n; 角速度 ω_n일 때의 出力(電力)

(24)式과 (25)式의 差中 $M_n - M_m$에는 角速度의 크기와 關係없는 摩擦抵抗모우멘트는 相殺되고 增加된 粘性摩擦抵抗모우멘트만 남는다. 따라서 ω_m(여기서는 1200 rpm) 近傍의 角粘性摩擦抵抗모우멘트係數 (k)로 나타내면

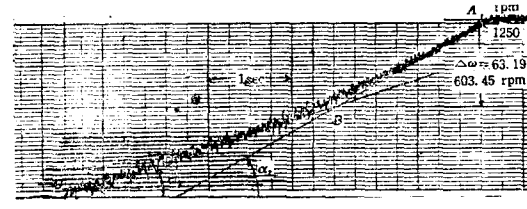
$$k \cdot (\omega_n - \omega_m) = \frac{P_m}{\omega_m} - \frac{P_n}{\omega_n} \quad \cdots\cdots (26)$$

(26)式과 같이 된다. 實驗에서는 $P_m = 1 \sim 0.65$kW, $P_n = 0$(無負荷)로 하여 增加된角速度를 數次 測定하여 그 平均値로 부터 k를 求하면 다음과 같이 된다.

$k = 0.6 [\text{N} \cdot \text{m/rad}]$

(5) 發電裝置의 慣性모우멘트 測定

發電裝置를 無負荷로 運轉中 急히 燃料를 遮斷하였을때의 速度變化를 記錄하였던 바, 그 減速曲線을 그림·6과 같이 되었다.



그림·6 實驗디이젤 發電裝置의 減速特性曲線
Fig·6 Decelerating characteristics curve of speed of the diesel power generating-set.

이 曲線을 AB와 BC의 두 部分으로 區分하여 考察해 보면 처음 A에서 B까지는 角速度가 크므로 粘性摩擦抵抗과 乾性摩擦抵抗에 依하여 減速이 된다. 角速度가 더욱 적어짐에 따라 粘性摩擦抵抗은 消滅되고 角速度의 크기와 關係없는 乾性摩擦抵抗만 남게 되어 一定한 減角加速度로 된 部分이 BC이다. 機關의 總發生回轉力을 τ, 摩擦抵抗모우멘트를 M_f라 하면 無負荷運轉狀態에서 發電裝置의 回轉力에는 (27)式과 같은 平衡式이 成立한다.

$$\tau - M_f = J\left(\frac{d\omega}{dt}\right) \quad \cdots\cdots (27)$$

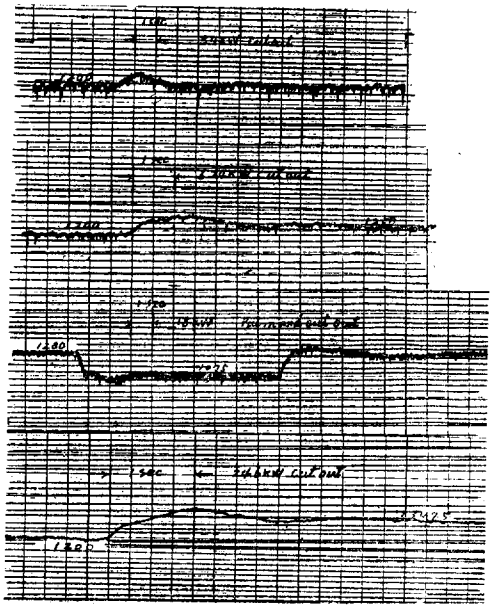
지금 無負荷狀態에서 定格速度로 定狀運轉中 急히 燃料를斷하여 減速되는 瞬間點(그림·6의 A點)을 생각하면 (28)式을 얻을 수 있다.

$$-J\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{\omega=0}=J\tan\alpha_2=M_0 \quad \cdots\cdots(28)$$

但 α_2 : 그림·6의 A點에서의 減速曲線의 接線角

여기에서 M_0는 定格運轉狀態에서의 總摩擦抵抗모우멘트로서 다음과 같이 計算할 수 있다.

$$M_0=\frac{P_i-P_l}{40\pi} \quad \cdots\cdots(29)$$



그림·7 階段狀 負荷變動에 對한 速度의 過渡應答波形

Fig·7 The transient speed variation corresponding to the stepwise change of load.

但 P_i: 實驗發電機를 他電源에 依하여 同期電動機로서 定格速度로 運轉시킬 때의 入力

P_l: 實驗發電機의 同期電動機로서의 電氣的인 損失實驗에서 $P_i=18$kW로 測定되었고 그림.6에서 $\tan\alpha_2=34.91$rad/sec²이므로 P_l를 2kW(1/2負荷 效率90%)로 推算하면 J는 다음과 같이 計算된다.

$$J=\frac{M_0}{\tan\alpha_2}=\frac{P_i-P_l}{\tan\alpha_2\cdot 40\pi}=3.65[\text{kg}-\text{m}^2]$$

3.3 負荷實驗

그림·7은 回轉速度를 1,200rpm의 定格値로 調整해 두고서 몇가지 크기의 負荷를 投入 혹은 遮斷하였을 때 發電裝置의 角速度의 過渡應答波形을 記錄한 것이다.

그림 7에서 off-set는 負荷의 크기에 比例하고, 같은 크기의 負荷를 投入하였다가 다시 遮斷하였을 때의 速度는 原狀態로 復歸하며 過渡狀態는 1.5sec 程度에서 거의 끝남을 알 수 있다.

4. 實驗結果에 對한 檢討

4.1 調速機의 게인(k_1)變化에 對한 各定數値의 變化

特性根의 값은 τ_R, ζ, ω_n, k_1, k_2, k_3 等에 依하여 決定되지만 그 中에서 k_1이 變하는 경우 速度의 應答特性이 어떻게 달라지는 가를 實驗發電裝置에 對해서 具體的으로 檢討해 보기로 한다. 즉 以上의 實驗을 通하여 求한 諸定數値를 (7)～(11)式 및 (15)～(20)式에 代入하여 몇가지 代表的인 k_1값에 對한 C_0, C_1, $2|C_2|$, σ_1, σ_2, ω_0, ϕ를 計算해 보면 表.3과 같다.

表·3 몇가지 k_1에 對한 (14)式의 係數値

Table·3 Values of constants of equation(14) for various values of k_1

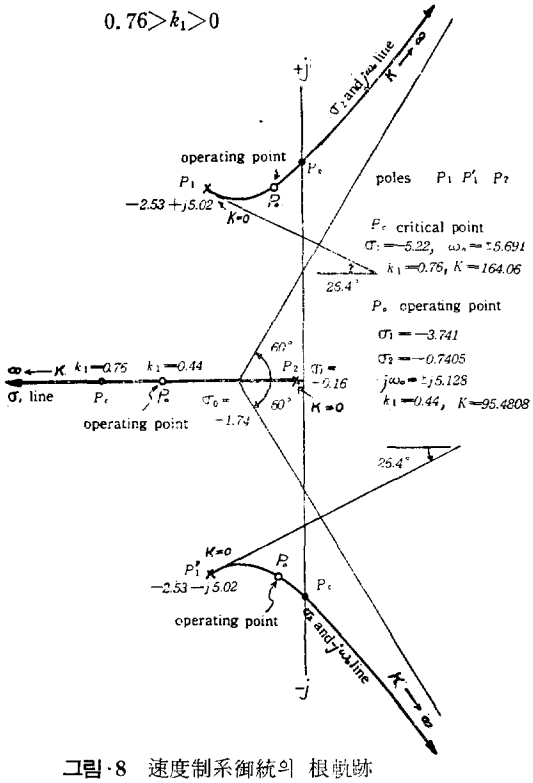
k_1	C_0	C_1	$2\|C_2\|$	σ_1	σ_2	ω_0	ϕ
0.85	0.044994	−0.02504	0.029003	5.544	−0.16	5.84	229.1°
0.76	0.050164	−0.02811	0.031102	5.224	0	5.691	224.0°
0.6	0.063041	−0.03639	0.031880	4.586	0.321	5.421	213.1°
0.44	0.084813	−0.05448	0.031594	3.741	0.7410	5.128	195.6°
0.1	0.0318716	−0.031279	0.008381	0.941	2.142	4.872	119.48
0.55	0.536166	−0.45402	0.006838	0.531	2.344	5.413	204.4°

表·3에서 k_1이 增大하면 C_0, C_1은 減少하고 σ_1은 增大하여 σ_2는 k_1이 0.76보다 더 커지면 負의 값으로 바뀌어 진다.

4.2 過渡應答波形에 對한 檢討

前節의 結果로 부터 實驗發電裝置에 對해서 調速機의 게인 k_1의 變化가 速度의 過渡應答波形에 미치는 影響을 推察할 수 있으나 여기서는 根軌跡을 利用하여 k_1의 變化에 依한 特性根의 變化에 對해서 檢討해 보기로 한다. 實驗에서 모든 定數値를 代入하고 k_1만 變化시켰을 때 速度制御系統의 根軌跡을 그린 것이 그림·8이다.

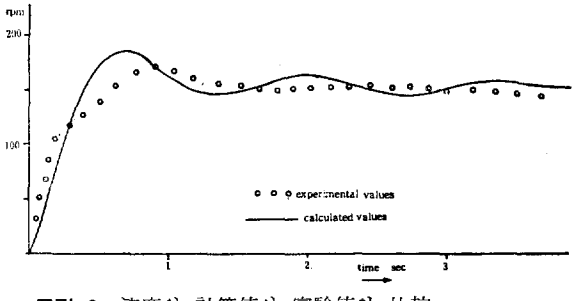
다음 그림·8에서 P_1, P_2, P_3, 는 $k_1=0$일 때의 特性根이고 P_0는 實驗發電裝置의 現在의 動作點, P_c는 臨界點이다. k_1이 增加하여 臨界點 P_c를 넘어서면 이 系統은 發散하게 된다. 表·3 또는 (21)式으로 부터 이 發電裝置의 速度安定條件은 다음과 같이 된다.



그림·8 速度制系御統의 根軌跡
Fig. 8 The root locus of the speed contror system.

4.3 理論値와 實驗値의 比較

實驗디이젤發電裝置의 動作點에 있어서의 k_1의 값은 0.44이다. 表 3에서 $k_1=0.44$에 있어서의 各定數値를 (14)式에 代入하면 (14)式은 回轉力에 對한 角速度의 인디셜應答을 나타내는 理論式이 된다. 그림·9는 24.6 kW의 負荷가 遮斷되었을 때 速度變化에 對한 理論的 過渡應答波形과 實測한 過渡應答波形을 rpm單位로 하여 比較한 것이다.

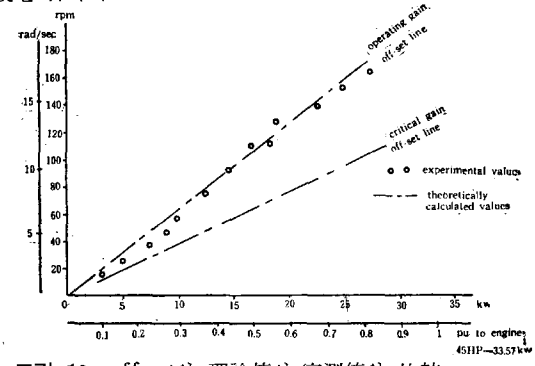


그림·9 速度의 計算値와 實驗値의 比較
Fig. 9 Comparison of theoretical values and experimental values of speed.

그림 9에서 두 波形을 比較해 보모 最大오버슛트 및 振動角周波數에 있어서 計算値와 實驗値사이에 약간의 差異가 있다. 이는 本硏究에서 無視한 調速機의 lost motion, 機關의 回轉力發生過程에 있어서의 非線形性, 摩擦抵抗의 非線形性 및 各定數値의 推定에 있어서 이에 隨伴되는 誤差等에 起因되는 것으로 생각된다. 그러나 實際的으로 發電裝置에 있어서는 過渡特性보다 다음 節에서 論하는 定常特性 特히 off-set가 크게 問題된다.

4.4 速度 off-set에 對한 檢討

負荷變動에 對한 過渡期間은 約 1.5sec 以內이고 그 期間이 짧아 過渡特性은 크게 問題되지 않으나 off-set는 끝까지 남아 供給電力의 質을 低下시킨다. 그림·10은 負荷크기에 對한 off-set의 理論値와 實測値를 比較한 것이다.



그림·10 off-set의 理論値와 實測値의 比較
Fig·10 Comparison of the theoretical values and experimental values of speed off-set

그림·10에서 보면 理論値와 實測値사이에 약간 差異가 있다. 이는 輕負荷에서는 燃料에 比해 供給空氣量이 充分하기 때문에 燃燒가 잘되어 機關게인이 커지고 重負荷에서는 負荷가 遮斷되었을 때 速度가 增加함에 따라 摩擦抵抗의 急增으로 增速이 抑制 當하기 때문이라 생각된다. 臨界値 off-set線은 本 實驗裝置에 對해서 k_1을 增加시켜 off-set를 줄일 수 있는 限界線을 나타낸다. 그러나 實際에 있어서 이 限界線까지 k_1을 增加시키면 헌팅이 일어나므로 off-set는 이보다 더 크다.

5. 結 論

以上의 디이젤發電裝置의 速度特性에 對한 理論的解析과 實驗的인 考察을 通하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 디이젤機關의 速度制御系統에 包含되고 있는 非線形要素를 無視내지 近似線形化하였으나 理論的解析과 實驗的인 考察結果는 比較的 잘 一致하였다.

(2) 遠心型機械式調速機를 많이 利用하고 있는 中少型 디이젤機關의 速度應答特性은 整定時間이 數秒以

內(實驗發電裝置에서는 1.5秒)이어서 一般的으로 크게 問題되지 않으나 發電機驅動用으로서는 더욱 짧아지도록 改善되어야 한다.

(3) 遠心型調速機로서는 負荷變動에 따른 速度off-set가 不可避하게 생긴다. 이 off-set는 調速機의 게인을 크게 함으로써 적어지나 이에는 限界點이 있다.

實驗發電裝置의 限界點은 調速機의 게인이 0.76이고 이때의 off-set는 2rpm/kW이다. 따라서 off-set를 더 적게하는 對策이 要望된다.

그러나 (1) 디이젤發電裝置의 速度特性에 있어서 過渡特性을 改善하고 off-set를 줄이는 具體的인 對策. (2) 調速機의 게인 以外의 파라미터가 速度特性에 미치는 影響에 對한 考察. (3) 위의(1), (2)에 依한 船用디이젤發電裝置의 速度特性의 改善이 發電機設置容量의 減少等 船舶의 經濟性 向上에 寄與하는 比重等에 對한 具體的 檢討및 實際的으로 調速機의 게인을 變更하면서 디이젤發電裝置의 速度特性을 考察하는 實驗等은 앞으로 해야할 課題로서 이들에 對하여서는 現在檢討中에 있으므로 다음 機會에 發表하기로 한다.

參 考 文 獻

(1) 李成馥; 最近商船에 있어서 發電機容量에 對한 考察
韓國海洋大學論文集第9輯 1974. p.—6.

(2) 磯村修一 表勵功;
2サイタル テイーゼル機關の動特性
三菱工技報 Vlo. 3, No.5, 1966—9.

(3) 伊藤堅; カソリン機關の動特性
計測・自動制御學會論文集 1966, 第3卷, 第2號 p.—21.

(4) 葉山眞治・山泉穡央;
舶用テイーデル機關の動特性 Vol9, No. 100, 1970, 8.

(5) D.E. Bowns. M.I. Meche; The Dynamic-Transfer Characteristics of Reciprocating Engine, Pro-Instn Mech. Engrs. 1970~71, Vol. 185, 16/71

(6) 高橋利衛：內燃機關の調速について(との一)
日本機械學會誌, 第62卷, 第48, 3號, 1959. 4.

(7) 同人, 同題目　(との二)
日本機械學會誌, 第62卷, 第484號, 1959—5.

(8) 荻野英夫・中村入州夫・田中規稔；
流體ガバナ 內燃機關, 8卷, 9號, 1969—9.

(9) Ferber, R. Schlerif・ Raymond, R. Angell; Governor Tests by Simulated Isolation of Hydraulic Turbine units. IEEE. transaction on power Apparatus and System; Vol. pas—87, No.5. May, 1968.

(10) N.G. Alvis; Electric Hydraulic Governor Control for Industrial and Commercial Gas Turbine Use. Transaction of the ASME Journal of Engineering for Power. July 1966/243.

(11) D.G. Ramey John, W. Skooglund; Detailed Hydrogovernor Reciprocating for System Stability Studies Appendix Ⅰ. IEEE Transaction on Power Apparatus and System Vol. pas—89, No.1, January, 1970.

(12) 中田孝; 自動制御の理論, オーム社. 東京, 1967 5. p.—125.

(13) 亘理厚; 機械力學, 共立全書, 86東京, 1956 5. p.—13.

(14) Benjamin, C. Kuo; Automatic Control System 2nd edition, Prantice Hall, Inc. 1967, p.—329

(15) 河注植; 自動制御, 海事圖書出版部, 釜山, 1974. p—106.

(16) (14) 揭書 p.—41.

(17) 長尾主二夫; 內燃機關講義, 養賢堂, 東京, 1964 p.—225.

(18) (4) 揭書 p.—13.

(19) Gordon, J. Murphy; Basic Automatic Control Theory, D. Van, Nostrand Company Inc. London. p.—419.