自勵磁同期發電機의 無負荷 電壓確立에 關하여

論文 資料
10—6

朴 旻 鎬

[1] 緒 言

自勵磁同期發電機電壓의 自己確立은 그 發電機의 殘留磁氣量과 整流回路의 正方向抵抗에 의하여 결정된다. 따라서 磁氣量의 부족은 다른 直流電源을 이용하여 必要量의 初期勵磁를 주는 方法에서, 또 乾式整流器의 抵抗은 正方向特性의 개량과 사용하는 整流體의 枚數를 조종하므로서 해결이 된다.

한편 同期發電機에서는 自動電壓調整을 위하여 界磁回路와 端子電壓사이에는 밀접한 관계가 있고, 더우기 自勵磁發電機에서는 이 두 사이에 有機的인 관계가 있다. 이러한 관계를 알기 위하여 종래에는 勵磁機의 無負荷時의 電壓確立時間을 計算하였다. 그러나 自勵磁同期發電機의 勵磁機器로서는 整流器가 주로 이것에해당되고 또 이것의 電源는 同期機의 端子電壓이 되므로 종래의 방식에 의한 勵磁速應性을 논하기는 곤난하다. 그러므로 이 경우에는 勵磁機대신 직접 同期機端子電壓의 변화를 보므로서 이러한 것을 추측할 수가 있을 것이다.

本論文은 筆者가 自勵磁同期發電機의 試作에서 同期機殘留磁氣의 保有되는 機械部分의 形狀이 直流機와 갖지 않다고 하더라도, 材質上으로 보아 電壓確立過程이 直流機의 그것과 거이 같을 것이라는 觀點을 두고 同期機의 電壓確立을 논하고자 한다. 즉 同期發電機의 等式을 等價直流機의 값으로 換算하고 無負荷飽和曲線과 等價抵抗線을 이용하여 Graphical Integration 法으로 同期發電機의 無負荷電壓確立의 時間에 대한 過程을 他勵磁와 自勵磁의 두 경우에 대하여 計算하고, 實際回路에서의 測定値와 비교하여 이 過程을 再確認하고 自勵磁時의 現象을 말하고자 한다

[2] 同期發電機의 無負荷 電壓確立式

Graphical Integration 法을 사용하여 同期發電機의 無負荷電壓의 時間에 대한 確立의 모양을 알기 위하여 먼저 R.H. Park 의 同期機回路方程式에서 無負荷時의 電壓確立조건을 구하고, 이 결과에서 同期發電機를 等價直流機로 취급하여 電壓確立式을 구한다.

(2.1) 無負荷時의 조건——同期機의 負荷時의 直軸, 橫軸分의 電壓 v_d, v_q(부록 1)의 方程式은

$$\left.\begin{aligned} v_d &= ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \\ v_q &= ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

로 표시되고, 同期機가 突極型인 경우의 鎖交磁束의 관계는

$$\left.\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + M_f i_f \\ \psi_q &= L_q i_q \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

또한 界磁束은

$$\psi_f = L_f i_f + \frac{3}{2} M_f i_d \quad (3)$$

여기서

ω : 同期角速度

r : 1相의 抵抗

M_f : 界磁와 固定子回路간의 相互 인닥크탠스

ψ_d, ψ_q : 直軸 橫軸分磁束

i_d, i_q : 直軸, 橫軸分電流

L_d, L_q : 固定子回路의 直軸, 橫軸分 인닥크탠스

위의 式들에서

$$\left.\begin{aligned} v_d &= ri_d + \frac{d}{dt}(L_d i_d) + \frac{d}{dt}(M_f i_f) - \omega L_q i_q \\ v_q &= ri_q + \frac{d}{dt}(L_q i_q) + \omega L_d i_d + \omega M_f i_f \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

를 얻는다. 여기서 L_d, L_q, M_f를 괄호에 넣은 것은 飽和에 들어가서 그 값이 변화하는 것을 고려하기 때문이다. 發電機가 無負荷인 경우는 i_d, i_q는 영이고

$$\psi_{fo} = L_f i_f \quad (5)$$

$$v_{do} = \frac{d}{dt}(M_f i_f) \quad (6)$$

$$v_{qo} = \omega M_f i_f \quad (7)$$

이 되고 (7)式에서 $dv_{qo}/dt = \omega d(M_f i_f)/dt$ 이고, 이것을 式(6)에 대입하면 $v_{do} = \frac{1}{\omega}\frac{dv_{qo}}{dt}$ 이고 dv_{qo}/dt 는 그리 크지 않고, 특히 自勵磁에서는 대단이 적은 값이고 또 ω는 일정하고 비교적 큰 값이므로 이 경우에는

서울大學校 工科大學 副敎授

v_{do}=0로 하여도 무방하다. 한편 突極型發電機에서 過渡時橫軸分電壓 v_q는 正常狀態와 같이 過渡時에도 橫軸상에 놓여 있고, 無負荷時에는 두 값이 같고 無負荷子端電壓 v_o는 式(5), 式(7)에서

$$v_{qo}=v_{qo}=v_o$$

$$v_o=\omega M_f i_f=\frac{\omega M_q}{L_f}\psi_{fo} \tag{8}$$

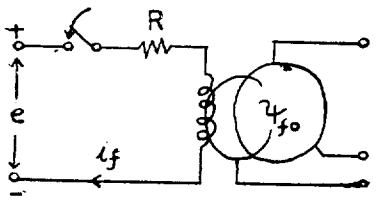
이 된다. 이 式에서 $\omega M_f/L_f$의 값은 磁氣의 飽和, 不飽和를 막론하고 항상 일정한 값이 된다. 따라서 發電機의 無負荷端子電壓은 鎖交磁束에 절대적으로 비례한다고 할 수 있다.

(2.2) 等價直流機——그림(1)의 同期機의 勵磁回路의 電壓方程式은

$$\frac{d\psi_{fo}}{dt}+Ri_f=e$$

여기서 e : 勵磁回路供給電壓

R : 界磁卷線 및 回路抵抗



그림(1) 同期機界磁回路

위의 式을 다음과 같이 변형하면

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\omega M_f\psi_{fo}}{L_f}\right)\frac{L_f}{\omega M_f}+Ri_f=e$$

이고 (8)式에 의하여

$$\frac{L_f}{R}\frac{R i_f}{v_o}\frac{dv_o}{dt}+Ri_f=e \tag{9}$$

v_o는 瞬時値이고, 위의 式의 第1項은 分子, 分母에 v_o가 포함되여 있으므로 v_o의 實効値 혹은 平均値를 그냥 대치하여도 式자체는 아무런 변동이 없다. 다음 α를 確立最後의 端子電壓과 그때의 界磁電壓과의 비라고 하면 이것은 定數이고, 이 α値와 平均値의 電壓 V를 위의式에 개입시키면

$$\frac{L_f}{R}\frac{\alpha R i_f}{V}\frac{dV}{dt}+\alpha Ri_f=\alpha e \tag{10}$$

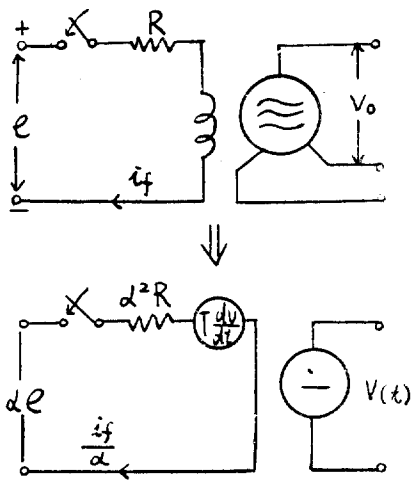
이 式은 同期發電機의 交流側電壓을 直流平均値로, 또 直流勵磁回路의 값을 交流側電壓의 直流의 값으로 환산하여 생각한 식이 된다. 이 식에서 $\frac{L_f}{R}\frac{Ri_f}{V}$ $\left(=\frac{Lf}{\omega M_f}\right)$는 일정한 값이므로

$$\frac{L_f}{R}\frac{\alpha Ri_f}{V}=T(\text{sec}) \tag{11}$$

이 식도 일정하고 實驗에서 얻을 수 있는 定數이다, (10)式은

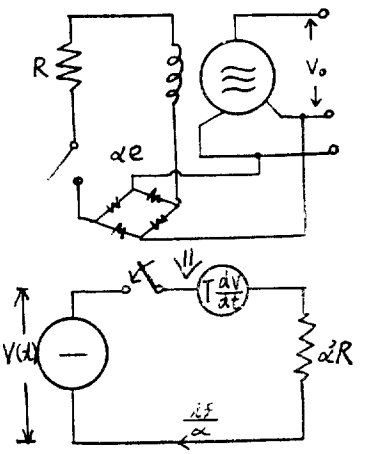
$$T\frac{dV}{dt}\alpha Ri_f=\alpha e \tag{12}$$

이 되고, 이것이 等價直流機를 표시하는



그림(2) 他勵磁同期發電機의 等價直流機回路

式이고, 그림(2)는 αe를 일정이 하고 他勵磁로한 경우이고, 그림(3)은 $\alpha e=V(t)$로 自勵磁로 한 경우이다. 이들 그림에서 $t\to\infty$이면 $T\frac{dV}{dt}\to 0$이고 $V_{t\to\infty}=\alpha Ri_f$가 취급되여 αRi_f는 直流機의 抵抗線과 같이 되고, 同期機의 無負荷平均電壓과 이 等價抵抗線의 교점이 電壓確立의 最終電壓이 된다.



그림(3) 自勵磁同期發電機의 等價直流機回路

(2.3) 電壓確立式——식(12)에서

$$\frac{dV}{dt}=\frac{\alpha e-\alpha Ri_f}{T}$$

혹은 $$t=\int dt=T\int\frac{1}{\alpha e-\alpha Ri_f}dV \tag{13}$$

이 式에 의하여 V의 時間에 따르는 값을 얻을 수가 있다. 이것이 電壓確立式이 될 것이다.

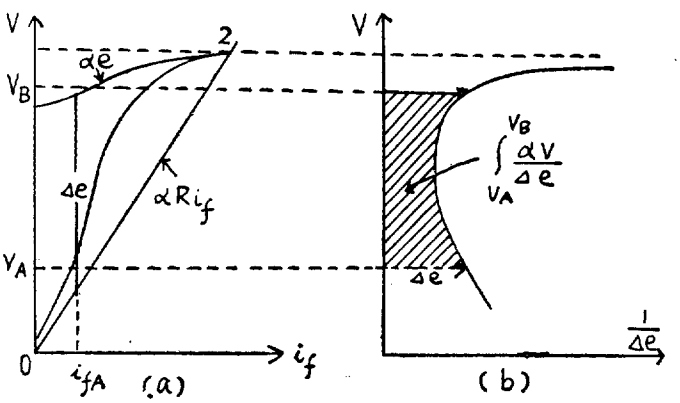
[3] Graphical Integration 法에 의한 電壓確立曲線

(3.1) Graphical Integration 法——電壓確立에 소요되는 시간을 面積의 積分으로 표시하는 방법을 말하고 식(13)는 이것에 부합되는 식이다. 따라서 이 식을 이 방법으로 풀기 위하여 먼저 同期發電機의 無負荷電壓曲線을 測定하면 그림(4a)와 같이 V-i_f 曲線이 결정되고 點 2는 $t\to\infty$일때의 값이고 確立最後의 電壓이 될것이다. 만일 勵磁回路電壓 αe가 i_f의 函數로 표시될 수 있는 曲線이면 언제든지 V-i_f曲線과 동일座標상에 이것을 그릴 수 있고 식(13)에서

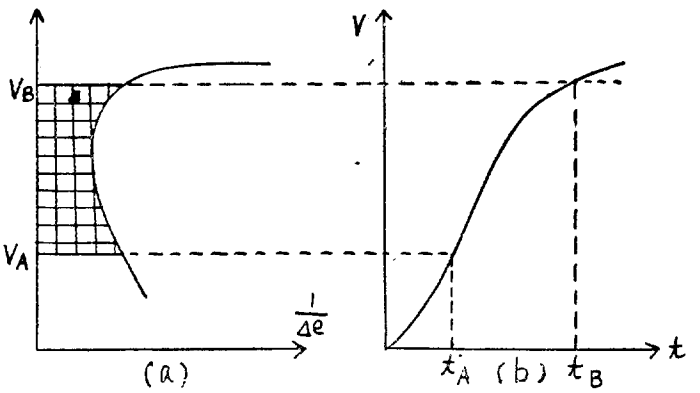
$$\triangle e=\alpha e-\alpha R i_f \qquad (14)$$

는 그림에서 표시한 바와 같이 V의 點에서 αe 曲線과 等價抵抗線 $\alpha R i_f$ 사이의 縱軸방향의 값이 된다. 그러므로 $V-\frac{1}{\Delta e}$ 曲線이 그림(4a)에서 그림(4b)와 같이 그려졌다고 하면 斜線部分의 面積은 V_A 의 電壓에서 V_B까지 確立시키는데 필요한 시간에 비례하고 여기에다가 T의 값을 승하면 上昇時間이 된다. 面積의 積分은 그림(5 a)와 같이 區分求積法에 의하고

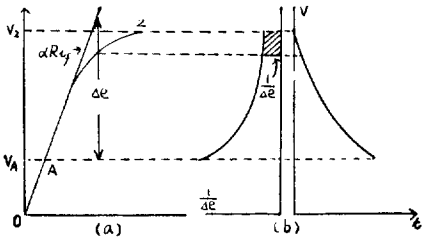
$$t_{B-A}=(\text{面積}\ V_A-V_B)\times T=T\int_{V_A}^{V_B}\frac{dV}{\Delta e} \qquad (15)$$



그림(4) 等價曲線에서 $V-\frac{1}{\Delta e}$曲線의 算出



그림(5) 그림(3)의 $V-\frac{1}{\Delta e}$曲線에서 V-t 曲線의 算出

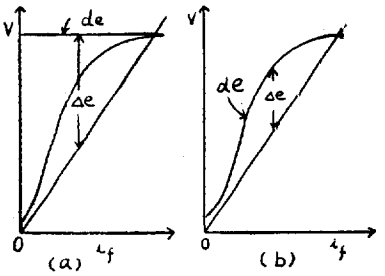


그림(6) 電壓降下時의 $V-t$ 曲線

이된다. 이러한 관계에서 勵磁回路를 Switching 하여 그림(5 a,b)와 같이 所要電壓까지 上昇시키는 과정을 時間에 대한 曲線으로 표시한다.

(3.2) 電壓을 降下시키는 경우——電壓上昇의 경우와 거의 같은 과정이나 그림(6)에서 보는 바와 같이 V_2에서 V_A까지 降下할때의 抵抗線 αR_{if}는 OA의 直線이 되고 Δe는 V_A A의 直線과 等價抵抗線사이의 V_2軸방향의 거리가 된다. 이것은 電壓上昇의 경우 보다 대단히 크고 T는 勵磁回路의 抵抗이 증가되므로 식(11)에서 적어진다. 다시 말하여 降下時의 時間에 대한 電壓降下는 上昇時보다 대단히 빠르고, 他勵磁, 自勵磁에 무관계로 같은 값이 된다.

(3.3) αe의 i_f에 대한 曲線——이 曲線은 正常狀態의 것이므로 어떠한 αe를 주더라도 實驗에서 $\alpha e-i_f$曲線이 그려진다. 本文에서 他勵磁의 경우에는 一定勵磁이므로 그림(7 a)와 같이 i_f에 무관계로 i_f軸에 平行直線이 된다. 즉 그림(2)에서 電壓을 階段函數로 준 경우가 된다. 그림(7 b)는 그림(3)의 경우와 같고 無負荷端子電壓이 整流器를 통하여 饋還하는 것이고, 이때는 αe가 V에 해당되므로 αe의 曲線은 즉시로

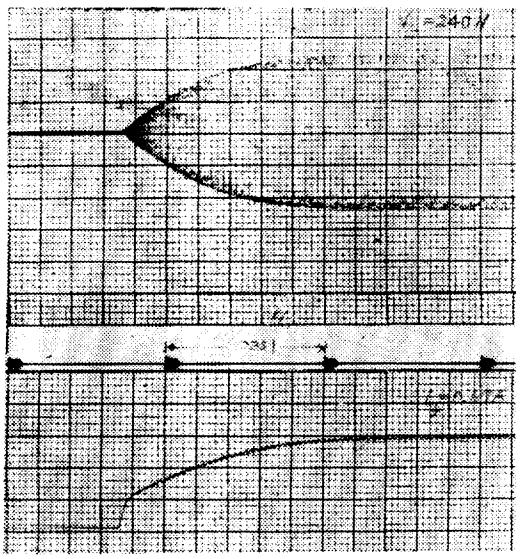


그림(7) 勵磁電壓의 i_f에 대한 曲線

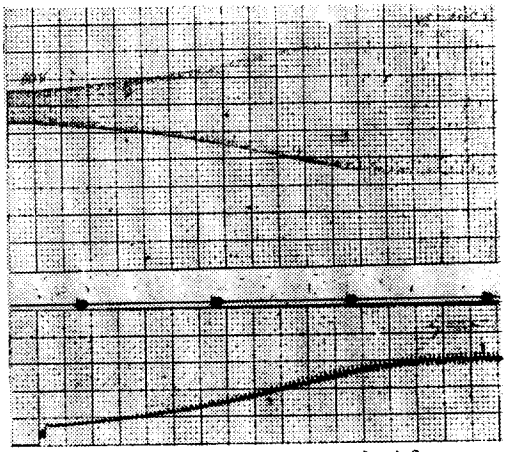
V의 曲線과 일치한다는 것을 알 수 있다. 따라서 Δe는 自勵磁의 경우 그림(7 b)와 같이 V曲線과 抵抗線 사이의 거리가 된다. 식(15)에서 아는 바와 같이 이경우는 他勵磁一定電壓을 주었을 경우에 비하여 上昇時間도 오래 걸리게 된다.

[4] 測定値와 이 方法에 의한 計算値

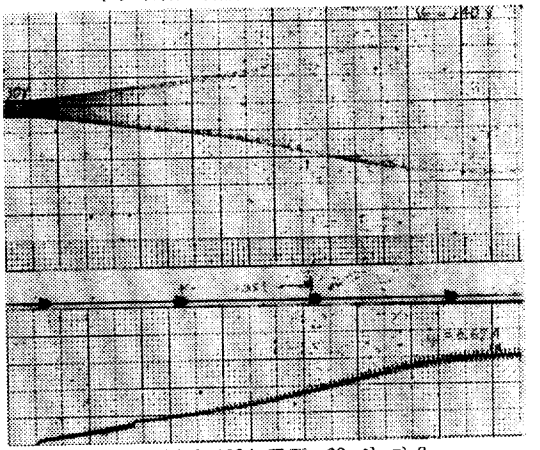
(4.1) 測定値——實驗에 사용한 同期發電機는 7.5 kva, 240v, 凸極型, 4極, 1800rpm이고 原動機로는 同期電動機를 사용하여 一定速度로 회전시키고, San Born 記錄計로 無負荷端子電壓과 勵磁電流의 時間에 대한 曲線을 測定하였다. 그림(8)은 他勵磁의 경우이고 最終電壓確立時間은 약 1.5秒 정도가 된다. 그림(9)는 自勵磁의 경우의 曲線이고, 殘留磁氣의 부족(誘起電壓 8v)으로 初期勵磁를 주어 端子電壓을 30v로 한 경우가 그림(9 a)이고, 이 때의 確立時間은 약 3.2秒이고, 그림(9 b)는 初期勵磁誘起電壓이 60v의 경우이고 確立時間은 약 2.7秒이다. 그림(10)은 電壓降下曲線이고, 自勵磁, 他勵磁를 막론하고 약 0.8秒로 같다.



그림(8) 他勵磁同期發電機의 測定曲線



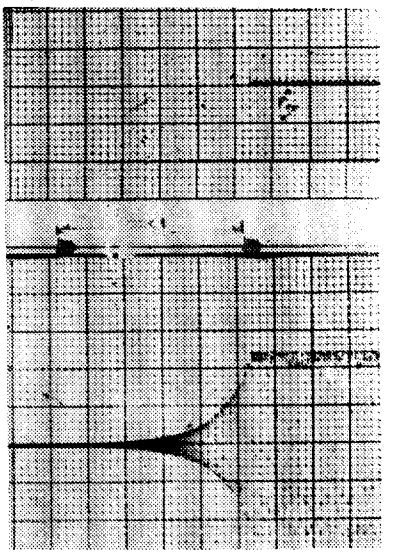
(a) 初期勵磁誘起電壓 30v의 경우



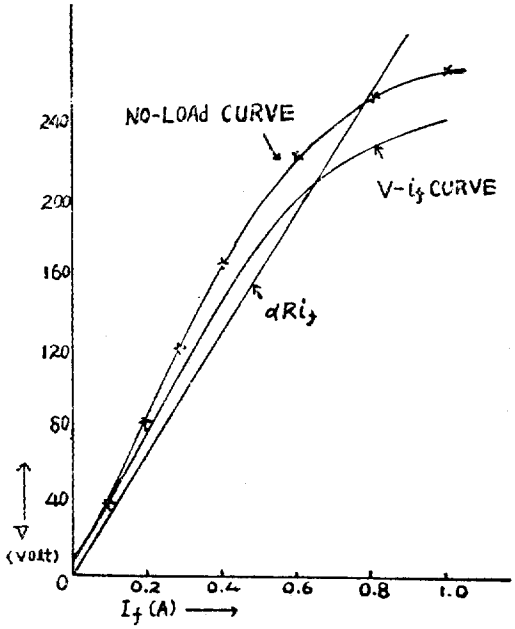
(b) 初期勵磁誘起電壓 60v의 경우

그림(9) 整流器에 의한 自勵磁同期發電機의 測定曲線

(4.2) 計算値——이 同期發電機의 無負荷電壓曲線을測定하므로서 그림(11)과 같이 동시에 $V-i_f$曲線이 표시된다. 이 曲線에 의하여 Graphical Integration法을 사용한 計算値를 표(1), (2)에 표시한다.



그림(10) 電壓降下時의 測定線曲



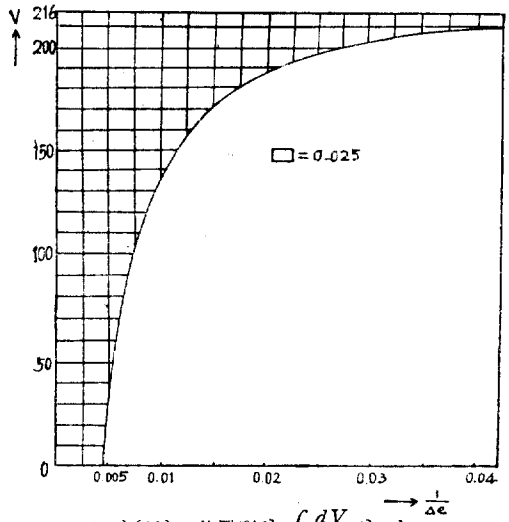
그림(11) 無負荷電壓曲線 $V-i_f$曲線

V (volt)	Δe (volt)	$\frac{1}{\Delta e}$ (volt^{-1})	Area $\int\frac{dV}{dt}$	t (sec)	i_f (amp)
6	216	4.61×10^{-3}	—	—	0
10	212	4.71	0.044	0.013	0.02
20	202	4.95	0.092	0.027	0.04
30	198	5.05	0.140	0.040	0.07
40	189	5.24	0.180	0.054	0.09
50	181	5.53	0.240	0.072	0.12
60	169	5.90	0.295	0.030	0.15
80	151	6.62	0.433	0.130	0.20
100	136	7.35	0.571	0.171	0.25
120	116	8.62	0.737	0.221	0.31
140	96	10.41	0.925	0.277	0.37
160	78	12.82	1.150	0.345	0.42
180	56	17.85	1.463	0.44	0.50
200	31	32.26	1.963	0.58	0.58
210	11	90.90	6.000	1.80	0.64
216	0	—	—	—	0.67

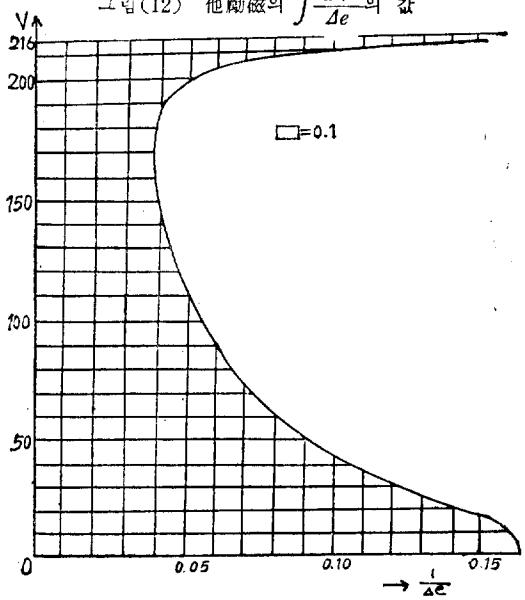
표(1) 他勵磁의 計算値

V (volt)	Δe (volt)	$\frac{1}{\Delta e}$ (volt^{-1})	Area $\int\frac{dV}{\Delta e}$	t (sec)	i_f (amp)
6	6	0.167	—	—	0
10	6	0.167	1.60	0.48	0.02
20	7	0.143	3.17	0.95	0.04
30	10	0.100	4.47	1.34	0.07
40	12	0.083	5.58	1.67	0.09
50	12	0.083	6.53	1.86	0.12
60	12	0.083	7.38	2.21	0.15
80	16	0.063	8.81	2.64	0.20
100	18	0.055	10.01	3.00	0.25
120	20	0.050	11.06	3.31	0.31
140	22	0.045	11.98	3.59	0.37
160	22	0.045	12.83	3.85	0.42
180	21	0.048	13.61	4.08	0.50
200	17	0.059	14.51	4.35	0.58
210	10	0.100	15.46	4.63	0.64
216	0	∞	∞	∞	0.67

표(2) 自勵磁의 計算値



그림(12) 他勵磁의 $\int\frac{dV}{\Delta e}$의 값

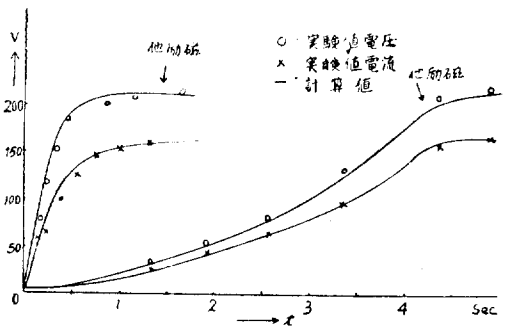


그림(13) 自勵磁의 $\int\frac{dV}{\Delta e}$ 의 값

이 표를 작성하는데 $\int \frac{dV}{dt}$ (Area)는 그림(12), (14)으로 표시되었고 $T=\frac{L_f}{R}-\frac{\alpha R_{if}}{V}$는 L_f의 測定과 그림(11)의 曲線에서 $\frac{\alpha R_{if}}{V}$의 값이 결정된다. 實驗에서 $T=0.305$로 결정되었다. 따라서 $\int \frac{dV}{dt}$의 값에 T를 승하면 t의 값이 표(1),(2)와 같이 구해지고, i_f는 無負荷端子電壓曲線에서 구해진다.

지금 구한 計算値와 먼저 測定한 값을 동시에 표시하면 그림(14)와 같다.

(4.3) 結果에 대한 檢討——(1) 測定値는 電壓에 있어서 最大値이고, 計算에서는 平均値를 취하였다. 여기에서 比較檢討이므로 測定値의 最大値를 平均値로



그림(14) 自勵磁, 他勵磁의 時間에 對한 確立曲線

보아도 時間에 대한 確立過程에는 조금도 지장이 없다 따라서 그림(14)에 값을 옮길때는 平均値로 하였다. 測定値와 計算値의 값은 대체로 일치한다고 볼 수 있다(그림(14)). 여기서 自勵磁測定値는 初期勵磁가 30v이므로 그림(14)의 1.3秒의 점에서 부터 시작하였다.

즉 初期勵磁때문에 1.3秒만큼 빨리 確立한 셈이 된다. 初期勵磁가 60v(그림 9 b)의 경우는 2.2秒만큼 빨리된다. 이러한 것으로 미루어 보아 速應勵磁가 必要할 때는 이와같은 方法에서 時間을 단축시킬 수 있다. 또 한편 이 發電機의 殘留磁氣에 의한 誘起電壓이 8v인데 自勵磁가 不能한 이유는 整流器正方向抵抗이 8v 근처에서는 크기 때문네이다. (3) : 實驗値 혹은 그림(14)에서 보는 바와 같이 自勵磁確立時間이 他勵磁에 비하야 약 7倍이상 遲延되고 있다. 이 原因은 그림(7b)의 Δe가 적기 때문이다. (4) : 自勵磁에서 電壓確立에 따라 速應性이 좋와진다(그림 9 혹은 그림14).

[5] 結　論

同機發電機의 無負荷電壓의 時間에 대한 確立을 위의 설명한 바와같이 等價直流機의 입장에서 논하였다. 이 결과 同期機의 電壓確立過程을 Graphical Integration 方法을 사용하여도 별로 誤差가 없다는 것을 아는 동시에 非線型要素를 포함하여 취급할 수 있다. 또한 勵磁速應性을 알아내기 힘든 勵磁機器(自勵磁의 경우)에는 이 방법을 사용하여 직접 同期機의 無負荷電壓을 구하므로서 勵磁速應을 미루어 볼 수가 있다. 本實驗의 예로서는 自勵磁同期發電機의 電壓確立은 他勵磁에 비하여 時間이 대단히 遲延되고 自動電壓調整에서는 다른 要素를 가미하여야 할 것이다.

本硏究는 1961年度 國庫金硏究費로서 서울大學校 工科大學 電氣機器硏究室에서 실시한 것이다.

끝으로 本硏究實驗에 조력하여 준 電氣工學科大學院生인 黃熙隆君, 權純國君에게 감사를 하는바이다.

(西紀1963年 1月 31日接受)

文　獻

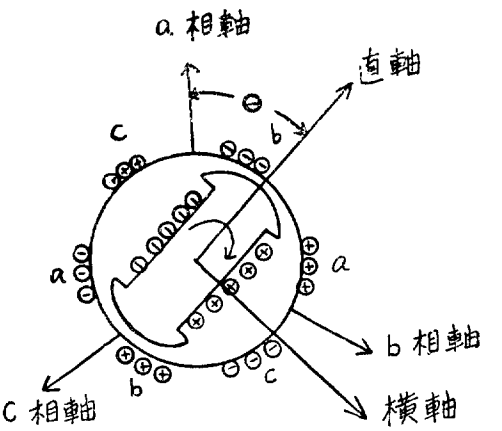
(1) "Two-Reaction Theory of Synchronous Machine-Part I, Generalized Method of Analysis" A.I.E.E., trans, Vol 48, pp. 716-30, july 1929

(2) Power System Stability(Book) vo III, Kimbark. John Wiley Co.

(3) Transient Performance of Electric Power Systems(Book), Reinhold Rüdenberg. McGraw-Hill Co.

[附錄] 同期機의 回路電壓式

그림(1)의 凸極型同期機에서 勵磁電壓式은



그림(1) 凸極型同期機

$$v_f=r_f i_f+\frac{d\psi_f}{dt} \quad (1)$$

$$\psi_f=L_{fa}i_a+L_{fb}i_b+L_{fc}i_c+L_f i_f \quad (2)$$

L_{fa}, L_{fb}, L_{fc} : 勵磁回路와 相間의 인다크탠스

L_f : 界磁卷線의 自己 인다크탠스

또

$$\left.\begin{aligned} L_{fa}&=L_{af}=M_f\cos\theta \\ L_{fb}&=L_{bf}=M_f\cos(\theta-120^\circ) \\ L_{fc}&=L_{cf}=M_f\cos(\theta-240^\circ) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(3)$$

이 되고, 따라서

$$\psi_f=(M_f\cos\theta)i_a+[M_f\cos(\theta-120^\circ)]i_b+[M_f\cos(\theta-240^\circ)]i_c+L_fi_f \quad \cdots\cdots(4)$$

또 $i_a=i_d\cos\theta-i_q\sin\theta i_o$

$i_b=i_d\cos(\theta-120^\circ)-i_q\sin(\theta-120^\circ)i_o$

$i_c=i_d\cos(\theta+120^\circ)+i_q\sin(\theta+120^\circ)i_o$

여기서 i_o : 零相電流, i_a, i_b, i_c, : 各相電流

위의 式에서

$$\left.\begin{aligned} i_d&=\frac{2}{3}[i_a\cos\theta+i_b\cos(\theta-120^\circ)+i_c\cos(\theta+120^\circ)] \\ i_q&=\frac{2}{3}[i_a\sin\theta+i_b\sin(\theta-120^\circ)+i_c\sin(\theta+120^\circ) \\ i_o&=\frac{1}{3}(i_a+i_b+i_c) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(5)$$

같은 方法으로 v에 대하여

$$\left.\begin{aligned} v_d&=\frac{2}{3}[v_a\cos\theta+v_b\cos(\theta-120^\circ)+v_c\cos(\theta+120^\circ)] \\ v_q&=-\frac{2}{3}[v_a\sin\theta+v_b\sin(\theta-120^\circ)+v_c\sin(\theta+120)] \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(6)$$

ψ에 대하여서도

$$\psi_d=\frac{2}{3}[\psi_a\cos\theta+\psi_b\cos(\theta-120^\circ)+\psi_c\cos(\theta+120^\circ)$$

$$\psi_q=-\frac{2}{3}[\psi_a\sin\theta+\psi_b\sin(\theta-120^\circ)+\psi_c\sin(\theta+120^\circ) \quad \cdots\cdots(7)$$

一般回路의 電壓式은

$$v=ri+\frac{d\psi}{dt}$$

이고 (6)式에서

$$v_d=\frac{2}{3}[(ri_a+\frac{d\psi_a}{dt})\cos\theta+(ri_b+\frac{d\psi_b}{dt})\cos(\theta-120^\circ)+(ri_c+\frac{d\psi_c}{dt})\cos(\theta+120^\circ)$$

$$=r\frac{2}{3}\left[i_a\cos\theta+i_b\cos(\theta-120^\circ)+i_c\cos(\theta+120^\circ)\right]+\frac{2}{3}\left[\frac{d\psi_a}{dt}\cos\theta+\frac{d\psi_b}{dt}\cos(\theta-120^\circ)+\frac{d\psi_c}{dt}\cos(\theta+120^\circ)\right]=ri_d+\left(\frac{d\psi}{dt}\right)d \quad ($$

(7)式에서

$$\frac{d\psi_d}{dt}=\frac{2}{3}\left[\frac{d\psi_a}{dt}\cos\theta+\frac{d\psi_b}{dt}\cos(\theta-120^\circ)+\frac{d\psi_c}{dt}\cos(\theta+120^\circ)\right]-\omega\frac{2}{3}\left[\psi_a\sin\theta+\psi_b\sin(\theta-120^\circ)+\psi_c\sin(\theta+120^\circ)\right]=\left(\frac{d\psi}{dt}\right)_d+\omega\psi_q \quad (9)$$

여기서 $\theta=\omega t+\theta$ 이다.

式(8), 式(9)에서

$$v_d=ri_d+\frac{d\psi_d}{dt}-\omega\psi_q$$

같은 方法으로

$$v_q=ri_q+\frac{d\psi_q}{dt}+\omega\psi_d$$

위의 두式이 同期機의 回路電壓式이 된다.