

論 文
35~2~2

# 정지여자형 동기발전기의 界磁異常電壓 억제에 관한 연구

## A Study on the Suppression of Abnormal Field Voltage in the Static Excitor Type Synchronous Generator

尹 炳 道\* 李 元 教\*\*  
(Byung-Do Yoon·Weon-Gyo Lee)

### Abstract

This paper describes the generation region and suppression effect of the abnormal field voltage induced when the synchronous generator excited by static excitor is switched to power system.

In the case that a water-wheel generator is switched to the infinite bus, the critical value of negative field current is calculated by simulation which has parameters of the phase difference and voltage ratio between the bus and the generator. The suppression effect of discharge resistance connected in parallel with the field circuit is also investigated.

According to this study, the optimal value of discharge resistance which can suppress effectively the abnormal field voltage may be calculated.

### 1. 서 론

동기발전기의 여자기 중 정지형여자기는 速應性이 우수하기 때문에 용량의 대소에 관계없이 널리 사용되고 있다. 또한 동기발전기를 계통에 同期投入할 때에 무한대모선과 발전기 사이의 位相差 및 電壓差에 따라서 동기발전기의 계자회로에 과도적으로 負의 전류가 흐르는 경우가 있다.

이와 같은 과도상태가 발생하면 정지형 여자기는 그 주요부분인 반도체소자에 의해서 전류의 逆流가 阻止되기 때문에 동기발전기의 계자권선에는 그 기간 異常電壓이 발생한다.<sup>1)</sup> 이 異常異常電壓은 경우에 따라서는 정류기 및 계자권선의 절연을 파괴시킬 정도로 고전압이 될 가능성도 있다.

한편, 정지여자형 동기발전기의 계자회로에는 계자권선과 병렬로 放電抵抗을 삽입해서 逆流回路를

구성하고 逆勵磁領域까지도 여자가 되도록 고려하고 있다.<sup>2)</sup>

본 연구에서는 정지여자형 동기발전기를 계통에 同期投入할때에 무한대모선과 발전기사이의 位相差 및 電壓差를 변수로하여 과도적으로 계자전류가 負로되는 임계값을 계산하고 負의 계자전류로 인한 異常電壓의 크기를 고찰한다. 그리고 兩者間의 位相差 및 電壓差와 異常電壓 그리고 放電抵抗 3者間의 상관관계에서 放電抵抗에 의한 異常電壓의 억제효과를 검토하고 放電抵抗의 적정값을 계산한다.

### 2. 기본 시스템의 구성과 動特性

#### 2.1 기본 시스템의 구성

계통은 일기 무한대모선이고, 그 중간에 線路리액턴스가 존재한다. 그런데 해석의 간편화를 위해 그림 1에서 보는 바와 같이 점A를 발전기의 단자로 하고 線路리액턴스는 발전기에 포함되는 것으로 한다. 본 연구에서는 계통의 디스터번스에 관한 과도현상의 해석을 고려하는 것이 아니고 定常적으로 발전기를 계통에 同期投入할때에 과도적으로 일어나

\*正 會 員：中央大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\*正 會 員：柳韓工專大 電氣科 副教授 · 工博

接受日字：1985年 9月 5日

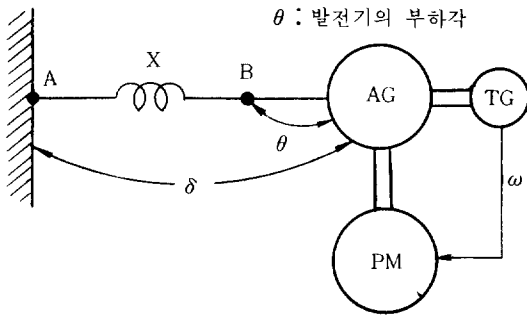


그림 1. 선정된 전력시스템  
Fig.1. System configuration.

는 현상을 대상으로 한다. 따라서 계통의 변화는 극히 완만하고 그 변화폭도 미소하기 때문에 계통의 전압 및 전류가 변해서 과도전류가 흐르는 계자권선과 제동권선의 존재는 무시한 경우(계자권선에는 여자전류만 흐름)의 電機子 임피던스만을 고려하였다.<sup>3), 4), 5)</sup>

동기발전기를 그림 2와 같이 d, q축 모델로 해석하고 제량의 기호는 IEC pub. 34-10에서 발전기의 경우를 택했으며 d, q축에 대한 전압과 자속에 대한 방정식은 다음과 같다.<sup>6)</sup>

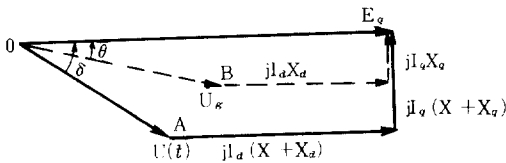


그림 2. 간이 벡터도(점 A, B는 그림 1과 대응)  
Fig.2. Simplified vector diagram (point A and B corresponding to the those in Fig.1).

$$\begin{cases} U_d = -p\psi_d - \psi_q \cdot p\gamma - r_a \cdot i_d \text{ [pu]} \\ U_q = -p\psi_q + \psi_d \cdot p\gamma - r_a \cdot i_q \text{ [pu]} \end{cases} \quad (1)$$

$$U_f = p\psi_f + r_f \cdot i_f \text{ [pu]} \quad (2)$$

$$\begin{cases} 0 = p\psi_{kd} + r_{kd} \cdot i_{kd} \text{ [pu]} \\ 0 = p\psi_{kq} + r_{kq} \cdot i_{kq} \text{ [pu]} \end{cases} \quad (3)$$

$$\psi_d = (x + x_d) \cdot i_d + x_{afd} \cdot i_f + x_{akd} \cdot i_{kd} \text{ [pu]} \quad (4)$$

$$\psi_q = (x + x_q) \cdot i_q + x_{akq} \cdot i_{kq} \text{ [pu]} \quad (5)$$

$$\psi_f = x_{ffd} \cdot i_f + x_{afd} \cdot i_d + x_{fkd} \cdot i_{kd} \text{ [pu]} \quad (6)$$

$$\psi_{kd} = x_{kkd} \cdot i_{kd} + x_{akd} \cdot i_d + x_{fkd} \cdot i_f \text{ [pu]} \quad (7)$$

$$\psi_{kq} = x_{kkq} \cdot i_{kq} + x_{akq} \cdot i_q \text{ [pu]} \quad (8)$$

단, p : 미분연산자 (d/dt)  
γ : 회전방향의 A相축에서 d축까지의 電氣角

- $i_{kd}, i_{kq}$  : 제동권선 전류 (d, q축분)
- $x_{khd}, r_{kd}$  : 제동권선 d축 自己리액턴스, 저항
- $x_{kq}, r_{kq}$  : 제동권선 q축 自己리액턴스, 저항
- $x_d, x_q$  : 同期리액턴스 ( $x_d = x_l + x_{ad}, x_q = x_l + x_{aq}$ )
- $x_{ad}, x_{aq}$  : 電機子反作用리액턴스 (d, q축분)
- $x_{afd}$  : 전기자권선과 계자권선간의 d축 相互리액턴스
- $x_{fkd}$  : 계자권선과 제동권선간의 d축 相互리액턴스
- $x_{ffd}$  : 계자권선 自己리액턴스
- $x_{akd}, x_{akq}$  : 전기자권선과 제동권선간의 相互리액턴스 (d, q축분)

위 식에서 제 리액턴스는 單位法으로 표시하면 다음 식과 같다.

$$\begin{cases} x_{afd} = x_{akd} = x_{fkd} = x_{ad} \text{ [pu]} \\ x_{akq} = x_{aq} \text{ [pu]} \end{cases} \quad (9)$$

무한대모선의 전압 U와 발전기의 유도기전력  $E_q$ 와의 位相差를 δ라하면 그림 2에 의하여 다음 식이 성립한다.

$$\begin{cases} U_d = -U \sin \delta \text{ [pu]} \\ U_q = U \cos \delta \text{ [pu]} \end{cases} \quad (10)$$

원동기 PM의 속도는 全負荷에서  $\omega_N$ 일 때에 조속기의 속도설정을 변경하지 않고 無負荷로하면  $\omega_0$ 로 변환다. 따라서 全負荷와 無負荷사이에서  $\omega_0 - \omega_N / \omega_N$ 라는 속도변동율을 가지며 그림 1에 제시된 바와 같이 속도 ω가 피이드백되어 그 제어기구가 1차지연으로 近似하게하면 속도 ω에 대응하는 원동기의 토크  $m_A$ 는 다음 식과 같이 표시된다.

$$m_A = \frac{m_{AN}}{\omega_N - \omega_0} \cdot \frac{\omega - \omega_0}{1 + TP} \text{ [pu]} \quad (11)$$

단,  $m_{AN}$  : 발전기의 定格出力 및 定格速度에 대응하는 원동기의 토크 [pu]

T : 속도조정기의 1차지연 時定數

회轉子系의 운동방정식에서 單位法으로 표시한 회전자속도는 다음과 같다.

$$p\gamma = \omega \text{ [pu]} \quad (12)$$

$$\tau \cdot p\omega = m_A + m_E \text{ [pu]} \quad (13)$$

$$\tau = 4\pi f \cdot H \quad (14)$$

단, H : 단위관성정수  
식 (13)에서  $m_E$ 는 발전기의 전기가 발생 토크

이며 운전시에는 軸에 대하여 制動作用을 하므로 다음과 같이 負의 값을 취한다.

$$m_E = -\psi_a \cdot i_q + \psi_q \cdot i_a \quad (\text{pu}) \quad (15)$$

2.2 시스템의 動特性

식 (1) ~ (10), (12), (13)에 의하여 발전기의 動特性은 각 전류의 미분과 회전자의 속도 및 가속도에 관한 연립방정식으로 다음과 같다.

$-(x+x_d)$		$-x_{ad}$	$-x_{ad}$		$-(x+x_q) i_q$	$p i_a$	=	$-U \sin \delta + r_a \cdot i_a$
	$-(x+x_q)$			$-x_{aq}$	$(x+x_d) i_a + x_{ad}$	$p i_q$		$U \cos \delta + r_a \cdot i_q$
$x_{ad}$		$x_{fjd}$	$x_{ad}$		$\cdot i_q + x_{ad} \cdot i_{kd}$	$p i_f$		$U_f - r_f i_f$
$x_{ad}$		$x_{ad}$	$x_{kka}$			$p i_{ka}$		$-\Gamma_{ka} \cdot i_{ka}$
	$x_{aq}$			$x_{kka}$		$p i_{ka}$		$-\Gamma_{ka} \cdot i_{ka}$
					$1$	$p \gamma$		$\omega$
						$p \omega$		$m_a + m_E$
					$\tau$			

식 (16)에서  $\delta$ 는 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 무한대모선 U의 同轉磁界 축과 발전기의 同轉子 축사이의 각으로  $\delta_0$ 를 初期值,  $\gamma$ 를 同轉子가 t 초간에 회전한 각, t를 同轉磁界가 t초간에 회전한 각(동기속도이고 회전자의 회전방향과는 반대방향) 이라면 다음과 같다.

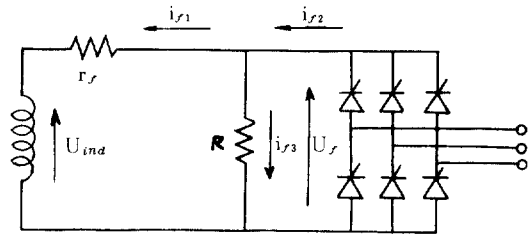
$$\delta = \delta_0 - \gamma - t \quad (\text{rad}) \quad (17)$$

따라서, 각 시작마다 이  $\delta$ 의 값을 계산하여 식 (16)의  $\delta$ 값을 새로운 값으로 변환해야 한다.

그리고 계산기법상 발전기의 투입을 다음과 같이 시뮬레이션하였다. 투입 전의 線路리액턴스 X는 발전기의 同期임피던스  $x_d$ 의  $10^4 \sim 10^5$ 배로 하고 투입시점에서 실제의 線路리액턴스  $x_e$ 로 변경하였다. 이와 같이 하면 同期投入 전에는 발전기가 실질적으로 무한대모선과 분리된 상태로 되어 리액턴스 X의 값을 변경하고 회로의 구성은 변경하지 않고도 과도현상을 계산할 수 있다. 그리고 투입 전의 리액턴스 X를 아주 큰 값으로 설정하면 그림 2에서  $I_a, I_q$ 는 극히 작은 값으로되어 발전기의 단자전압  $U_g$  (점 B)는 사실상 발전기의 무부하 단자 전압  $E_q$ 와 一致한다. 따라서 발전기의 負荷角  $\theta$ 는 零으로 볼 수 있기 때문에 U와  $E_q$ 와의 位相差  $\delta$ 가 투입시의 무한대모선과 발전기사이의 位相角으로 된다.

3. 界磁異常電壓

정지여자형 동기발전기에 있어서 계자회로에 과도적으로 負의 계자전류가 흐르면 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 정류기에 의해서 逆流가 阻止되기



- $i_{f1}$  : 계자권선 전류 [pu]
- $i_{f2}$  : 정류기 출력전류 [pu]
- $i_{f3}$  : 정상시 방전저항전류 [pu]
- $r_f$  : 계자권선 저항 [pu]

그림 3. 계자회로의 구성

Fig. 3. Composition of field circuit.

때문에 계자권선에는 電機子의 가속변화에 따르는 異常電壓이 발생한다. 따라서 계자권선과 병렬로 放電抵抗을 삽입하여 逆流회로를 구성하고 계자 쇠교사속의 변화를 완화시켜 이를 억제하고 있다. 그러나, 負의 과도전류가 과다하면 放電抵抗에 의한 억제효과는 상실되고 높은 異常電壓으로 인하여 정류기 또는 계자권선의 절연이 파괴될 수도 있다. 따라서 이 문제의 시뮬레이션을 다음과 같이 구분하였다.

우선, 직류여자기를 사용한 경우에 발전기와 무한대모선과의 周波數差는 零으로 설정하고 兩者間의 位相差  $\delta$ 와 電壓比  $E_q/U$ 의 값을 파라미터로하여 同期投入시의 계자전류가 과도적으로 負의 값을 가지는 영역을 계산하였다. 다음에 계자유도기전력  $U_{ind}(d\psi_f/dt)$ 와 계자인가전압  $U_f$ 과의 대소관계에 따라서 계자회로의 구성을 그림 4.1, 4.2와 같이 두

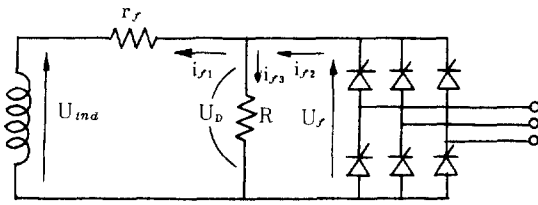


그림 4.1.  $i_{r1} + i_{r3} \geq 0$ 인 경우  
Fig. 4.1. In case of  $i_{r1} + i_{r3} \geq 0$ .

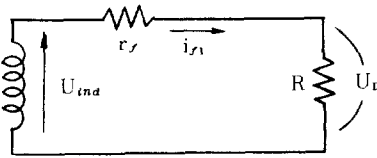


그림 4.2.  $i_{r1} + i_{r3} < 0$ 인 경우  
Fig. 4.2. In case of  $i_{r1} + i_{r3} < 0$ .

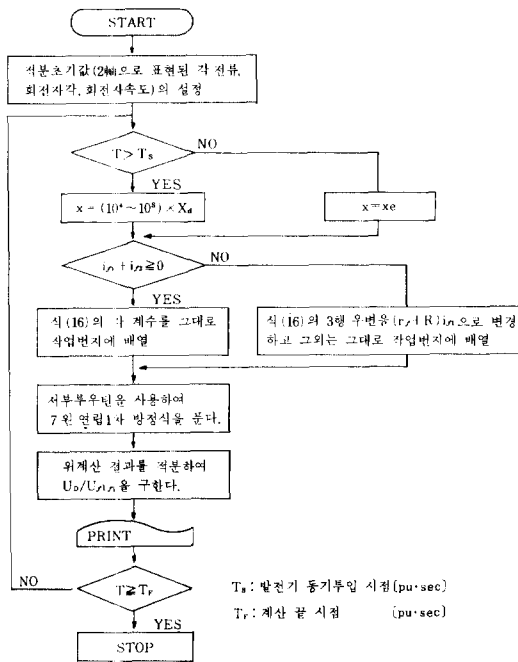


그림5. 계산 흐름도  
Fig. 5. Algorithm flow chart.

가지 경우로 구분하고 각각의 경우에 따라식 식(16)의 일부분을 변경하여 정지형여자기로 여자하였을 때의 과도상태를 검토하였다. 그림4·1, 4·2를 고려한 계산흐름도는 그림 5 와 같다. 그림 5 의 시스템

은 시뮬레이션 言語로 기술하였고 서브루틴을 포함하는 부분만은 포트트랜 言語를 사용하였다.

(1)  $i_{r1} + i_{r3} \geq 0$ 인 경우

㉠ 그림4·1에서  $U_r$ ,  $U_{mda}$ ,  $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$ ,  $i_{r3}$ 의 방향을 모두 正의 값으로 취한다.

㉡ 放電抵抗 R의 단자전압  $U_D$ 는  $U_D = U_r = R \cdot i_{r3}$

㉢ 정류기전류  $i_{r2}$ 는  $i_{r2} = i_{r1} + i_{r3}$

㉣ 이때에  $U_r$ 와  $U_D$ 와의 관계는  $U_D/U_r = 1$

(2)  $i_{r1} + i_{r3} < 0$ 인 경우.

㉠ 그림4·2에서  $U_{mda}$ 가 증가하여  $i_{r1}$ 이 반대방향으로되고 크기가  $i_{r3} = U_r/R$ 보다 더 커지면 방전저항전류는  $U_{mda}$ 쪽에서 공급된다. 그리고  $U_D = |R \cdot i_{r1}| > U_r$ 로 되기 때문에 정류기는 분리된 상태로 된다.

㉡ 이때에  $U_r$ 와  $U_D$ 와의 관계는

$$U_D/U_r = R \cdot i_{r1}/U_r \equiv \text{界磁異常電壓}$$

#### 4. 계산결과 및 고찰

대용량의 수차발전기를 線路リアクタ스를 통해서 일기 무한대모선에 同期投入할때에 과도적으로 발생하는 界磁異常電壓에 관한 시뮬레이션을 하였다. 시스템의 諸定數는 표 1과 같다. 계산기는 UNIVAC 1100/60B, 시뮬레이션 言語는 CSSL1100, 프로

표 1. 諸定數 單位 [pu]

Table 1. Constants (used for computation) unit : [pu]

d축 同期リアクタ스	$X_d$	0.966
d축 電機子反作用リアクタ스	$X_{ad}$	0.824
q축 同期リアクタ스	$X_q$	0.636
q축 電機子反作用リアクタ스	$X_{aq}$	0.494
계자권선 自己リアクタ스	$X_{fjd}$	1.094
제동권선 d축 自己リアクタ스	$X_{khd}$	0.945
제동권선 q축 自己リアクタ스	$X_{kfq}$	0.691
전기자 저항	$\Gamma_a$	0.00393
계자권선 저항	$\Gamma_f$	0.00052
제동권선 d축 저항	$\Gamma_{hd}$	0.018
제동권선 q축 저항	$\Gamma_{hq}$	0.023
무한대모선 전압	U	1.0
線路リアクタ스(投入선)	$X_1$	96600
線路リアクタ스(線路고유)	$X_2$	0.12
무부하 속도	$\omega_0$	1.0
정격 속도	$\omega_N$	0.97
원동기의 토오크	$m_{AN}$	1.0
단위관성 정수	H[S]	4.0
원동기의 속도조정율	[%]	3.0
원동기의 제어계 時定數	T[S]	0.03

그림 중에서 사용한 積分法은 Runge-Kutta/Adams 법이다. 그림 7~10까지의 출력 시간간격은 0.01초 (單位法, 실 시간은  $1/120\pi$ 초)로 선정하였다.

먼저, 직류여자기를 사용한 경우에 수차발전기와 무한대모선과의 周波數는 동일한 값으로 설정하고 兩者間の 位相差와 電壓比  $E_d/U$ 를 파라미터로 하여 同期投入時에 계자전류가 負로 되는 임계 값을

계산하여 프릇한 것이 그림6이다. 이 그림에서 실선의 안쪽부분은 정지형여자기를 사용하는 경우에 계자회로에 異常電壓이 발생하는 영역이다. 다음에 이 영역내의 점P ( $\delta=0^\circ E_d/U=0.6$ ), 점Q ( $\delta=0^\circ E_d/U=0.5$ )에 있어서 放電抵抗 R의 값을 계자권선 저항  $r_f$ 의 1, 10, 100, 1000배로 설정하고 각각의 경우에 異常電壓에 관한 시뮬레이션을 하였다. 그

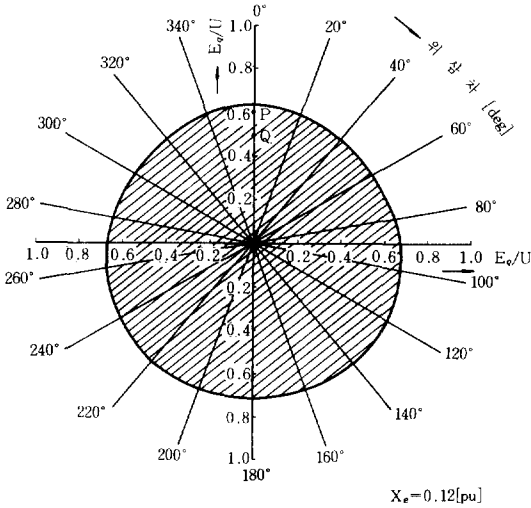


그림6. 계자이상전압 발생영역  
Fig. 6. Region of induced abnormal field voltage.

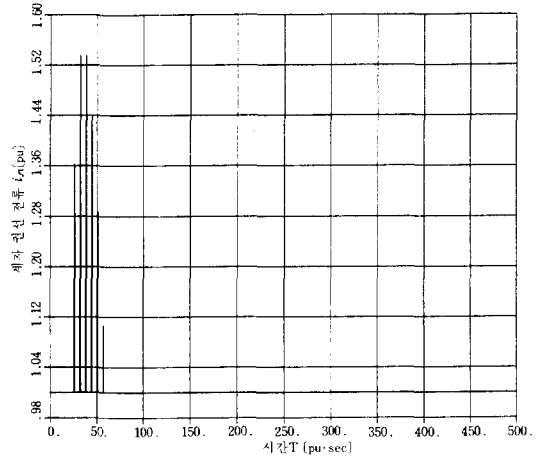


그림8. 계자이상전압 (점P, 방전저항 10배)  
Fig. 8. Abnormal field voltage (point P, discharge resistance magnification : 10).

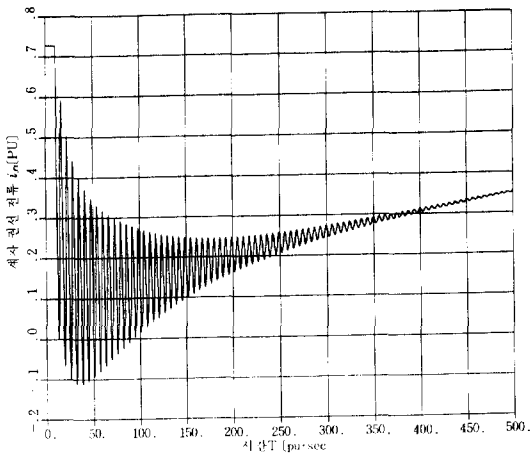


그림7. 계자권선 과도전류 (점P, 방전저항 10배)  
Fig. 7. Transient current in the field winding (point P, discharge resistance magnification : 10)

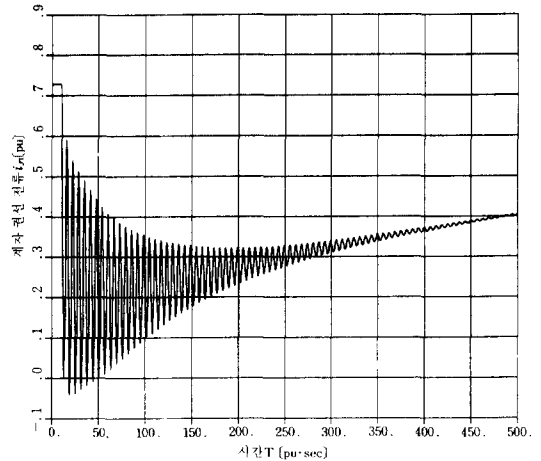


그림9. 계자권선 과도전류 (점P, 방전저항 1000배)  
Fig. 9. Transient current in the field winding (point P, discharge resistance magnification : 1000)

림 7, 8, 9, 10은 점P에 관한 결과이고 그림11은 점 P와 점Q에 있어서 放電抵抗 R와 界磁異常電壓  $U_a/U_f$ 와의 관계이다.

(1) 계자전류가 작고  $U_f/R = i_{r3}$ 보다 큰 값을 취하는 시각과 異常電壓 발생시각이 一致되어 理論과 잘 대응한다(그림 7과 8, 9와10).

(2) 그림11에서는 放電抵抗 값이 동일한 경우에 점Q에서는 점P보다 더 큰 異常電壓이 발생함을 알 수 있다. 또 점P, Q 어느쪽이든 放電抵抗 값이 증

가함에 따라서 異常電壓이 증대되었다. 이는 逆流 回路의 저항 값이 증가함에 따라서 電機子측에서 자속쇄교의 변화를 억제하는 역할을 하는 유도전류가 감소되기 때문이다.

(3)  $\delta=0^\circ$   $E_a/U=0.65$ 에서는 放電抵抗이 계자권선저항  $r_f$ 의 1000배되는 값에서도 異常電壓은 발생하지 않았다.

(4) 점P, Q에서 放電抵抗이 계자권선저항  $r_f$ 의 10배되는 값일때 발생하는 異常電壓은 계자인가전압  $U_f$ 의 1.537배, 6.864배였다(그림11 참조). 실제의 경우에 점Q와 같은 조건하에서는 보호장치를 통해서 同期投入을 피하고 있지만 점P와 같은 임계값 즉, 무한대 모선과 동기발전기 사이의 位相差가  $0^\circ \sim 40^\circ$ , 電壓比가 0.633~0.614범위내에서는 동기투입을 할 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 이와 같은 임계값 부근, 예컨대  $\delta=0^\circ$   $E_a/U=0.6$ 에서 발생하는 界磁異常電壓은 계자인가전압의 1.5배 정도이고 가장 알맞는 放電抵抗값은 계자권선 저항의 10배 미만으로 나타났다.

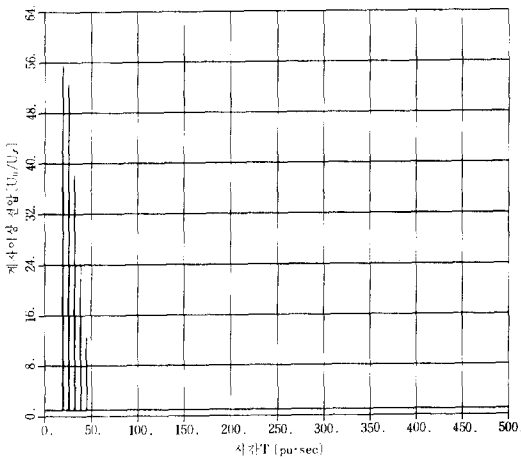


그림10. 계자이상전압(점P, 방전저항 : 1000배)  
Fig. 10. Abnormal field voltage (point P, discharge resistance magnification : 1000).

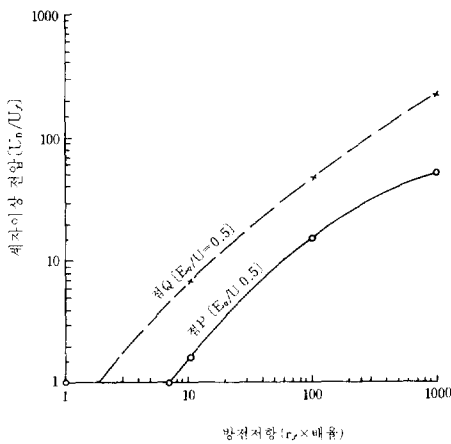


그림11. 방전저항과 계자이상전압의 배數  
Fig. 11. Magnification of abnormal field voltage and discharge resistance.

### 5. 결론

정지형여자기로 여자되는 대용량의 수차발전기를 일기 무한대모선에 同期投入할 때에 계자회로에 과도적으로 발생하는 異常電壓과 그 억제효과에 관한 시뮬레이션을 하였다. 본 연구를 통하여 계자회로에 병렬로 삽입하는 放電抵抗의 값은 계자권선저항의 10배를 넘지 않을 때에 界磁異常電壓의 억제효과가 가장 크다는 것을 알았다. 아울러 放電抵抗은 정상시에 전력손실의 원인이 되므로 이를 非線形素子로 대체할것을 검토해 볼만한 가치가 있다고 사료된다.

### 참고 문헌

- 1) 井炳道, 李元教 외, “同期投入 과도현상의 시뮬레이션”, 電氣學會夏季學術會議, pp. 68~69, 1983
- 2) 李承院, 李允鍾, “電氣機器”, 文運堂, 1981, pp. 159~161
- 3) 新田目 倭造, “電力系統技術計算의 應用”, 電氣書院, 1981, pp. 91~119
- 4) 小田 莊一, “同期機의 二反作理論과單位法”, 職業訓練教材研究會, 1981, pp. 19~24
- 5) M. E. Talaat, “A new approach to the calculation of synchronous machine reactance”, part I,

- AIEE Trans, vol. 75, pt III, pp. 176~183, 1955  
part II, AIEE Trans, vol. 76, pt III, pp. 317~  
327, 1956
- 6) Kohichi Nakamura, "Analysis and tests in a-  
synchronized-synchronous operation of dual -  
excited generator in power system", JIEE, vol.  
104, No. 6, pp. 365~372, 1984
- 7) IEC std, pub. 34-10, "Rotating electrical  
machines. part 10, convention for description of  
synchronous machines", 1975
- 8) C. Concordia, "Synchronous machines", Mc-G  
row Hill, 1951, pp. 32~46