

[그림 18] Allowable Pressure at Turbine Exhaust

- 터빈 배기온도(Turbine exhaust temperature)
터빈 배기온도(Turbine exhaust temperature)는 10~12MW로 운전 중인 기간은 60℃정도로 안정적이거나, 출력을 1MW로 낮춘 이후부터는 65~80℃로 변화(Hood spray system 작동)가 있었지만 경보(Alarm: exh. temp. max permanently 85℃ & for 1 hour max, 85~105℃) 이내의 범위였다.
- 터빈 배기압력(Turbine exhaust pressure)
터빈 배기압력(Turbine exhaust pressure)은 10~12MW로 운전 중인 기간은 -0.787~-0.812 kg/cm² 범위이고, 출력을 1MW로 낮춘 이후부터는 0.759~-0.827kg/cm² 정도로 다소 변화되었다.

70% 부하 이상에서는 정상 범위이지만 40% 부하 이하에서는 -0.8kg/cm²가 단시간 동안만 운전이 허용된 영역(for short time operation only)과 장기간 운전 허용영역(allowable for continuous operation)의 경계이므로 경계를 넘나들며 운전되었음을 알 수 있다.

○ 터빈 트립(Trip) 5시간 전(前) 배기압력 추이 분석

터빈 트립(Trip) 약 5시간 전 약 1MW로 운전되었고, 이 기간 중 배기압력(Exhaust Press.)은 269min 동안은 장기간 운전허용영역(allowable for continuous operation)에서 운전되었지만, 89min 동안은 짧은시간 동안만 운전이 허용된 영역(for short time operation only)에서 운전됨.

[표 2] 허용 출력별 운전시간

Exhaust Press. (kg/cm ² a)	Operating Hours (min)	Remarks
0.17~0.20	269 min	allowable for continuous operation (장기간 운전허용영역)
0.20~0.24	89 min	for short time operation only (단시간 운전허용영역)
Total	358 min	

동기 발전기 능력곡선에 대한 기술



한전전력연구원
수화력발전연구소 I&C 그룹
그룹장/공학박사 임익현
Tel : (042)865-5390

정되어 있다. 여기서는 주로 전기적 현상에 의해서 발생하는 열로 인한 발전기의 능력한계를 설명하려고 한다. 고정자 전류에 의한 한계, 계자전류에 의한 한계, 과도한 진상운전으로 인한 누설자속에 의한 고정자 단부과 열에 기인하는 한계, 발전기 정태안정 한계 등을 고려해서 발전기의 능력곡선 내에서 안정되게 운전되어야 한다. 따라서 이와 관련된 여러 가지 기술적 사항들을 기술하고자 한다.

1.1 동기 발전기와 능력곡선

동기발전기는 자신이 출력할 수 있는 능력 한계가 설

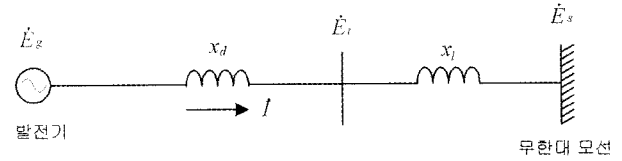
1.1.1 발전기 수소가스압력 변화에 의한 특성

수소가스압력을 0.5psig^{주1)} (0.035kg/cm² · g)에서

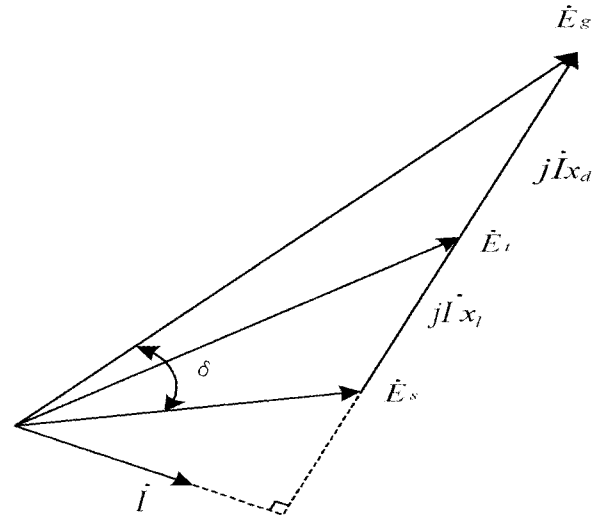
15psig(1.05kg/cm²·g)로 상승한 경우, 출력을 15% 정도 증가할 수 있고, 20 ~ 30psig(1.41 ~ 2.1kg/cm²·g)정도로 상승하면, 20 ~ 30%정도로 증가할 수 있다.^{주2)} 이것은 혼류에 의한 강제대류상태에서는, 표면 열전달율^{주3)}은 그 주위의 가스압력의 0.75승에 비례하고, 가스의 열전도율^{주4)}은 압력에는 관계가 없고, 가스체의 열용량이 밀도에 비례해서 증가하고, 가스의 온도상승이 가스의 절대압력에 역비례해서 감소하고, 냉각효과가 좋게 되기 때문이다. 냉각효과의 향상은, 코일의 온도상승을 억제하고 전류를 많이 흐르게 할 수 있고, 전류용량이 크게 된다. 물론 가스체의 밀도에 비례하는 기계손실도 감소한다. 출력증가는 발전기전류의 증가, 즉 전기장의 증가에 의해서, 표유 부하손이나 여자손이 증가하고, 철손이나 기계손이 감소한다. 전기장의 증가는, 코일량이 많은 철심량의 작은 동기계로 SCR(단락비)는 작게 된다. 출력증가는 수소가스압력 1psig(0.0703kg/cm²·g)증압에 대해 1%정도이다. 기내의 수소가스압력의 상승에 의해 어느 정도의 발전기 용량증가가 가능하게 되지만, 수소가스를 회전자와 고정자간에 밀봉하고, 절연피복을 개입해서 발열량을 수소가스에 주도록 하는 냉각 방식은 절연물의 열 저항이 냉각작용을 억제하고, 코일자체도 수소가스 압력이 어느 정도 이상이 되면 도체 주변의 절연물이 열에 대해 불량 도체^{주5)}인 것이 영향 받고, 어느 정도 이상의 용량 증가는 기대할 수 없게 된다. 또, 수소가스와 도체절연물간의 열전도가 수소가스압력을 상승해서도 변화하지 않게 되든지, 절연물의 온도강하가 도체의 온도상승의 대부분을 차지하게 되고, 용량을 증가하기에는 수소가스압력의 상승과 함께, 코일 도체를 직접 냉각할 필요가 생기는 것은 이 때문이다.

1.1.2 발전기 가능 출력 곡선

[그림 1]과 같이 발전기가 무한대 모선^{주6)}에 접속되고 있는 경우를 생각한다.



[그림 1] 1기 무한대 모선 회로도



[그림 2] 1기 무한대 모선 벡터도

- \dot{E}_g : 발전기의 내부유기전압
- \dot{E}_t : 발전기의 단자전압
- \dot{E}_s : 계통측 모선전압
- x_d : 발전기의 동기 리액턴스
- x_l : 변압기 및 송전선의 리액턴스^{주7)}

\dot{E}_s 를 기준으로 벡터도는 [그림 2]와 같이 되고

$$\dot{E}_g = \dot{E}_s + j\dot{I}(x_d + x_l) \quad (1.1)$$

주1) psi : Pounds per square inch

일반적으로 사용되고 있는 압력측정계기에서는 실제압력 즉, 절대압력을 나타내지 않고, 대기 압력의 차이를 나타내고 있다. 대기 압력을 표준으로 해서 측정된 압력을 gauge압력이라고 하고 있지만, 이 gauge압력을 표시하기 위한 기호, 표준으로서는 1psig=0.0703kg/cm²·g을 표시하고 있다.

주2) maker의 실험결과에 의한다.

주3) 단위 시간 내에 냉각되는 물체의 단위표면적에서 단위온도차에 있어서 냉각모체에서 가져가버리는 열량

주4) 단위 시간 내에 냉각되는 물체의 단위표면적에서 단위온도차에 있어서 냉각 모체 내에서 단위거리에 단위온도차가 있는 경우에 흐르는 열량

주5) 권선에서 사용되는 절연물은 전기적 절연물과 동시에 열의 절연물에 가까워서 권선 중에 발생하는 열을 절연물을 개입해서 강탈하기에는 매우 큰 온도 분배를 필요로 한다.

주6) 전력계통공학에서 취급하는 가상의 모선에서 용량이 매우 크고, 임피던스가 영인 계통이라고 상정한다.

주7) 통상의 계통에서는 리액턴스가 매우 크고 저항 분은 무시하는 것으로 생각한다.

또, 발전기단자에서 보면,

$$\dot{E}_g = \dot{E}_t + j\dot{I}x_d \quad (1.2)$$

\dot{E}_g 와 \dot{E}_s 간의 위상각을 δ 로 하면,

$$\dot{E}_g = E_g e^{j\delta} = E_g(\cos\delta + j\sin\delta) \quad (1.3)$$

(1)식과 (3)식에서

$$\begin{aligned} \dot{E}_s + j\dot{I}(x_d + x_l) &= E_g(\cos\delta + j\sin\delta) \\ \therefore \dot{I} &= \frac{1}{x_d + x_l} [E_g \sin\delta - j(E_g \cos\delta - \dot{E}_s)] \end{aligned} \quad (1.4)$$

발전기 단자전압 \dot{E}_t 는 (4)식에서 I값을 대입해서 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{E}_t &= \dot{E}_s + j\dot{I}x_l \quad (\dot{E}_s = E_s e^{j\delta}) \\ &= \frac{1}{x_d + x_l} [(x_l E_g \cos\delta + x_d E_s) + jx_l E_g \sin\delta] \end{aligned}$$

발전기 출력 W는,

$$\begin{aligned} W &= P + jQ = 3\dot{E}_t \cdot \bar{I} \quad \text{※8)} \\ &= \frac{3}{x_d + x_l} [(x_l E_g \cos\delta + x_d E_s) + jx_l E_g \sin\delta] \\ &\quad \times \frac{1}{x_d + x_l} [E_g \sin\delta + j(E_g \cos\delta - E_s)] \end{aligned}$$

이것을 계산하면,

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{x_d + x_l} E_g \cdot E_s \sin\delta \\ Q &= \frac{3(x_l E_g^2 - x_d E_s^2) + 3(x_d - x_l) E_g E_s \cos\delta}{(x_d + x_l)^2} \end{aligned}$$

선간전압으로 나타내고, $v_g = \sqrt{3} E_g$, $v_s = \sqrt{3} E_s$ 를 대입한다.

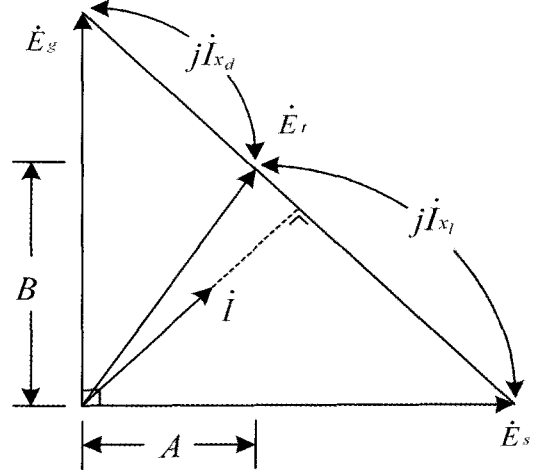
$$P = \frac{v_g \cdot v_s}{x_d + x_l} \sin\delta \quad (1.5)$$

$$Q = \frac{(x_l v_g^2 - x_d v_s^2) + (x_d - x_l) v_g v_s \cos\delta}{(x_d + x_l)^2} \quad (1.6)$$

정태안정도는 위상각 δ 가 90° 를 넘으면 동기화력이 마이너스가 되고, 발전기는 탈조해 버린다. 그 한계는 $\delta = 90^\circ$ 로, [그림 3]과 같은 벡터를 그릴 수 있다. 이 때의 유효전력을 P_m , 무효전력을 Q_m 으로 하면

$$P_m = \frac{v_s \cdot v_g}{x_d + x_l} \quad (1.7)$$

$$Q_m = \frac{(x_l v_g^2 - x_d v_s^2)}{(x_d + x_l)^2} \quad (1.8)$$



[그림 3] 1기 무한대 모션 벡터도($\delta=90^\circ$)

[그림 3] 벡터도에서

$$\begin{aligned} \frac{x_d \dot{I}}{A} &= \frac{(x_d + x_l) \dot{I}}{\dot{E}_s} \quad \therefore A = \frac{x_d}{x_d + x_l} \cdot \dot{E}_s \\ \frac{x_l \dot{I}}{B} &= \frac{(x_d + x_l) \dot{I}}{\dot{E}_g} \quad \therefore B = \frac{x_l}{x_d + x_l} \cdot \dot{E}_g \end{aligned}$$

따라서,

$$\begin{aligned} E_t^2 &= A^2 + B^2 = \left(\frac{x_d}{x_d + x_l} E_s\right)^2 + \left(\frac{x_l}{x_d + x_l} E_g\right)^2 \\ &= \frac{(x_d E_s)^2 + (x_l E_g)^2}{(x_d + x_l)^2} \end{aligned}$$

선간전압으로 나타내면,

$$= \frac{(x_d v_s)^2 + (x_l v_g)^2}{(x_d + x_l)^2} \quad (1.9)$$

v_g^2 및 v_s^2 를 구하기 위해, Q_m 과 v_t^2 를 연립방정식으로 풀면,

$$\begin{aligned} Q_m (x_d + x_l)^2 &= x_l v_g^2 - x_d v_s^2 \\ v_t^2 (x_d + x_l)^2 &= (x_l v_g)^2 + (x_d v_s)^2 \\ \therefore v_g^2 &= \frac{(x_d + x_l)(v_t^2 + x_d Q_m)}{x_d} \\ \therefore v_s^2 &= \frac{(x_d + x_l)(v_t^2 - x_l Q_m)}{x_d} \end{aligned}$$

가능출력곡선의 중심위치와 반경을 구하기 위해 (7)식을 변형한다.

$$\begin{aligned} P_m^2 &= \frac{v_g^2 \cdot v_s^2}{(x_d + x_l)^2} = \frac{(v_t^2 + x_d Q_m)(v_t^2 - x_l Q_m)}{x_d \cdot x_l} \\ &= \frac{v_t^4 + Q_m(x_d - x_l)v_t^2 - x_d x_l Q_m^2}{x_d \cdot x_l} \end{aligned}$$

주8) 의 공역치이다.

다시,

$$P_m^2 + [Q_m^2 - (\frac{v_l^2}{x_l} - \frac{v_l^2}{x_d})Q_m - \frac{v_l^4}{x_d x_l}] = 0$$

$$\therefore P_m^2 + Q_m^2 - Q_m(\frac{1}{x_l} - \frac{1}{x_d})v_l^2 = \frac{v_l^4}{x_d x_l} \quad (1.10)$$

여기에서, 원의 방정식을 구하기 위해

$$[Q_m - \frac{v_l^2}{2}(\frac{1}{x_l} - \frac{1}{x_d})]^2$$

$$= Q_m^2 - Q_m(\frac{1}{x_l} - \frac{1}{x_d})v_l^2 + \frac{v_l^4}{4}(\frac{1}{x_l} - \frac{1}{x_d})^2 \text{ 로 하면, (10)식은}$$

$$P_m^2 + [Q_m - \frac{v_l^2}{2}(\frac{1}{x_l} - \frac{1}{x_d})]^2 - \frac{v_l^4}{4}(\frac{1}{x_l} - \frac{1}{x_d})^2 = \frac{v_l^4}{x_d x_l}$$

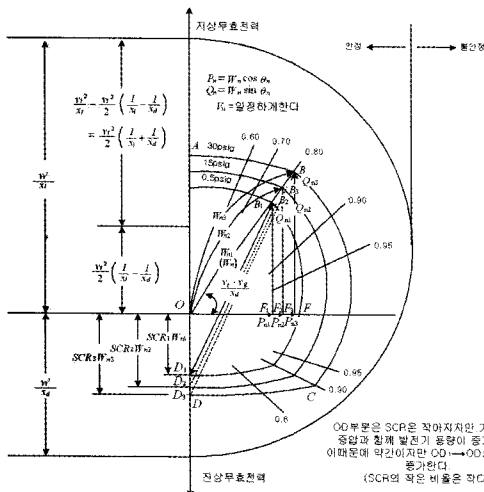
으로 변형할 수 있다.

$$\therefore P_m^2 + [Q_m - \frac{v_l^2}{2}(\frac{1}{x_l} - \frac{1}{x_d})]^2 = \frac{v_l^4}{4}(\frac{1}{x_l^2} - \frac{2}{x_d x_l} + \frac{1}{x_d^2}) + \frac{v_l^4}{x_d \cdot x_l}$$

$$\therefore P_m^2 + [Q_m - \frac{v_l^2}{2}(\frac{1}{x_l} - \frac{1}{x_d})]^2 = [\frac{v_l^2}{2}(\frac{1}{x_l} + \frac{1}{x_d})]^2 \quad (1.11)$$

(11)식은, 중심위치 $[0, \frac{v_l^2}{2}(\frac{1}{x_l} - \frac{1}{x_d})]$

반경 $\frac{v_l^2}{2}(\frac{1}{x_l} + \frac{1}{x_d})$ 으로 하는 원을 그리는 것을 나타내고 있다. 그 개략도는 [그림 4]와 같이 된다. [그림 4]에는 발전기의 운전제약요인도 병행해서 나타내고 있다.



[그림 4] 발전기 정상상태안정곡선

주9) 고정자 코일에 흐르는 전류에 의한 열용량에서의 제한이 된다.

주10) 발전기의 계자전류는 상시지연 역률측에서 운전하고 계통의 전압을 상승시키도록 운전을 하지만, 심야라든지 정월, 황금주간 등의 특이기간에는 부하가 감소하고, 계통의 전압이 상승해서, 이것을 한도 내에 모으기 위해 계자전류를 감소하고 진상측 역률로 운전하고 있다. 이것을 진상운전이라고 한다.

주11) 어떤 1종의 변색tape로 해당부분의 온도가 정해진 감시 값보다 상승한 경우에는 tape 자체색이 변색하고, 예를 들면 50℃로 정상색이 황색이었던 것이 70℃에서는 경계값인 적색으로 변색해서, 운전원에 주의를 재촉하는 것 같은 상태변화를 한다.

정격역률, 정격출력시의 운전 점은 30psig를 예로하면 B점으로, 이때의 발전기정격출력을 W_n 으로 하면 ($W_n = \sqrt{3} V_n \cdot I_n [VA]$) 또, 유효전력은 $\overline{OF} = P_n = W_n \cos \theta_n [W]$, 무효전력은 $\overline{BF} = Q_n = W_n \sin \theta_n [var]$ 이 된다.

1.1.3 발전기의 운전을 제약하는 요인

제약요인에는 다음의 3 가지가 있다.

- ① \widehat{AB} 부분의 여자기용량에 의해 받는 제약
- ② \widehat{BC} 부분의 고정자 코일에 흐르는 전류에 의한 제약
- ③ \widehat{CD} 부분의 진상용량에 의한 제약

\widehat{AB} 부분은, 계자전류에 의한 제한범위로, 이 부분은 $\overline{DB} = \frac{v_l \cdot v_g}{x_d}$ 을 반경으로 하고, $\overline{OD} = SCR \cdot W_n$ 을 중심으로 하는 원으로 그릴 수 있다. 여서 SCR(Short Circuit Ratio)은 단락비 이다. 계자전류의 증가는, 회전자 코일의 온도상승에 의해 제한되는 범위이다. 실제로는 여자기용량 이외에 온도상승 등이 되는 기계적 스트레스로부터 제한된다. \widehat{BC} 부분은 전기자 권선^{주9)}의 온도상승에 의해 제한되는 범위로, $\overline{OB} = W_n$ 즉, 발전기 정격용량을 반경으로 하는 원으로 그릴 수 있다. \widehat{CD} 부분은, 진상 역률전류^{주10)}에서는 계자전류가 감소하고, 코일 단부에 큰 영역 누설자속을 생기게 하는 단부를 가열하는 원인이 되는 범위이다. 이부분의 과열의 정도는 확인이 곤란하기 때문에 이 부근에 Thermotape^{주11)}를 첨부해서 온도상승(80~90℃)을 관리하고 있다. 또 \overline{OD} 부분은 진상용량을 나타내고 있고, 이다. OD부분은 SCR은 작아지지만, 가스압력의 증가와 함께 발전기 용량이 증가하고, 이 때문에 약간이지만 $OD_1 \rightarrow OD_2$ 와 같이 증가한다.(SCR이 작은 비율은 작다.)

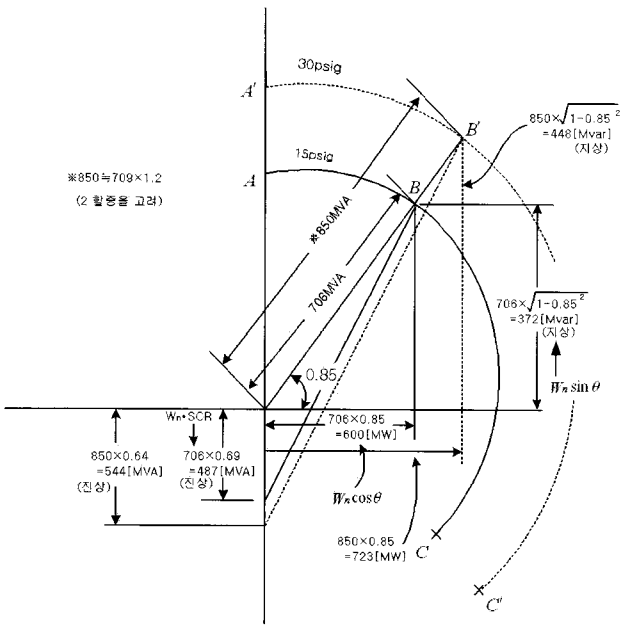
[표 1] 단락비

수소압력(psig)	단락비
0.5	0.8 (SCR ₁)
15.0	0.69 (SCR ₂)
30.0	0.64 (SCR ₃)

수소압력을 증가하면 냉각효과가 좋아지고, 코일의 허용온도가 상승하고, 코일에 흐르는 전류를 더할 수가 있

다. 발전기전압을 일정하게 하면, 전류를 증가시킨 분만 출력을 증가할 수 있다. [그림 4]와 같이 가스압력을 0.5psig에서 15psig로 하면 발전기 출력은 $\overline{OB_2}$ 로 약간 증가한다. 이때의 유효 및 무효전력도 $P_{n1} \rightarrow P_{n2}, Q_{n1} \rightarrow Q_{n2}$ 로 증가한다. 수소가스압력의 상승에 의해 발전기 정격출력을 $W_{n1} \rightarrow W_{n2} \rightarrow W_{n3}$ 로 더할 수 있고, 발전기의 정격용량이 수소가스압력의 상승에 의해 약간 변화해 가는 것을 알았다.

이 경우, 계자전류가 약간 크게 되고, 단락비도 [표 1]과 같이 $SCR_1 \rightarrow SCR_2 \rightarrow SCR_3$ 로 변화하고, 약간은 작아진다. 이것은, 수소가스압력의 상승에 의해 냉각효과가 좋아지고, 코일에서의 열손실 제거 효과가 향상되고, 전류용량을 높일 수 있도록 되었기 때문이라고 생각할 수 있다. 이때의 발전기의 진상용량은, [그림 4]의 $\overline{OD_1} \sim \overline{OD_3}$ 부분으로 나타내고, $(SCR_1 W_{n1}) \rightarrow (SCR_2 W_{n2}) \rightarrow (SCR_3 W_{n3})$ 로 변화한다. 예를 들면, 발전기정격용량 706MVA, 정격역률 0.85, 단락비 0.69의 터빈발전기의 경우, [그림 5]와 같이 된다.



[그림 5] 발전기 출력곡선

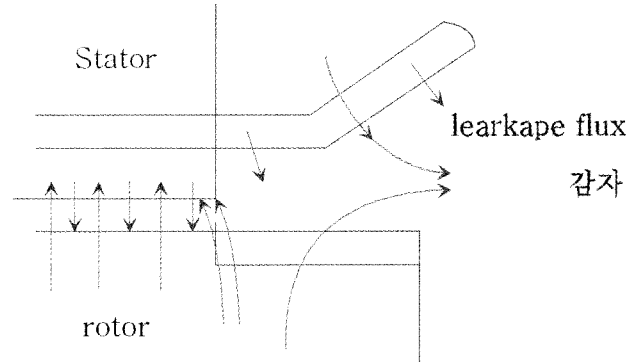
이와 같은 기기의 정격사양은 제작사측도 전력회사측에서 자세한 내용을 협의하고, 설계사양^{주12)}에 기초해서 제작된다. 또, 터빈발전기의 가능출력곡선에는 [그림 4]와 같이 역률 및 가스압력을 병기하도록 하고 있지만, 이것은, 역률에 의한 계자전류가 변화하고, 계자의 온도

주12)

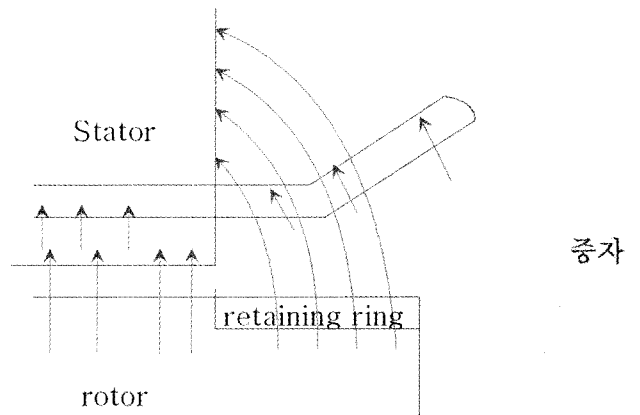
상승에 영향을 받고, 발열량이 변화하는 것과, 수소가스압력에 의한 발전기 용량이 변해 가는 것을 고려한 것이다.

1.1.4 발전기의 저여자 제한 및 계자상실

발전기의 과도한 진상운전은 발전기 고정자 단부의 과열을 초래하므로 제작사로부터 이에 대한 제한 곡선이 제공된다. 발전기 고정자 단부의 과열을 초래하는 진상운전시의 단부의 자속의 흐름은 아래와 같다.



[그림 6] 지상 운전시 고정자 단부

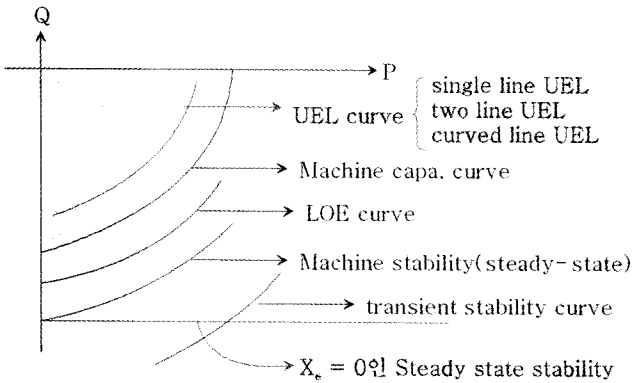


[그림 7] 진상 운전시 고정자 단부

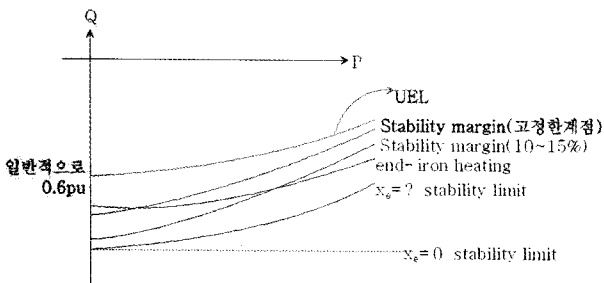
발전기 진상 운전시 위 그림에서 보는 바와 같이 단락환(Retaining Ring)이 포화되지 않기 때문에 고정자 단부로 누설계자자속의 회로가 구성된다. 따라서 고정자 단부에 와전류가 발생하게 되고 이의 결과로써 와전류손(Eddy Current Loss) 열이 발생하게 된다.

[그림 8]은 P-Q평면상에서의 여자시스템의 진상운전영역에 관한 그림이다. 그림에서 정태안정도와 과도안정도사이에 동태안정도가 있게 된다. 그리고 정태안정도보다 거의 비슷하게 안쪽으로 LOE Curve(Loss

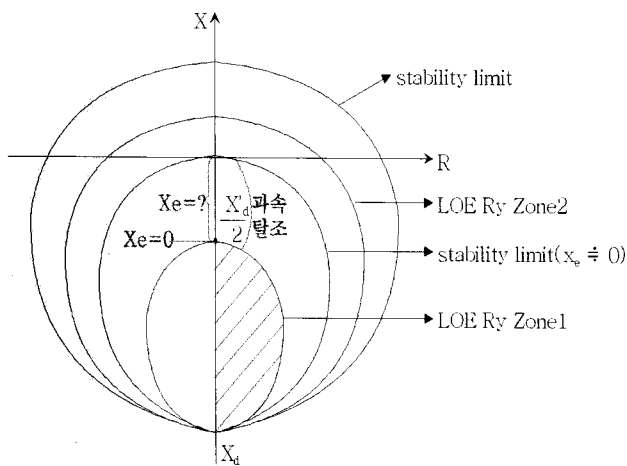
of Excitation)가 있게 되는데, 이는 경보용이다. [그림 9]는 UEL(Under Excitation Limit) 보호선을 어떻게 결정하는 가를 보여주는 그림이다. 그림에서 보듯이 정태안정한계에 10-15% 한계를 두는 안정도 여유선과 기계적인 한계선(End-iron Heating)을 고려하여 결정되게 된다. 안정도 여유는 한계점에서 안전 여유도를 주는 방법과 고정한계점의 2 가지 방법이 있다. 그림에서 고정한계점 방법은 무부하시 여유 35%, 전부하



[그림 8] 발전기 저여자 운전 및 보호한계



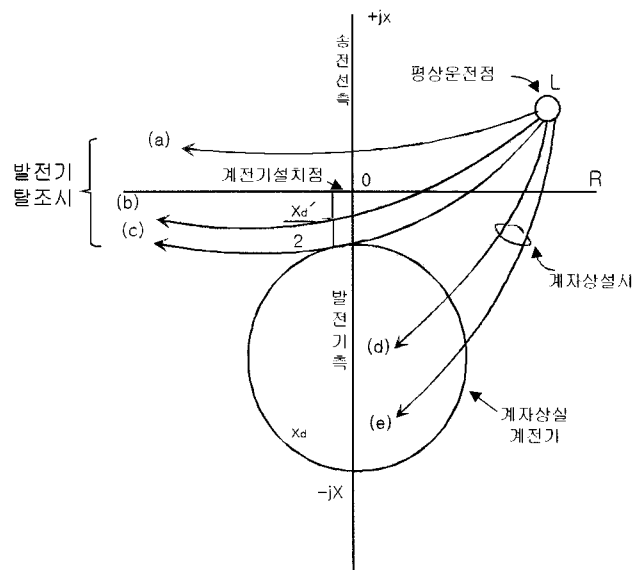
[그림 9] 저여자 결정방법



[그림 10] 임피던스계전기에서의 발전기 저여자

시 여유 20%로 주고 두개의 선을 연결한 것이다. [그림 10]은 P-Q평면상에서의 진상운전을 R-X평면상으로 옮긴 것이다.

일반적으로 계자상실에 대한 보호는 경보와 Trip 2 가지 영역으로 보호되고 있다. 경보영역인 Zone 2는 정태안정도보다 약간 바깥쪽에서 정해지는 곡선으로 문헌을 참조하면 1초후에 경보가 나가게 된다. 이 때 운전자가 이를 감지하고 적절한 조치를 취해야 한다. Zone 1은 탈조(Pole Slip)가 발생한 영역으로 탈조에 이르게 되는 영역이다. 이 때는 0.25초가 지나면 발전기가 Trip 되어야 한다. 결국 자동전압조정장치나 필요시 차단기의 동작에 의하여 0.25초만에 정상운전상태로 복귀되지 않으면 Trip되어야 한다.



[그림 11] 계자상실계전기의 임피던스 특성

발전기의 계자전류, 계자자속이 감소되는 발전기의 운전상태를 감시하고 있는 장치가 계자상실계전기이다. 이는 임피던스가 뒤진 위상측으로 변화하는 것을 감시하고 있다. 계자를 감소시키고 계자전류를 제로로 한 상태가 계자를 상실한 상태이다. 이상과 같은 특성에 의해 계자상실계전기는 [그림 11]에서 원으로 표시한 임피던스 특성으로 되어있으며 임피던스·벡터가 그 안에 들어갔을 때 이 계전기는 발전기가 계자를 상실했다고 판정한다. 이원의 원주는 R, X 좌표의 원점 O부터 떨어져 있으므로 오프셋형·모 릴레이라고 한다.