

發電機의 可能出力曲線에 관한 研究

박성진·남시복

유림ENG 대표이사·용인송담대학 전기설비과 전임강사

A Study on the Generator Capability Curve

Seong-Jin, Park · Si-Bok, Nam

**Abstract** - As our power system has changed the past undeveloped model causing the lacked supply of power to the civilized model that the remained one makes the voltage and the frequency rise at the middle of the night, the leading power factor operation of generators, that is, the under-excited operation is essentially to be needed, so, at a viewpoint of the stability of the power system, it is a very important factor.

In this investigation, the equation of curves for each area on the capability curve has been studied at the above-mentioned viewpoint. Also, each capability curve for the operating power stations (Nuclear P/S, Thermal P/S, Hydraulic & pumping-up P/S Gas turbine P/S) has been presented, and studied whether the leading power factor operational area is able to be expanded or not.

1. 서 론

근간 산업의 발달과 더불어 꾸준히 증가해온 우리의 전력계통은 전력수요의 Peak치에 추종하여 발전소를 건설하면서 기저부하용의 대형 화력발전소와 대형 원자력 발전소가 많이 건설되어 심야시 잉여전력에 의한 저역자 운전, 즉 진상운전이 늘어나면서 주파수상승, 단자전압 상승 및 동기 화력감소 등으로 안정도의 저하를 초래하여 계통이 불안해질 요소를 내재하고 있다. 또한, 많은 지중선로의 건설과 전력용콘덴서의 설치, 초고압선로 (345kV, 745kV)의 확장 등으로 심야시 Ferr anti현상을 유발하여 자기여자현상으로 인한 발전기의 진상영역에서의 운전은 앞으로 더욱 필요로 하게 될 것이다. 이와같이 장래 우리계통에서는 발전기의 진상영역에서의 저역자운전을 많이 필요로 할 것이 사료되어 각 발전기들의 가능출력곡선상의 각 영역, 특히 진상영역의 확대조정은 가능한지 검토해 봐야 할 시점으로 확대조정이 가능하면 많은 조상설비의 절감으로 경제적으로 크게 기여하게 되고, 계통운영도 원활하게 되어 전력구조 개편시 발전소가 분할 매각 된다면, 진상영역의 전력공급능력도 가격산정의 한 요인이 될 것이다. 이러한 관점에서 가능출력곡선의 각 영역의 곡선들은 어떻게 정의되고 있으며, 국내 각 발전소들의 가능출력곡선은 어떻게 구성되어 있고 특성은 어떤지 연구해 보고자 한다.

2. 가능출력곡선의 이론적 고찰

무한대모선에 연결되어 있는 발전기의 모든 정상운전 상태는 일반적으로 그 발전기의 가능출력곡선>Loading capability diagram or Loading capability curve, or operation chart)이라 불리는 하나의 곡선으로 표시된 그림으로 나타내어 질 수 있다. 이 가능출력곡선은

발전기에 적정한 부하 인가와 운전을 책임지고 있는 발전소 운전자에게는 매우 중요한 요소이다. 발전기를 구성하는 도체절연물 및 기타 구조물에는 정해진 온도상승 한계가 있어 운전은 이 범위 내로 제한된다.

발전기 정격출력부근의 운전에서는 전기자전류의 크기에 의한 전기자권선의 온도상승이 문제가 되어, 이 온도상승에 의하여 발전기의 출력이 제한을 받게 된다. 즉, 부하의 크기에 따른 제약을 받는 영역이 된다. 또한 발전기는 이 영역에서 기계적 입력 (터빈, 수차등)인 Prime mover에 의해 최대 출력이 제한되기도 한다.

발전기의 정격역률이하의 지상영역에서는 계자전류의 크기가 증가하기 때문에 계자권선의 온도가 상승한다. 이 온도상승에 의하여 발전기의 지상무효출력이 제한을 받는다. 또 계자전류를 공급하는 여자기의 출력에 의해서도 제한된다.

정격역률을 넘는 진상영역에서는 계자전류가 감소하기 때문에 발생하는 누설자속에 의한 고정자단부의 온도상승에 의한 발전기의 진상무효 출력이 제한을 받게 된다. 또, 발전기를 송전계통에 연계해서 운전하는 경우 발전기의 동기리액턴스 및 계통의 리액턴스에 의해 정해지는 정태안정한계에 의해서도 진상영역에서의 운전이 제한을 받게 되어, 이 영역에서의 운전이 가장 가혹한 조건이 되며, 과거에는 이 영역에서의 운전이 심각하지 않았으나 근간에는 이 영역에서의 운전을 피할 수 없는 상태 (심야시 저역자 운전 등)가 되어 진상영역에서의 운전영역 확보가 가능출력곡선상의 가장 큰 쟁점이 되고 있다.

이 가능출력곡선내에서의 운전영역 확보는 기계자체의 재질, 설계방식, 냉각방식, 기계적입력, 동태안정도 측면의 확장, 보호계전기의 정정 등 여러가지 제약요인들에 의해 한정되어지게 된다.

3. 발전기 요인별 출력한계분석

3.1 전기자권선의 온도상승에 의한 한계

발전기의 단자전압을 일정하게 하고 전기자권선저항을 무시한 경우 운전한계는 그림1과 같은 가능출력곡선으로 나타낼 수 있다.

ab부분(대개 지상역률 0.85~진상역률 0.95)은 전기자권선(Armature winding coil)의 온도상승에 의해 제한되는 영역으로 발전기 전류 I가 발전기 정격전류 In 보다 적은 범위이다.

$$I \leq I_n \tag{1}$$

정격전압을 Vn이라 하고, 표로 나타내면

$$P^2 + Q^2 = (VnI)^2 \leq (VnI_n)^2 = Wn^2 \tag{2}$$

즉, 원점을 중심으로 정격용량 Wn(MVA)을 반경으로 하는 원의 내부이다.

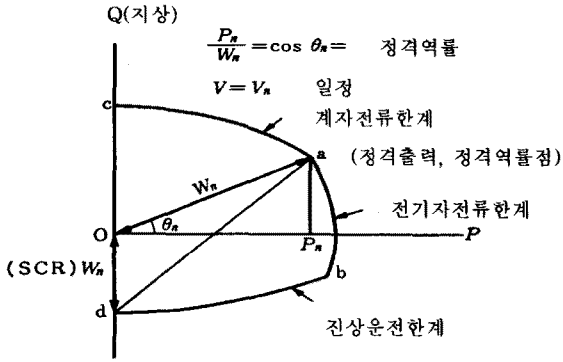


그림 1 발전기의 가능출력곡선(원통기의 경우)  
Fig. 1 Capability curve of generator (cylindrical-pole)

### 3.2 계자권선의 온도 상승에 의한 한계

그림1에서 정격출력, 정격역률점의 윗 부분이 이 계자 권선의 온도상승 한계를 나타내고 있다.

그림2의 원통기의 등가회로에 있어서

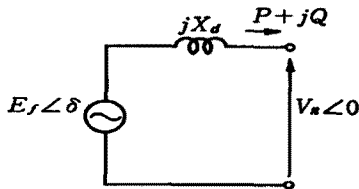


그림 2 원통기 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit for cylindrical-pole generator

발전기 단자전압을  $V_n$ (PU), 전류를  $I$ (PU)라 하고 유효전력, 무효전력을 각각  $P$ ,  $Q$ (PU)라 하면

$$P + jQ = V_n \bar{I} \quad (3)$$

내부유기전압  $\hat{E}_f$  는

$$\hat{E}_f = V_n + jX_d I \quad (4)$$

$$\bar{I} = \frac{\hat{E}_f - V_n}{-jX_d} = \frac{j(\hat{E}_f - V_n)}{X_d} \quad (5)$$

식 (4), (5)에 의해

$$P + jQ = \frac{jV_n(\hat{E}_f - V_n)}{X_d} = \frac{j(\hat{E}_f V_n - jV_n^2)}{X_d} \quad (6)$$

$\hat{E}_f$ 을 위상기준으로 하여  $\hat{E}_f = E_f$ ,  $V_n = V_n \angle \delta = V_n(\cos\delta - j\sin\delta)$ 라 하면

$$P + jQ = \frac{jE_f V_n(\cos\delta - j\sin\delta) - jV_n^2}{X_d} = \frac{E_f V_n \sin\delta}{X_d} + \frac{j(E_f V_n \cos\delta - V_n^2)}{X_d} \quad (7)$$

$$P = \frac{E_f V_n}{X_d} \sin\delta \quad Q = \frac{E_f V_n \cos\delta - V_n^2}{X_d} \quad (8)$$

$$\therefore P^2 + \left(Q + \frac{V_n^2}{X_d}\right)^2 = \left(\frac{E_f V_n}{X_d}\right)^2 \quad (9)$$

따라서, 단자전압  $V_n$  및 계자전류 즉, 내부유기전압  $E_f$ 을 일정하게 한 경우의 출력한계는 식(9)의 중심(0,  $-V_n^2/X_d$ ), 반경  $E_f V_n/X_d$ 인 원으로 나타내어진다. 계자전류를 정격출력상의 값으로 유지할 때의 발전기 출력한계 즉, 계자권선의 온도상승에 의한 한계출력은 그림1에서 가로축에 원점에서 아랫방향으로  $\bar{O}d = (SCR)W_n$ 가 되는 d점을 중심으로 반경  $d_a$ 가 되는 원으로 나타낼 수 있다. 이 원의 아랫방향에서 운전하고 있다면 계자전류는 정격출력시(a점)의 값을 넘지 않는다.

### 3.3 진상운전한계

원통기의 정태안정한계는 발전기의 진상영역에서의 가능출력영역을 정하는 가장 중요한 요소이며, 이는 SCR =  $1/X_d$ (단락비)점에서 시작해서 진상영역을 거쳐 발전기 정격운전영역(전기자권선 온도상승한계영역) 및 계자권선 온도상승영역을 포함하기 때문에, 진상영역에서만 검토하게 된다.

#### 3.3.1 단자전압 일정시 전압배터게적

그림3는 정태리액턴스  $X_d$ 의 원통형 발전기가 외부리액턴스  $X_e$ 를 통해 무한대모선에 연결된 계통으로 발전기 단자전압  $V \angle 0$ 을 일정시, 안정 한계에 있어서 발전기의 전력  $P$ , 무효전력  $Q$ 의 관계를 구한다.

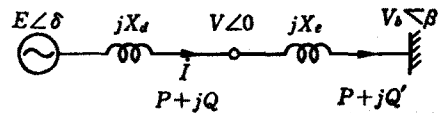


그림 3 1기 무한대계통

Fig. 3 A generator connected to an infinite busbar

여기서  $X_e$ 는 변압기나 송전선의 리액턴스에 상당한다. 우선 안정한계에 있어서의 전압배터 게적을 구한다.

이 계통에서는 발전기내부전압  $E \angle \delta$ 와 무한대모선전압  $V_b \angle \beta$ 사이의 상차 각  $\alpha + \beta = 90^\circ$  일 때에 안정한계가 되어  $E$ 의 크기가 주어지면  $\delta, \beta$ 가 일률적으로 정해진다. 이는  $E$ 의 크기가 그림4에서 원주상의 한 점이 기 때문에  $E$ 의 크기에 따라  $\delta$ 가 정해지고,  $\delta$ 가 정해지면  $\beta$ 가 정해지며,  $X_d, X_e$ 는 기지량이 되기 때문에  $I$  계산되고 따라서,  $V \angle 0$ 와  $V \angle \beta$  가정해지게 된다. 그림4에서

$$\bar{O}c = X_e I, \bar{O}b = X_d I \quad (10)$$

$$\frac{\bar{O}b}{\bar{O}c} = \frac{X_{el}}{X_{dl}} = \frac{X_d}{X_e} = \frac{\frac{X_d}{X_e} V}{V} = \frac{\bar{O}a}{\bar{O}O'} \quad (11)$$

즉, 두변의 비가 같으므로  $\triangle OO'c$  와  $\triangle Oad$ 는 닮은 꼴이 되므로

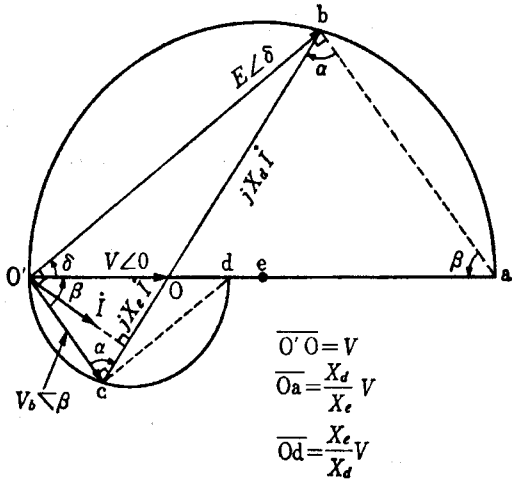


그림 4 안정한계에 있어서 전압벡터궤적  
Fig. 4 Voltage-Vector locus on the stability limit

$$\beta = \angle OO'c = \angle Oab \text{ 이고}$$

$$\bar{O}c // \bar{a}b \quad (12)$$

$\angle bO'c = 90^\circ$  이므로,  $\angle O'ba = 90^\circ$  가 되어  $\angle O'ba$ 를 현  $O'a$ 에 대한 원주각이라 보면 b 점의 궤적은  $O'a$ 를 직경으로 하는 원주가 된다.

상기사항을 정리하면,  $E \angle \delta$ 의 궤적은  $O'a = (1 + X_d/X_e)V$ 을 직경으로 하는 반원  $O'da$ 가 됨을 알 수 있다.

### 3.3.2 단자전압 일정시 PQ안정한계곡선

그림5은 O를 원점으로하는 PQ좌표에 있어서 그림4의 벡터도를  $V/X$ 배로 하고 뒤집어서  $+90^\circ$  회전시킨 것

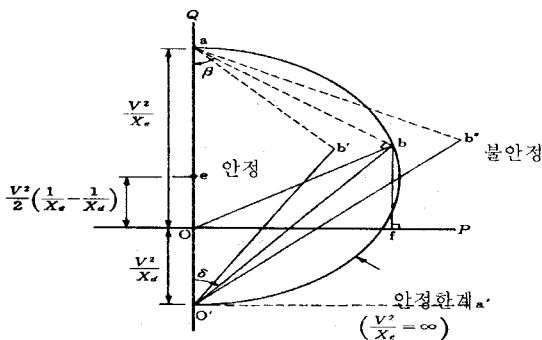


그림 5 일정 발전기 단자전압시의 PQ 안정한계곡선  
Fig. 5 P-Q Stability limit curve with constant voltage at the generator terminal

식(8)과 비교하면,

$$\bar{O}f = EV/X_d \sin \delta = P \quad (13)$$

$$\bar{f}b = EV \cos \delta / X_d - V^2 / X_d = Q$$

b점은 안정한계에 있어서 발전기 유효전력P, 무효전력Q를 나타내고 있어 그림4에서 내부전압  $E \angle \delta$ 가  $O'ba$ 의 반원상을 이동할 때 P, Q는 그림5에서  $O'ba$ 의 반원상을 이동한다. 그림5에서 P, Q안정한계곡선은 중심  $e = (0, \frac{1}{2} (1/X_e - 1/X_d))$  반경  $eO' = \frac{1}{2} V^2 (1/X_e + 1/X_d)$ 의 원이 되어 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P^2 + (Q - \frac{1}{2} V^2 (1/X_e - 1/X_d))^2 = (\frac{1}{2} V^2 (1/X_e + 1/X_d))^2 \quad (14)$$

그림4에서 안정영역은  $0 < \delta + \beta < 90^\circ$  이다. 그림5의 원 내부에서는  $90^\circ < \angle O'b'a < 180^\circ$  이므로

$$\delta + \beta = 180^\circ - \angle O'b'a$$

$$\therefore 0 < \delta + \beta < 90^\circ$$

원의부에서는  $0^\circ < \angle O'b'a < 90^\circ$  이므로  $90^\circ < \delta + \beta < 180^\circ$

따라서, 원내부가 안정영역이고, 원외부가 불안정영역이 된다.

### 3.3.3 일정 무한대모선전압시의 안정한계

3.3.2항에서는 그림3에서 발전기 단자전압 V를 일정하게 하고, 발전기 출력 변화에 따라 무한대모선전압이 변화하는 경우의 안정한계를 구했지만, 실제 계통에서는 무한대모선 전압  $V_b$ 가 일정하고 출력변화에 따라 발전기 단자전압이 변화하는 경우가 많다. 따라서, 이와 같은 경우의 안정한계를 구해본다. 그림3의 계통안정범위는 식(14)을 변형하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P^2 + Q^2 - QV^2 \left( \frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right) < \frac{V^2}{4}$$

$$\left[ \left( \frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right)^2 - \left( \frac{1}{X_e^2} - \frac{1}{X_d^2} \right) \right] = \frac{V^n}{X_e X_d} \quad (15)$$

$$Q + \frac{V^2}{X_d} - \frac{X_e}{V^2} (P^2 + Q^2 + \frac{QV^2}{X_d}) > 0 \quad (16)$$

$X_e$ 가 0에 가까워졌을 때의 안정범위는

$$Q > -V^2 / X_d \quad (17)$$

이것은 그림5에서  $V^2 / X_e = \infty$ 일때의 한계  $O'a$ 에 상당한다. 따라서 그림3에서  $V_b$ 가 일정 할 때 무한대모선으로서의 조류  $P + jQ'$ 의 안정범위는 식(17)에서  $Q \rightarrow Q'$ ,  $X_d \rightarrow X_d + X_e$ ,  $V \rightarrow V_b$ 로 바뀌며, 식은 다음과 같이 된다.

$$Q' > -\frac{V_b^2}{X_d + X_e} \quad (18)$$

안정한계는 그림4의  $\triangle O'bc$ 에 대해

$$(X_d + X_e)^2 I^2 = E^2 + V_b^2 \quad (19)$$

E, V<sub>b</sub>사이의 상차각  $\delta + \beta = 90^\circ$  이므로

$$P = \frac{EV_b}{X_d + X_e} \quad (20)$$

발전기 무효전력 Q는, 무한대모선 무효전력 Q'와 X<sub>e</sub>의 무효전력손실 X<sub>e</sub>I<sup>2</sup>를 더한 것이므로,

$$\begin{aligned} &= Q' + X_e I^2 \\ &= Q' + X_e \frac{(E^2 + V_b^2)}{(X_d + X_e)^2} \\ &= Q' + X_e \left\{ \frac{P^2}{V_b^2} + \frac{V_b^2}{(X_d + X_e)^2} \right\} \quad (21) \end{aligned}$$

식 (21)를 식 (18)에 대입하여

$$Q - X_e \left\{ \frac{P^2}{V_b^2} + \frac{V_b^2}{(X_d + X_e)^2} \right\} = \frac{-V_b^2}{(X_d + X_e)} \quad (22)$$

$$\therefore Q > \frac{X_e P^2}{V_b^2} - \frac{X_d V_b^2}{(X_d + X_e)^2}$$

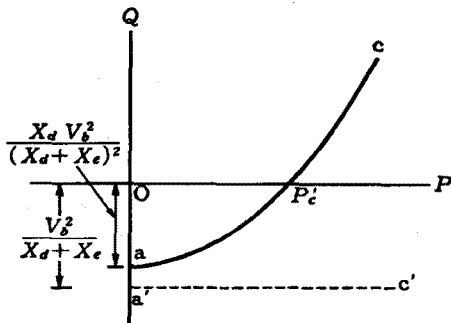


그림 6 일정 무한대모선전압시의 안정한계  
Fig. 6 Stability limit of an infinite busbar with a constant voltage

이 한계는 그림6의 포물선 aPc'에 상당하고 이것보다 위쪽이 P·Q의 안정범위가 된다. 식(23)에서 Q=0일 때의 P의 안정한계 Pc'는

$$Pc' = \frac{X_d V_b^2}{(X_d + X_e) \sqrt{X_d \cdot X_e}} \quad (24)$$

로 식(2.11)에서 Q=0이면

$$Pc = \frac{V^2}{\sqrt{X_d \cdot X_e}} \quad (25)$$

이므로, 두식 (24), (25)을 비교하면  $V \approx V_b$ 일 때에도  $Pc' < Pc$ 가 된다. 즉, Q<0의 진상영역에서는 발전기단자 전압 일정시보다도, 일정 무한대모선전압사이의 안정한계가 좁아지고, X<sub>e</sub>가 X<sub>d</sub>에 비해 아주 작으면 그 차는 적다.

가능출력곡선상에서 보면, 일정 무한대모선전압시의 안정한계는 실제로 발전기 가능출력영역보다 좁아지는 데, 이는 두가지 원인으로 귀결된다.

첫째, 발전기 단자전압 일정시는 곡선이 원주를 나타

내고 일정 무한대모선 전압시의 안정한계는 2차함수 포물선이다. 따라서 2차함수 포물선이 나타내는 영역은 원주의 내부에 있으므로 안정한계가 좁아진다.

둘째, P<sub>c</sub>과 만나는 점이  $P_c < P_c'$  이므로 면적이 좁아진다.

### 3.4 동태 안정도에 의한 가능출력곡선의 진상영역에서의 확장

#### 3.4.1 동태안정도에 의한 확장

동태안정도란 주어진 운전상태에 있어서 계통에 미소한 변화가 있었을 경우에 먼저 유지했던 안정한 상태로 되돌아갈 수 있을 것인가를 논하는 것으로, 특히 저여차 운전(진상운전)시 발전기의 내부유기전압이 내려가고 동기화력이 감퇴해서 정태안정도가 저하되므로 고성능의 AVR를 설치하고 부하가 증대하여 상차각이 벌어지면 내부유기전압을 신속하게 올려줌으로써 안정한계를 확대하는 경우이다.

이제까지는 AVR의 효과를 무시한 정태안정한계만을 대상으로 하였고, 이는 앞서 설명한 대로 그림7에서 중심  $\frac{1}{2} E_t^2 (1/X_e - 1/X_d)$ , 반지름  $\frac{1}{2} E_t^2 (1/X_e + 1/X_d)$ 로 하는 원으로 그림8 곡선a로 표시된다. 그러나, 여기서 AVR의 제어효과까지 고려했을 경우의 운전한계곡선은 그림8의 b처럼 되어서 안정영역은 특히 진상영역에서 현저하게 확대되어 극한위상차각을  $120^\circ \sim 130^\circ$  정도까지 확장 할 수 있게 된다

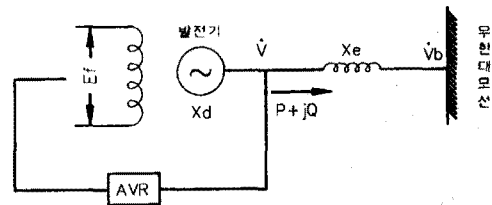


그림 7 1기 무한대 모선계통

Fig. 7 A generator connected to an infinite busbar

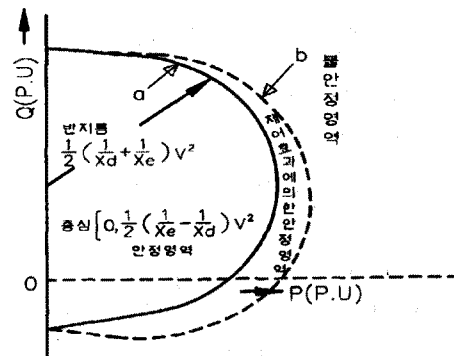


그림 8 동태안정도의 운전영역

Fig. 8 Operational limit of the dynamic stability

#### 3.4.2. AVR 효과에 의한 동태안정도 확장 원리

동기발전기에 AVR을 적용하는 경우 기본적으로 다음

의 3가지 경우를 고려하고 있다.

1) 일정 여자와 일정 무부하전압의 동작, 즉 AVR 동작이 없는 경우.

2) 연속적으로 동작하고 있지 않은 AVR을 가진 동작, 즉 단자전압이 부하변화에 단속적으로 변화하는 경우

3) 단자전압이 항상 일정하도록 매우 빠른 동작을 하는 AVR을 이용하여 장거리 선로에 전력을 공급하는 경우 등에 적용하는 경우.

상기 3개의 경우는 각각 현저하게 최대 출력값에 변화를 주게된다.

이 변화의 정도는 AVR의 속도에 달려있고, 동기발전기의 가능출력상의 효과는 진상영역에서, 명백하게 증가된 상황을 그림9에 잘 보여주고 있다

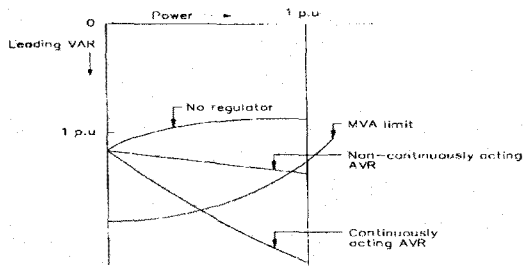


그림 9 AVR을 사용한 가능출력곡선  
Fig. 9 Capability curve with AVR

그림9에서 연속동작 AVR은 실제로 PID Controller를 갖춘 Stabilizer로 최근의 발전기에서는 이 방식을 적용하고 있다.

실제 상차각곡선은  $E \sin \delta / X$ 에서 E값을 점차적으로 증가시킴으로서 얻을 수 있고, 발전기가 고속동작 AVR을 갖추고 있으면,  $\delta = 90^\circ$ 의 정태안정한계를 지나치더라도, 동기상태는 계속 보류하는 것이 가능해진다. (즉  $\delta = 90^\circ$ 의 상태를 계속 유지) 강제로 전압을 상승시키는 AVR은  $\delta = 90^\circ$  이후에도 계속 이 값을 유지하게 하고  $dP/d\delta$  (동기화력)가 계속 정의값(+값)을 가지도록 하기 위해 출력을 증가시킨다. 이러한 관계는 그림15에서 나타나있다. AVR이 없으면, 발전기의 단자전압( $V_t$ )는  $\delta$ 가 증가함에 따라 떨어지게 되고 발전기 전압 $V_g$ 는 일정하다.

완벽한 AVR을 갖추고 있으면,  $V_t$ 는 일정하게 유지되고,  $V_g$ 는  $\delta$ 가 증가함에 따라 증가된다.  $P = V_s V_g \sin \delta / X$ 이기 때문에, 여자한계에 도달할 때까지  $90^\circ$  넘어서도 출력이 증가함은 명백해진다.

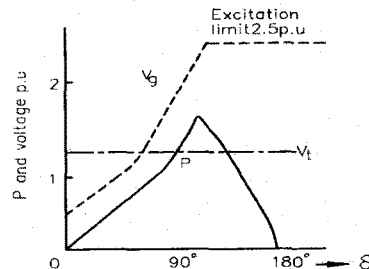
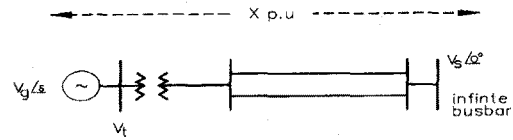


그림 11 완벽한 AVR을 사용한 경우의 출력 및 전압  
Fig. 11 Perfect AVR variations of output power P, generated voltage  $V_g$ , and terminal voltage  $V_t$  with load

#### 4. 각 발전소별 가능출력곡선과 특성

##### 4.1 원자력발전소 가능출력곡선

##### 4.1.1 고리 원자력발전소 1호기 가능출력곡선 특성분석

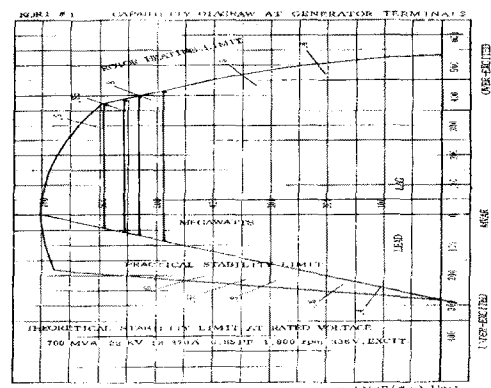


그림 12 고리 원자력발전소 1호기 가능출력곡선  
Fig. 12 Capability curve of KORI Nuclear P/S

그림12은 고리원자력 발전소 1호기 가능출력곡선으로 발전기용700MVA이지만 Prime mover는 최고 600MW만이 입력되고 있다. 따라서, 정격운전영역에서는 가능출력곡선이 Prime mover에 의해 제한되기 때문에 전기자전선의 온도상승은 문제가 되지 않는다. 다만, 진상영역에서는, 가능출력곡선상의 개략적인 계산으

로 단락비(=1/Xd)는 약0.43 정도로 대단히 낮은 값이므로 근본적으로 진상영역의 안정한계 영역이 좁다. 이 좁은 영역이 또 계전기로 제한되어 있어 실제 운전영역은 매우 좁게 설정되어 있다. 다만, 실제 설정영역과 실제 안정한계와의 차이가 있어 필요하다면, 진상영역의 확장운용은 가능할 것으로 사료된다.

#### 4.1.2 월성 원자력발전소 3호기

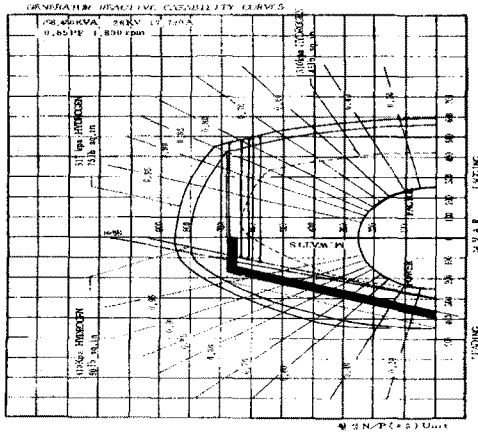


그림 13 월성 원자력발전소 3호기 가능출력곡선  
Fig. 13 Capability curve of WEOLSUNG Nuclear P/S

그림13은 월성 원자력발전소 3호기로 용량은 약 800MVA, Prime mover는 최고 700MW정도이고, 단락비는 0.5이상으로 진상영역에서의 운전범위가 상당히 넓게 잡혀 있다. 이 가능출력곡선상의 진상영역 운전범위는 동태안 정도가 적용되어 많이 확장되어 적용되어 있고, 실제 운전점과 안정영역은 상당히 많은 여유가 있어, 까맣게 굵은 선으로 표시 영역이 진기자 철심단부의 온도상승을 감안하여 제한되어 있다 하더라도, 상당한 영역의 확장이 가능할 것으로 판단된다.

### 4.2 화력발전소 가능출력곡선

#### 4.2.1 삼천포 화력발전소 1.2호기 가능출력곡선 특성분석

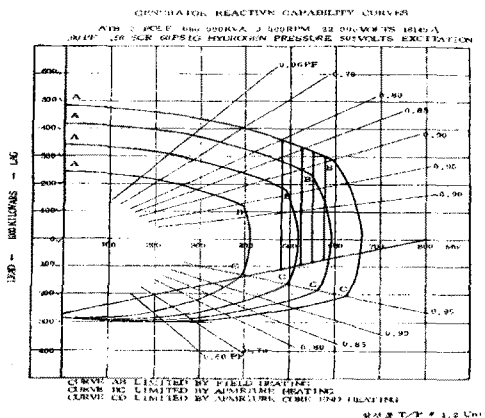


그림 14 삼천포 화력발전소 1.2호기 가능출력곡선  
Fig. 14 Capability curve of SAMCHUNPO Thermal P/S

그림14은 삼천포 화력발전소 1.2호기 가능출력곡선으로 발전기용량은 660MVA 이지만 Prime mover는 최고 590MW 정도가 입력되고 있다.

따라서, 정격운전영역에서는 가능출력곡선이 Prime mover에 의해 제한되기 때문에 전기자권선의 온도상승은 문제가 되지 않는다. 다만, 진상영역에서는 단락비(=1/Xd)는 0.58로 낮은 값이므로 진상영역의 안정한계는 좁은 편이다. 그러나, 진상영역에서 전기자철심 단부발열로 제한된 곡선CD는 실제로는 동태안정도로 확장된 정태안정한계곡선으로 추정되고 이는 진상영역을 많이 확장시켜 놓고 있다. 따라서, 진상영역에서의 실제 운전점과 안정 한계곡선과는 많은 여유가 있어 필요시는 확장 가능 할 것으로 사료된다.

#### 4.2.2 호남 화력발전소 1.2호기 가능출력곡선 특성분석

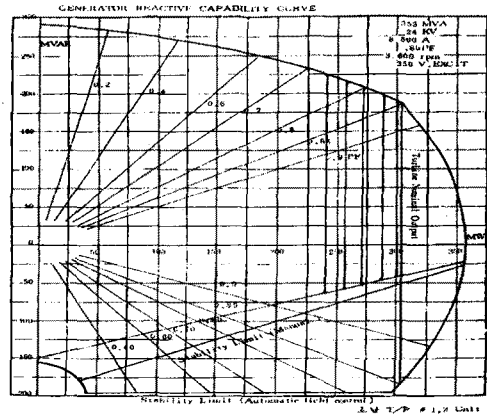


그림 15 호남 화력발전소 1.2호기 가능출력곡선  
Fig. 15 Capability curve of HONAM Thermal P/S

그림15은 호남 화력발전소1.2호기이며 발전기 용량은 353 MVA의 중급 화력발전소로 Prime mover는 310MW 정도가 입력되고 있다.

따라서, 전기자권선의 온도상승은 문제가 되지 않는다. 다만, 진상영역에서 단락비에 의해 진상영역이 좁게 한정되어 있고, 특히 수동 계자전류조정에 의해 정태안정극한이 좁게 설정되어 있어 진상영역에서의 폭이 매우 좁아져 있다. 만일, AVR에 의해 계자전류가 조정된다면 진상영역에서의 안정한계는 매우 넓어지게 되어 많은 확장이 가능할 것으로 보이나 영역을 근처에서는 최소 계자전류한계로 제한되는 특이성 때문에 운전영역이 좁아져 정상적인 확장은 불가능할 것으로 사료된다.

### 4.3 수력 발전소 및 양수 발전소 가능출력곡선

#### 4.3.1 소양강 수력발전소 1.2호기 특성분석

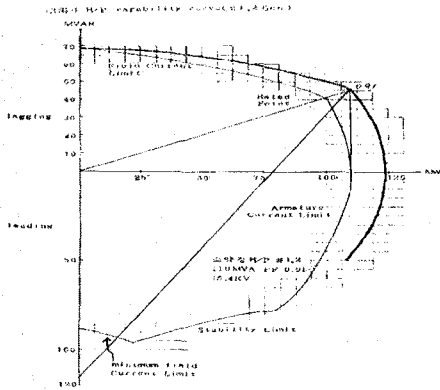


그림 16 소양강 수력발전소 1,2호기 가능출력곡선  
Fig. 16 Capability curve of SOYANG river Hydrolic P/S

그림16은 소양강 수력발전소 1,2호기의 가능출력곡선으로, 발전기 용량은 110MVA의 상당히 큰 수력발전소로 Prime mover 수차입력은 특성상 제한되어 있지 않아 전기자권선의 정격전류로 제한되어 있다. 단락비가 상당히 큰 경우(1.0이상)이며, 진상운전영역은 동태안정도가 전혀 고려되지 않은 정태안정한계로서 제한되어 있다. 전기자권선의 온도상승영역이 상당히 넓게 설정되어 있으며, 진상영역의 정태안정한계 곡선도 최소 계자전류한계 특성상 상당히 제한되어 있다. 또한 바깥을 감싸는 또 하나의 곡선은 명기되지 않았지만 발전기 사용 온도영역을 넓혔을 경우의 가능출력곡선으로 추정된다

#### 4.3.2. 삼랑진 양수발전소 특성분석

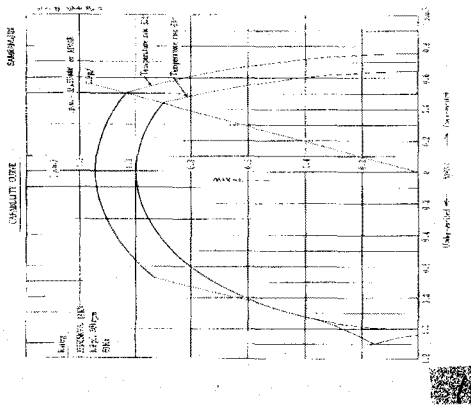


그림 17 삼랑진 양수발전소 가능출력곡선  
Fig. 17 Capability curve of SAMLANGJIN pump-up P/S

그림17은 삼랑진 양수발전소의 가능출력곡선으로 발전기 용량이 335.555MVA로 단위용량이 큰 양수 발전소로 Prime mover 가역 Pump수차입력은 특성상 제한되어 있지 않아 전기자권선의 온도상승은 전기자권선 정격전류로 제한되어 있다. 단락비가 상당히 큰 경우(1.0이상)이며 진상운전영역은 동태안정도가 전혀 고려되지 않은 정태안정한계로서 제한되어 있다. 전기자권선의 온도상승영역이 상당히 넓게 설정되어 있으며 진상영역의 정태안정한계곡선도 최소 계자전류한계로 약간 제한되어 있다. 또한 사용온도 영역에 따라 다른 두개의 가능출력곡선이 존재하며 80℃ 온도상승시가 60℃ 온도

상승시보다 18%정도 증가되어 있다.

#### 4.4 내연력 발전소 가능출력곡선

##### 4.4.1 부평 가스터빈발전소 및 울산 화력발전소 1-4호기 특성분석

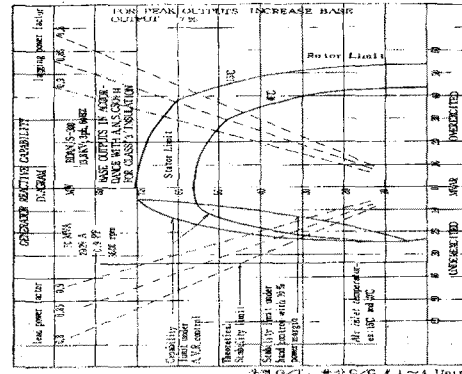


그림 18 부평 가스터빈발전소 및 울산 화력발전소 1-4호기

Fig. 18 Capability curve of BAPYUNG G/T ULSAN C/C

그림18은 부평 가스터빈발전소, 울산 복합화력발전소 가스터빈 1-4호기의 가능출력곡선으로써 발전기 용량은 70MVA이고 Prime mover 가스터빈의 입력은 명기되어 있지 않아 전기자권선의 온도상승은 전기자권선의 정격전류로 제한되어 있다.

단락비가 아주 낮아(0.4정도) 근본적으로 진상운전영역이 매우 좁다.

AVR을 사용한 동태안정도로 가능출력영역(진상부분)이 많이 확장되어 있지만 상기 발전소의 특성상 진상영역 운전(저여자운전)이 거의 필요치 않을 것으로 사료된다. 이 가능출력곡선으로 AVR을 사용한 동태안정도의 확장이 명백하게 증명되어지고 있다.

또한, 외기온도가 15℃ 일때가 40℃보다 20%정도 출력이 높게 잡혀 있어, 이는 발전기의 출력한계라기 보다는 Prime mover 가스터빈의 출력에 따라 발전기의 출력이 변화됨을 추측할 수 있다.

##### 4.4.2 부천 복합화력발전소 1-3호기 특성분석

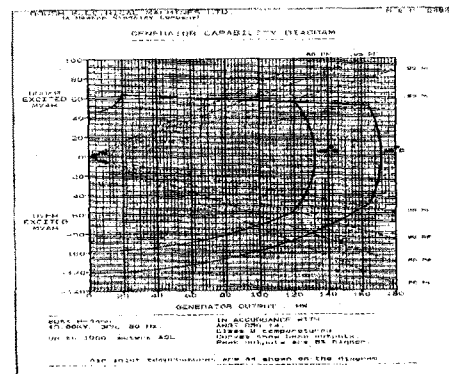


그림 19 부천 복합화력발전소 1-3호기 출력가능곡선  
Fig. 19 Capability curve of BUCHUN C/C

그림19는 부천 복합화력의 가스터빈 1-3호기의 가능출력곡선으로서 발전기 용량은 최고 142.33MVA이고 Prime mover 가스터빈의 입력은 거의 발전기 용량과

일치하는 것으로 사료되고, 전기자권선의 온도상승은 전기자권선의 정격전류로서 제한되어 있다.

단락비는 0.52로 매우 낮아 진상영역이 매우 좁고 또한, 진상영역에서 전기자철심단부의 발열에 의한 온도상승으로 추정되는 직선으로 제한되어있으며 영역률 근처에서는 계자권선의 전류제한으로 인해 한정되어 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 가능출력곡선의 이론적인 해석과 실제 발전소에서는 어떻게 적용되고 있는지를 예시했다.

이론적으로 발전기의 가능출력곡선을 단순히 발전기 자체에서만 보면, 정격운전영역은 전기자권선의 정격전류 즉 정격부하전류, 지상운전영역은 회전자 계자권선의 정격전류나 여자기의 용량 등에 의해 결정되어지고, 진상운전영역은 고정자철심단부의 온도상승에 의해 결정되어진다. 그러나, 발전기는 전력계통의 중요한 한 요소로서 계통에서의 제 역할을 수행하기 위해서는 계통의 정태안정한계내에서 운행되어야 하므로 진상운전영역에서는 정태안정한계곡선이 진상영역에서의 운전한계를 결정하는 중요 요인이 되고, 대부분의 발전기에서는 이 요인에 따라 진상영역의 가능출력곡선이 결정되어짐을 설명하고 예시했다.

실제에 있어서는, 최근의 발전기들은 고성능 AVR을 이용한 동태안정도도 정태안정한계를 많이 확장하여 진상영역에서의 운전영역을 확장하는 추세에 있어 비록 경제적인 관점에서 SCR(단락비)은 낮아지는 추세에 있어도 진상영역은 그렇게 줄어들지 않고 있음을 예시된 가능출력곡선에서 나타내고 있다.

앞으로, 우리나라 전력계통에서 원자력발전소나 대형 화력발전소는 진상영역에서의 저여자운전의 필요성이 점점 증가되고 있는 현 시점에서 이들 발전소의 진상영역에서의 운전영역확대는 예시된 가능출력곡선에 의하면 충분히 가능할 것으로 사료되고, 이렇게 하므로써 리액터 등의 설치로 소요되는 비용의 감소도 가능하고 유연한 계통운용도 가능하여 경제적, 기술적으로 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] 한전계통운영처, "각 발전소 가능출력곡선", (주)한국전력, p257 - p305, 1992.
- [2] 新田目, "電力系統 技術計算の 基礎", (주)전기서원, p62 - p65, p72 - p75, p270 - p294, p327 - p331, 1996.
- [3] Hadi Saadat, "Power System Analysis", MCGRAW HILL, p562, 1999.
- [4] B.M.Weedy, "Electric Power Systems", John Wiley&Scms, p102, p105 - p108, 1988.
- [5] Grainger&Stvenson, "Power System Analysis", MCGRAW HILL, p110 - p116, 1994.
- [6] Vincent Del Toro, "Electric Power System", Prentice Hall, p132 - p134, 1992.
- [7] Fitzgerald/Kingsley/Kuso, "Electric Machinery", MCGRAW HILL, p301 - p304, 1971.
- [8] 송길영, "송배전공학", 동일출판사, p297 - p298, 1989.
- [9] 송길영, "전력계통의 해석및운용", 동일출판사, p479 - p489, 1995.
- [10] 김봉희, "전기기술사 예상문제 해설", 신기술, p58 - p59, 1993.
- [11] 한전송배전처, "765kV 송변전분야 기술검토서", (주)한국전력, p20 - p21, 1995.
- [12] 김인성, "우리나라 전력계통의 장기전망 및 대책", 전기저널, p12 - p20, 1996.12
- [13] 한전전원계획처, "계통특성 개선설비설치 타당성 검토 보고서", p7 - p8, p121 - p12