

## 조속기 적분제어회로를 고려한 에너지함수 유도 및 과도안정도 해석

류현수\*   이용혁\*   김 백\*\*   오용택\*\*\*   문영현\*  
\*연세대 전기공학과   \*\*한 전   \*\*\*한국기술교육대학

### The Derivation of the Energy Function reflecting Governor's Integal Contol Loop, and Direct Stability Analysis

H.S. Ryu\*   E.H. Lee\*   B. Kim\*\*   Y.T. Oh\*\*\*   Y.H. Moon\*  
\*Yonsei Univ. Dept. of Electrical Eng.   \*\*KEPCO   \*\*\*K.Tech.E. Univ.

#### Abstract

In this paper, the derivation of the energy function reflecting the governor's integral control loop is presented. When integral control is considered we obtain oscillatory response of the loop at the price of reducing frequency error. In other words, as  $K_I$  is increased, the region of stability is decreased. When derived energy function is applied to the one machine infinite bus system, we showd that this function can be used to assess stability.

#### 제 1 장 서론

전력계통의 안정도는 전력계통의 외란에 대한 반응을 다룬다. 과도 안정도 연구는 외란 발생 후의 동기 발전기가 동기 상태로 남아 있는지 여부를 조사할 뿐 아니라 역학 시스템의 동작 상태의 신뢰성을 조사하는 것으로 볼 수 있다. Lyapunov 직접 해석법이 60년대 후반 전력계통안정도 해석에 도입이 시도되었으나 적절한 Lyapunov 함수를 발견하는 방법이 없어서 실제 적용이 이루어지지 못했다. 1970년대 말 Fouad가 에너지 함수에 의한 Lyapunov 함수 구성 방법을 제시한 후로 연구가 활성화되고 있다. 그러나 현재 사용하고 있는 에너지함수는 모선 전압이 일정하게 유지되고 발전기의 기계적 출력이 일정하다는 가정하에서 유도되어 발전기의 조속기 영향을 반영시킬 수 없었다. 이에 따라 이런 에너지함수 유도과정에서 발전기의 기계적 출력과 관련된 경로 의존 적분항을 분석하여 조속기, 터빈의 응답을 완전모델을 사용하여 에너지함수를 개발하였다. 그러나 적분제어회로가 포함되지 않은 완전모델을 사용하여 실제에 가까운 모델이 되지 못했다. 적분제어회로가 포함되었을 경우 에너지함수를 구성하여 그 타당성을 증명하고 과도안정도에 어떤 영향을 미치는지 알아보고자 한다. 곧 에너지식으로부터 불안정평형점을 찾고 이 때의 에너지로부터 안정영역을 결정하여 안정도 판정에 쓰일 수 있음을 보이고자 한다.

제시된 에너지함수는 시스템 제어계를 고려할 수 있는 에너지함수 개발에 최초의 성과로 에너지함수 유도에 사용된 기본 이론은 여자기동과 같은 타 분야에도 널리 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 제 2 장 전력계통의 에너지함수 유도

전력계통에 대하여 현재 널리 쓰이고 있는 역학 모델은 전압이 일정하다는 가정하에서 각 발전기의 관성계가 스프링에 의하여 연결된 모델을 사용하고 있다. 이러한 종래의 모델은 일정 전압의 가정 때문에 사용 범위가 제한되고 조속기 여자기동의 제어 특성이 전혀 반영될 수 없는 결정적인 단점이 있다. 이러한 결점을 보완하기 위해서 전압이 변화될 경우에 적용될 수

있는 새로운 등가역학모델(Equivalent Mechanical Model)을 제시하고 이 역학 모델을 사용하여 등가모델에 대한 역학방정식을 세우고 고전적 발전기 모델 계통의 미소에너지 변화량을 에너지 적분표현식으로 나타내어, 전체 시스템의 에너지 함수를 유도할 수 있고 이를 약간 수정함으로써 Lyapunov 함수를 도출할 수 있음을 보인바 있다.[1]

#### 2.1 전체 에너지함수 유도

곧 모선  $i$ 의 위상각과 전압이 각각  $d\theta_i$  및  $dV_i$ 만큼씩 변화할 때 계통에 저장되는 미소에너지를  $dW_i$ 라고 할 때 전 계통에너지는 각 모선에서 미소에너지  $dW_i$ 를 합하여 적분함으로써 계산할 수 있으며 다음과 같이 주어진다.

$$W_{Total}(V, \theta) = \int_c \sum_i dW_i \quad (2.1)$$

여기서 적분경로  $c$ 는 계통의 시간에 대한 폐적이다.

위 식(2.1)에서 미소 에너지  $dW_i$ 는  $i$ 모선에 작용하는 모든 힘과 미소 변위 벡터의 내적으로 주어진다. 즉

$$dW_i = -F_{Ti} \cdot dx_i \\ = -F_{Ti} \cdot (V_i d\theta_i \hat{\theta} + dV_i \hat{V}_i) \quad (2.2)$$

여기서

$$F_{Ti} = - \left[ \frac{M_i \dot{\theta}_i}{V_i} + \frac{D_i \dot{\theta}}{V_i} + \frac{(P_{mi} - P_{Li})}{V_i} \right] \hat{\theta} \\ + \sum_{j \neq i} F_{ij}^p + \frac{Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li}}{V_i} \hat{V}_i \quad (2.3)$$

위 식(2.2)을 정리하면 전체 에너지  $W_{Total}$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$W_{Total} = \int_c dW_T \\ = \sum_i \left[ \left( \frac{1}{2} B_{ii} V_i^2 - \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} B_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} \right) \right]_{(\theta, V)}^{(\theta, V)} \\ + \frac{1}{2} M_i (\omega_i^2 - \omega_{io}^2) - c \int_{\omega_{io}}^{\omega_i} P_{mi} d\delta_i + c \int_{\theta_{io}}^{\theta_i} P_{Li} d\theta_i \\ - c \int_{V_{io}}^V \left[ \frac{Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li}}{V_i} \right] dV_i + c \int_{\delta_{io}}^{\delta_i} D_i \omega_i d\delta_i \\ = 0 \quad (2.4)$$

단 발전기가 없는 모선일 경우  $P_{mi}=0, M_i=0, D_i=0, Q_{Gi}=0$ 이다

## 2.2 P<sub>m</sub> 관련 경로의존 적분함 분석

위에서 제시한 전체 시스템의 에너지함수를 이용하여 조속기 영향을 반영한 에너지함수를 유도하고자 한다. 조속기의 제어 다이나믹스를 고려한 에너지함수 도출은 다음의 에너지 적분 계산식 중 기계출력 P<sub>mi</sub>와 관련된 경로의존 적분항을 정확히 분석하면 조속기 파라미터가 에너지 적분에 직접 반영되어 소기의 에너지 함수를 도출해 낼 수 있다. 발전기 주파수 제어 시스템을 완전모델 블록선도로 표시하면 그림 3.1과 같다. 주파수 제환 이득이 큰 경우에 발생하는 안정도 판정에서의 문제점을 해결하기 위해 주파수 제어 시스템의 완전모델에 의한 에너지함수 유도가 필수적이다. 또한 유도된 에너지함수로부터 Lyapunov 적점법에 의한 과도 안정도 해석방법을 제시하고자 한다.

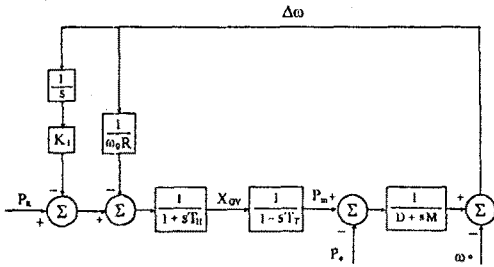


그림 3.1 주파수 제어 시스템 블록선도

조속기 영향을 고려한 에너지함수는 기계출력 P<sub>mi</sub>와 관련된 경로의존 적분항을 조속기 모델과 결부시켜 분석함으로써 조속기 파라미터를 에너지적분에 직접 반영시킬 수 있다. 위 블록선도를 시영역의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$T_{Hi} \dot{X}_{GVi} = -X_{GVi} - K_{pi}\Delta\omega_i - K_{Ti}\Delta\delta_i + P_{Ri} \quad (2.5)$$

$$T_{Ti} \dot{P}_{mi} = -P_{mi} + X_{GVi} \quad (2.6)$$

위 방정식에서 미소변동 방정식을 구하기 위하여 계통의 정상상태(steady state)를 계산해 보면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$X_{GVi0} = P_{Ri} \quad (2.7)$$

$$P_{mio} = X_{GVi0} = P_{Ri} \quad (2.8)$$

정상상태 부근에서의 미소변위 변수를 다음과 같이 정의하자.

$$\Delta P_{mi} = P_{mi} - P_{mio} = P_{mi} - P_{Ri}$$

$$\Delta X_{GVi} = X_{GVi} - X_{GVi0}$$

그러면 식 (2.5) 및 (2.6)에 대한 미소변동 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$T_{Hi} \Delta \dot{X}_{GVi} = -\Delta X_{GVi} - K_{pi}\Delta\omega_i - K_{Ti}\Delta\delta_i \quad (2.9)$$

$$T_{Ti} \Delta \dot{P}_{mi} = -\Delta P_{mi} + \Delta X_{GVi} \quad (2.10)$$

여기서 에너지함수 기계출력에 대한 에너지적분항 계산에 조속기 관련방정식을 사용함으로써 조속기 영향을 고려한 에너지함수를 유도할 수 있다. 먼저 기계출력 P<sub>mi</sub> 관련 에너지적분항을 미소변위 변수를 사용하여 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int P_{mi} d\delta_i &= \int (P_{Ri} + \Delta P_{mi}) d\delta_i \\ &= \int P_{Ri} d\delta_i + \int \Delta P_{mi} d(\delta_{i0} + \Delta\delta_i) \quad (2.11) \\ &= P_{Ri}(\delta_i - \delta_{i0}) + \int \Delta P_{mi} d(\Delta\delta_i) \end{aligned}$$

위 식 (2.11)에서 마지막항이 경로의존 적분항이므로 이 항을 에너지함수에 포함시키기 위해서는 조속기 제어식 식 (2.9) 및

(2.10)과 결부시켜 완전적분항과 시간적분항으로 분리하고 시간적분항의 피적분항수가 제곱꼴로 나타나도록 변형하여 에너지식에 반영할 수 있다.

## 2.3 1기 무한대 모선 에너지함수 유도

2.1절에서 유도한 전체 에너지식 식(2.4)에 2.2절에서 분석한 P<sub>m</sub> 관련항을 대입하여 1기 무한대 모선에 대한 에너지 함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} M \Delta\omega^2 - \frac{E}{X_i} (\cos \delta - \cos \delta_0) - P_{Ri} \Delta\delta \\ &\quad - \frac{1}{\left(1 + \frac{T_T K_i}{K_p}\right)} \left[ -K_i \left(1 + \frac{T_H}{T_T}\right) \Delta\delta^2 + \frac{(T_T + T_H) K_i}{2K_p} \Delta P_m^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_H}{K_p} \left(\frac{1}{2} + \frac{T_H}{T_T}\right) \Delta X_{GV}^2 - \frac{T_T K_i}{K_p} \Delta\delta \Delta P_m + \frac{T_H}{K_p} \Delta P_m \Delta X_{GV} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\left(1 + \frac{T_H K_i}{K_p}\right)} \left[ -\frac{K_i}{2} \Delta\delta^2 + \frac{T_H}{2K_p} \Delta X_{GV}^2 - \frac{T_H K_i}{K_p} \Delta\delta \Delta X_{GV} \right] \right] \quad (2.12) \end{aligned}$$

에너지 함수의 시간 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= -D \Delta\omega^2 - \frac{1}{\left(1 + \frac{T_T K_i}{K_p}\right)} \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{T_H K_i}{K_p}\right)} \right. \\ &\quad \left. (\Delta X_{GV}^2 - K_i^2 \Delta\delta^2) - \left(1 + \frac{T_H}{T_T}\right) (T_H^2 \Delta \dot{X}_{GV}^2 \right. \\ &\quad \left. + \Delta P_m^2 - K_i^2 \Delta\delta^2 - K_p^2 \Delta\omega^2) \right] \quad (2.13) \end{aligned}$$

## 2.4 Lyapunov 적점법에 의한 과도 안정도 판정

다음은 조속기를 포함한 계통 상태방정식이다.

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_{oi} \quad (2.14)$$

$$M_i \dot{\omega}_i = -D_i(\omega_i - \omega_{oi}) + P_{mi} - P_{ei} \quad (2.15)$$

$$T_{Hi} \dot{X}_{GVi} = -X_{GVi} - K_{pi}\Delta\omega_i - K_{Ti}\Delta\delta_i + P_{Ri} \quad (2.16)$$

$$T_{Ti} \dot{P}_{mi} = -P_{mi} + X_{GVi} \quad (2.17)$$

불안정평형점을 구하기 위해서는 위 식 (2.12) 에너지함수를 각 상태변수별로 편미분하여 연립방정식을 만든다. 이는 평형점이 곧 에너지 함수의 극점된다는 사실에 기인한 것이다. 이 연립방정식의 여러 해 중에 안정평형점 및 불안정평형점이 포함되고 불안정평형점 중 안정평형점과 가까운 점이 안정도 판정에 쓸 수 있는 점이다.

## 3장 시뮬레이션 및 결과 고찰

앞장에서 제시한 조속기의 적분제어를 고려한 에너지함수를 그림 3.1과 같은 1기 무한대 모선 계통에 적용하여 에너지함수의 타당성을 살펴 보고, 안정평형점과 불안정평형점을 구하여 이때 에너지 값을 고장제거순간의 계통에너지와 비교하여 안정도를 판정하였다.

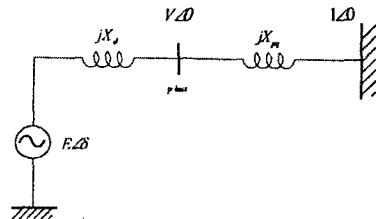


그림 3.1 1기 무한대 모선 계통

아래 표 4.1은 1기 무한대 모선 계통의 데이터이다.  
출력 P+jQ: 0.5 + j0.75    댐핑계수: 4/ω<sub>0</sub>  
선로 임피던스: j0.08    피드백상수: 1/(R ω<sub>0</sub>)  
직분 제어상수: K<sub>p</sub>/2    관성 상수: 4

### 3.1 1기 무한대 모선에 대한 시간모의실험

실험을 위해 계통의 P모선에서 3상 단락 사고가 발생하였다가 일정시간 경과 후 고장이 제거되는 경우를 가정하였다. 먼저 고장제거 시간이 짧아 계통이 안정한 경우를 살펴보면 고장시간 즉 t=0인 순간 p모선에서 단락사고가 0.1초간 일어났다가 제거되면 아래 그림과 같은 결과를 얻는다.

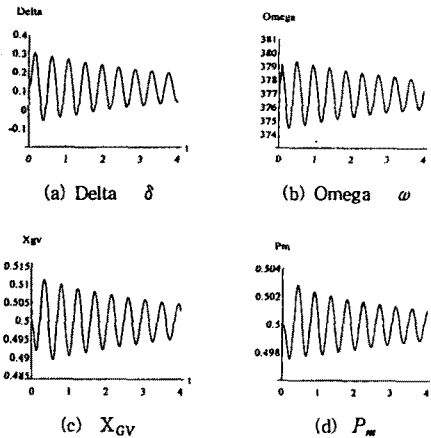


그림 3.2 t<sub>c</sub>=0.1s일 때 계통의 상태변수

위의 그림에서 고장제거 후 약 4초간 시간모의 실험을 한 결과 계통변수들이 고장전 상태로 수렴하고 있으므로 계통은 안정하다고 판정할 수 있다.

그러나 고장 제거 시간을 t<sub>c</sub>=0.5s로 하였을 경우 위와 같은 방법으로 시간모의에 의한 계통 안정도 판별을 해 보면 아래 그림 3.3과 같은 결과를 얻는다.

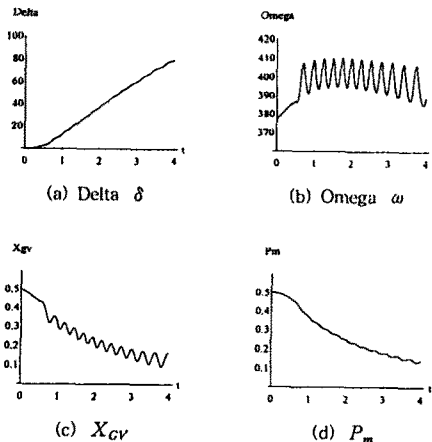


그림 3.3 t<sub>c</sub>=0.5s일 때 계통의 상태변수

이 경우 변수들이 발산을 하고 있으므로 계통은 불안정하다고 판정할 수 있다.

위 2가지 경우에서 보듯이 시간 모의에 의한 안정도 판별을 하는데 고장제거 순간 이후의 상태변수들의 변화추이를 알아 보기 위해 계속 시간모의를 수행해야 하므로 많은 시간이 걸리고 임계 고장제거 시간을 찾기도 힘들다. 그러나 앞절에서 유도한 에너지함수를 이용하면 쉽게 안정도를 판별하고 임계 고장제거 시간을 찾을 수 있다. 다음 절에서 에너지함수에 의한 직접판별법에 대해 알아보도록 하겠다.

앞절에서 설정한 고장제거 순간의 에너지 E(t<sub>c</sub><sup>+</sup>)와 불안정 평형점의 에너지 E(UEP)를 구하여 크기를 비교하여 보면 아래와 같다.

표 3.1 에너지 값 비교

에너지	E(t <sub>c</sub> <sup>+</sup> =0.1)	E(t <sub>c</sub> <sup>+</sup> =0.5)	E(UEP)
K <sub>p</sub> /2	0.0736	7.8739	6.8166

위 표 4.1에서 보듯이 t<sub>c</sub>=0.1일 때 E(t<sub>c</sub><sup>+</sup>=0.1) < E(UEP)를 만족하므로 고장 제거 순간의 에너지는 안정영역내에 존재하고 계통에너지는 시간의 경과에 따라 감소하다가 0으로 수렴한다. 그러나 t<sub>c</sub>=0.5일 때 E(t<sub>c</sub><sup>+</sup>=0.5) > E(UEP)이므로 계통은 불안정하다고 판정할 수 있다.

전력계통의 안정도에서 고장제거 시간을 늘려도 계통이 안정화 되는 최대 시간을 임계 고장제거 시간이라고 하며 안정도를 정량적으로 나타내 주는 값이다. 시간 모의실험에 의한 임계 고장제거 시간과 에너지함수에 의한 시간을 구하면 아래 표와 같다.

표 3.3 K<sub>1</sub>변화에 따른 임계 고장제거 시간

K <sub>1</sub>	0.0	K <sub>p</sub> /2	K <sub>p</sub> *20	K <sub>p</sub> *40
T <sub>cr</sub>				
시간모의법	0.4711	0.4613	0.4532	0.4530
에너지직접법	0.4486	0.4474	0.4274	0.4119

그러나 K<sub>1</sub>가 증가할 때는 오히려 안정영역이 줄어들음을 볼 수 있는데 이는 직분제어회로가 정상상태시 주파수를 에리클을 조정해 주는 역할을 하기 때문이다. K<sub>1</sub>가 커지면 과도기에는 오히려 진동폭이 커지게하여 안정화에 역효과를 주게 된다.

### 제 4 장 결 론

본 논문에서는 발전기 조속기의 직분제어회로를 고려한 에너지함수를 유도하였고, 1기 무한대 모선 계통에 적용하여 안정도를 판정할 수 있음을 보였다. 이 때 에너지함수로부터 불안정평형점을 구하여 안정영역을 결정하였고, 임계고장제거 시간도 구할 수 있었다. 제시된 에너지함수는 시스템 제어제를 고려할 수 있는 에너지함수 개발에 최초의 성과로 여자기 등 타 제어제를 고려한 에너지함수 유도에 기본 이론이 적용될 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] Y.H. Moon, "Complex Integral Approach to Derive Energy Function for Direct Method of Power System Stability Analysis", submitted to IEEE Trans. on Circuit and System Analysis.
- [2] M.K. Pai, Computer Techniques in Power System Analysis, McGrawHill publishing Co. 1979.
- [3] A.A. Fouad, V.Vittal, "Direct Transient Stability Analysis using Energy Functions application to Large Power Networks", IEEE Trans. on Power System Vol. PWRS-2, No.1 Feb. 1987 pp.37-44
- [4] E.W.Kimbark, Power System Stability, John Wiley & Son, 1948.
- [5] G.A. Luders, "Transient Stability of Multimachine Power Systems via the Direct Method of Lyapunov." IEEE Trans. Power Apparatus and System Vol. PAS-90, No. 1 pp.25-35, Jan/Feb. 1971