

에너지함수를 이용한 실계통에서의 과도 안정도 평가 적용

권태원*, 이경재*, 이병하*, * 함완균*

* 한전기술연구원 계통연구실

Transient Stability assessment in the real power system using Energy Function.

Kwon Tae Won*, Lee Kyung Jae*, Lee Byung Ha*, * Ham Wan Kyun*

Abstract

Transient stability analysis of Korea Electric Power Corporation(KEPCO) system is conducted by time simulation method, and the method is robust and reliable.

But, time simulation consumes enormous computing resources and engineering time, and it does not provide a measure of the degree of stability of the system.

Therefore, this method does not apply to every changed condition appropriately and quickly in planning and operating.

And Transient Energy Function (TEF) method whis can assess quickly and quantitatively the degree of stability of the system and which judges the stability and the instability to analyse transient dynamic charater of the system by mutual changing kinetic energy and potential energy, is developed.

TEF method analyses the first swing transient stability of the system by using the thought that if after disturbance happening, the increase of all the rotator kinetic energy changes into the potential energy after disturbance clearing, the system is stable, otherwise the system is unstable.

This paper represents the availability of the TEF method by comparing with time simulation method on the two cases.

1. 서 론

전력계통의 안정도 문제는 계통에 외란이 발생할 때 야기되며 외란의 특성과 크기에 밀접한 관계가 있으며, 외란의 영향이 크면 과도 기간동안의 계통 동요가 크게 된다. 이러한 계통 동요가 동기 탈조를 초래할 것인가, 혹은 계통이 동요를 극복하고 새로운 안정 운전상태로 이동하여 정착할 수 있는가 하는것이 전력계통 과도 안정도 문제이다.

한편 해석기법은 안정도 검토목적이 계획단계와 운용단계에서 다를 수 있는데 현재 과도 안정도 해석방법으로 널리사용되고 있는 방법은 일률적으로 시간 모의에 의한 방법으로 검토하고자 하는 운전 조건 및 계통 구성과 외란에 대해 수학적으로 표현한 계통변수의 시간 응답을 얻어 이를 분석하여 안정도를 분석한다.

이렇게 하여 얻어지는 정보는 안정 여부 판정에 국한되며 검토조건이 변화하면 시간 모의를 반복 시행해야 한다.

이 방법의 장점으로는 계통요소들을 자세히 표현할 수 있고 계통 요소들의 특성을 검토할 수 있다는 것이다.

그러나 계통규모가 커짐에 따라 컴퓨터 사용시간이 급격히 증가하고, 얻어진 결과 해석에 상당한 정련을 필요로 하며, 반복 모의의 수행에 의한 해석으로 모든 문제를 검토하기에는 한계가 있다.

따라서 시간 모의 방법의 장점을 최대한 이용하면서 단점을 보완하기 위한 새로운 해석 기법으로서 직접 방법에 의한 과도 안정도 해석 방법에 대한 연구를 수행하고 있으며, 본 연구에서는 직접 방법중 에너지 함수 방법에 의한 과도 안정도 해석프로그램 개발을 목표로 하였다.

이 방법은 과도 기간의 전력계통의 동특성을 운동에너지와 위치에너지의 상호변환으로 해석하는 것으로 사고는 발전기 회전자 운동에너지를 증가시키며 사고 제거후 발전기 회전자의 증가된 운동에너지가 모두 위치에너지로 변환되면 계통은 안정하고 그렇지 않으면 불안정하게 된다.

운동에너지를 위치에너지로 변환시켜 흡수할 수 있는 능력은 사고 제거 후 계통구성과 운전조건에 의해 결정되며, 이 에너지 흡수능력과 운동에너지와의 차이를 에너지 마진 개념으로 도입하면 에너지 마진을 이용하여 안정의 정도를 가늠할 수 있다.

2. 에너지 함수 방법의 개요

가. 배경

직접방법을 이용한 과도 안정도 해석은 계통 동요현상을 다음과 같이 설명한다. 계통에 발생하는 요란은 계통내에서 기계적 입력과 전기적 출력의 균형을 이루어 운전하고 있던 발전기들의 평형점을 교란시킨다. 이 평형점을 이탈한 발전기들은 기계적 입력과 전기적 출력간의 불균형으로 가속 혹은 감속하게 되는데 요란이 발생하는 위치와 크기, 계통은 전조건에 따라 발전기 회전자들의 운동이 다양하게 나타난다. 이때 기계적 입력과 전기적 출력간의 불균형이 계통에 과도에너지를 유입시키며 이 유입된 에너지는 동요기간 동안 발전기 회전자 운동에너지

의 증감, 계통내의 위치에너지 변화로 나타난다. 요란의 영향이 큰발전기일수록 동요가 크게 되며 계통으로부터 분리하려는 방향으로 운동한다. 이러한 발전기들이 계통으로부터 분리되는가 여부 즉 동기유지 여부는 계통이 외부로부터 유입된 에너지를 흡수하여 다른 형태의 에너지로 변환시킬 수 있는 능력 보유 여부에 달려있다.

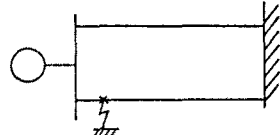
즉, 유입된 에너지에 의해 변화한 발전기 회전자의 운동에너지를 적절하게 흡수하지 못하게 되면 발전기는 평형점으로부터 계속 이탈하게 되고 결국은 계통으로부터 분리되고 만다.

에너지 함수방법에서는 이 유입된 에너지를 과도에너지(the transient energy)라 부르고 계통의 과도에너지 흡수능력(the transient energy absorbing capacity)를 계통의 임계에너지(critical energy)라 부른다.

나. 등면적법

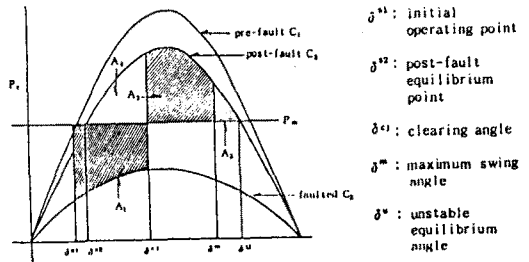
계통적 측면에서 등면적법(equal-area criterion)은 에너지 함수방법의 가장 오래 알려진 한형태이고 개념적으로 에너지 함수 방법을 설명하는 좋은 예라 할 수 있다.

[그림 1]의 1기 무한대 모선 계통에서 등면적법으로 안정도를 판정하는 경우를 살펴보자.



[그림 1] 1기 무한대 모선 계통

이 계통의 두 송전선 중 1회선에 고장이 발생하여 사고 송전선을 개방하여 고장을 제거한 경우를 상상하자. 이 문제를 등면적법으로 표시하면 [그림 2]와 같다. P_m 은 기계적 입력이고 고장전에는 평형점 δ^{01} 에서 운전하고 있다. 고장이 발생하면 torque angle curve가 C_0 로 변화하여 기계적 입력과 전기적 출력간에 불균형이 야기되어 발전기 회전자는 가속하게 되고 δ^{02} 점에서 고장이 제거되었다면 torque angle curve가 C_2 가 된다. 이후로는 전기적 출력이 기계적 입력보다 크게 되어 발전기 회전자는 감속하게 되고 area2가 area1과 같아지는 지점 δ^{03} 까지 동요하게 된다. Area1은 고장기간동안 계통에 유입되어 발전기회전자의 운동에너지로 변화된 에너지로 나타내며 area2는 고장 제거후 계통이 흡수하여 변화시킨 위치에너지에 해당한다. 여기서 에너지의 명칭은 물리적 의미를 가지며 이 경우에는 일의적으로 정의된다.



[그림 2] 등면적법에 의한 안정도 해석

Area3은 계통이 과도에너지를 흡수할 수 있는 여력을 나타내며 에너지 함수 방법에 의한 에너지마진이라 불리며 안정도 평가에서 아주 중요한 의미를 가진다. 즉 area3이 존재할때 계통은 안정하게 된다. 이후 계통은 고장 제거후의 평형점 δ^{02} 부근에서 진동하게 되며 system damping에 의해 결국 δ^{02} 로 수렴하게 된다.

고장 제거후의 torque angle curve를 살펴보면 2개의 평형점(δ^{02} , δ^{04})이 있음을 알게 되고 δ^{02} 에서의 동기화 계수는 양인데 반해 δ^{04} 에서의 동기화 계수는 음임을 알 수 있다. 즉 δ^{02} 는 안정 평형점(stable equilibrium point, SEP)이고 δ^{04} 는 불안정 평형점(unstable equilibrium point, UEP)이다.

또한 δ^* 는 최대 동요각임을 쉽게 알 수 있고 area3가 영이 되는 고장제거점이 임계고장 제거점 δ^{cr} 이 됨을 알 수 있다.

에너지 함수방법에서는 area1 + area3 + area4가 임계에너지이고 이들의 차이 즉 area3가 에너지마진이다.

3. 에너지 함수방법의 정식화

가. 전력계통의 수학적 표현

에너지 함수방법에 의한 과도 안정도 해석은 스위치 고전도 모델을 이용하여 이 모델은 다음과 같은 가정에 기초를 둔다.

- 1) 송전계통은 정상상태 network방정식으로 표현된다. 이것은 송전망의 시정수는 동요에 따른 전기 기계적 진동의 주파수와 비교해서 무시할 수 있다는 뜻을 내포하고 있다.
- 2) 동기기는 d축 과도 리액턴스와 직렬로 연결된 일정 크기의 배후전압 원으로 표시한다.
- 3) 기계적 입력 P_m 는 "fast swing" 기간동안에는 일정하며 그 값은 사고 이전(pre-fault)시의 값과 같다고 가정한다.

따라서 전력계통의 동특성을 고전도 모델을 사용하여 표현하면 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_i - P_{ei} \\ \dot{\delta}_i = \omega_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

여기서
 n : 발전기 수
 M_i : 발전기 i의 관성중심수
 ω_i : 발전기 i회전자의 속도 편차 (동기속도로 회전하고 있는 기준축에 대하여)
 δ_i : 발전기 i회전자 위상각 (동기속도로 회전하고 있는 기준축에 대하여)
 $P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii}$
 $P_{ei} = \sum_{j=1}^n (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij})$
 P_{mi} = 발전기 i의 기계적 입력(일정)
 식(1)은 동기속도로 회전하고 있는 기준축에 대해 표현되었다.

나. 관성중심 기준축에 의한 정식화

에너지 함수방법의 중요한 과정은 기준축을 동기속도로 회전하고 있는 축으로부터 발전기 회전자의 관성중심(center of inertia, COI)축으로 변형하여 정식화하는데 있다.

관성중심축에 의한 모델링 개념은 전력계통 과도 안정도가 발전기들의 개별 운동보다는 발전기간의 상호운동에 의해 결정된다는데 기초를 두고 있다.

COI 변화의 중요성은 계통으로부터 분리되려는 발전기들의 운동을 잘 나타내며 또한 이런 발전기들의 운동과는 직접적으로 관련이 없고 다만 관성중심축을 가속시키고, 변환시키는 에너지를 제거하는데 있다. 즉 이 변환을 통해서 계통으로부터 발전기들을 분리시키려고 작용하는 힘과 발전기들의 운동과 관련되어지는 에너지 요소들을 쉽게 의식할 수 있다.

$$M_T \ddot{\omega}_T = \sum_{i=1}^n M_i \ddot{\omega}_i \\ \delta_0 = \sum_{i=1}^n M_i \delta_i / M_T, \quad \omega_0 = \dot{\delta}_0$$

라고 정의하면 식(1)로부터 다음과 같은 관성중심축 운동방정식을 얻게 된다.

$$M_T \ddot{\omega}_T = \sum_{i=1}^n (P_i - P_{ei}) \sin P_{corT} \quad (2)$$

관성 중심축을 기준으로 하여 상대변수를 다음과 같이 정의하면

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0, \quad \tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0$$

식(1)-식(2)로부터

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_i - P_{ei} - M_i / M_T P_{corT}, \quad \theta_i = \tilde{\omega}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

을 얻게 된다. 아울러 정의에 의해

$$\sum_{i=1}^n M_i \theta_i = 0, \quad \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i = 0$$

임을 알 수 있다.

다. 평형점(Equilibrium Point)

계통의 모든 상대변수의 변화량이 0이 되는 점을 평형점이라 부르는데 물리적 의미로는 계통궤적이 일단 이점에 도달하게 되면 외부로부터 다른 영향이 없는 한 계속 이곳에 머무른다는 것을 의미한다. 따라서 이 점을 Rest Point 혹은 Stationary Point라 부르기도 한다. 식(3)과 같이 표현한 미분방정식의 평형점은 우변을 0으로 놓은

$$0 = P_i - P_{ei} - M_i / M_T P_{corT} \\ 0 = \tilde{\omega}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

비선형 연립 방정식의 해가 된다.

외란이 제거된 후의 계통의 평형점의 수는 발전기수의 증가에 따라 크게 증가하는데 발전기 회전자 위상각 공간($-180 < \theta_i < 180$)에서 두개의 중요한 평형점을 갖게 된다. 이중 하나는 외란제거후 계통의 안정 평형점(Stable Equilibrium Point, SEP)으로 조류계산의 해가 되며 다른 하나는 스위치 제어 불안정 평형점(The Controlling Unstable Equilibrium Point, CUEP)가 된다. 제어 불안정 평형점의 물리적 의미는 외란이 임계적으로 제거되면 이후 계통의 궤적은 이점 근방을 통과한다 것이다. 즉 검토대상이 되는 안정도는 이 점에 의해 결정되며, 이 점에는 불안정 모드에 관한 정보가 포함되어 있다.

따라서 이 CUEP의 정확한 판별과 계산은 정확한 안정도 평가를 위해 대단히 중요하다. 평형점에서 각 발전기들의 COI속도 편차와 가속도는 0이되어 발전기간 상호운동이 정지된 상태와 다름없다. 시스템운동과 시스템에너지 관점에서 보면 시스템에너지는 안정평형점에서 최소가 되고 불안정 평형점에서 상대적으로 극대가 된다.

라. 평형점의 계산

평형점은 (4)을 만족하는 값 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ 이다. 즉 평형점은

$$f_i(\theta) = P_i - P_{ei} - M_i / M_T P_{corT} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

을 만족하는 해의 집합인데 평형점 계산은 (5)식을 만족하는 값 θ 를 어떤 방법으로 어떻게 찾는가를 다루는 문제이다. 위와 같은 비선형 연립 방정식은 위상각 공간에서 다근을 갖게되고 반복법에 의해 해를 구하기 때문에 초기조건에 따라 안정 평형점(SEP)과 불안정 평형점(UEP)을 같은 알고리즘으로 구한다.

- STEP1 $\theta_1^{(0)}, \theta_2^{(0)}, \dots$ 로부터 $X_1^{(0)}, X_1^{(0)}, \dots, X_{n-1}^{(0)}$ 를 구한다.
- STEP2 $f_i(X) = 0, i = 1, 2, \dots, r, \dots, n-1$ 를 푼다. Jacobian matrix를 이용한다.
- STEP3 $X_1^*, X_2^*, \dots, X_{n-1}^*$ 로부터 $\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_n^*$ 를 구한다.

$$\theta_n = -\frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{n-1} M_i X_i \\ \theta_i = X_i + \theta_n \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

5) 에너지 함수의 정의

일차 적분(혹은 에너지 적분)에 의해 얻어지는 에너지 함수는 STEP를 적분구간의 하한값으로 하며 다음과 같이 주어진다.

$$V = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n [M_i \dot{\omega}_i^2 - P_i + P_{ei} + M_i / M_T P_{corT}] \dot{\theta}_i dt$$

이 식은 i번째 사고후 운동방정식에 θ_i 를 곱해서 모두 합한 것을 적분한 것이며 $\omega(t_0) = 0, \theta(t_0) = \theta^*$ 인 평형점을 가지는 t_0 를 적분 구간의 하한값으로 잡는다.

이 식을 정리하면 다음과 같은 결과식을 얻는다.

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^*) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-1} [C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^*) - \int_{\theta_{ij}^*}^{\theta_{ij}} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j)]$$

에너지 함수의 각 항은 물리적 의미를 가지는데, 첫째항은 운동에너지, 둘째항은 회전자 Position에너지, 셋째항은 마그네틱 에너지, 네째항은 Dissipation에너지이고 마지막 세항을 합쳐서 위치에너지라 부른다. 이 에너지 함수로부터 외란제거시의 회전자 위상각 및 속도들 대입하여 과도 에너지를 계산하고 임계 에너지는 제어불안정 평형점에서 위치에너지로 주어진다. 즉 에너지 적분에서 적분상한 값을 사고 제거 시점으로 하면 과도에너지를 얻게 되고, 적분 상한값이 제어 불안정 평형점이면 임계 에너지를 얻게 된다. 이때 네째항 계산은 선형 궤적 근사화를 사용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\int_{\theta_{ij}^*}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) = D_{ij} \frac{\theta_i^4 + \theta_j^4 - \theta_{ij}^4 - \theta_{ij}^4}{\theta_{ij}^4 - \theta_{ij}^4} \sin(\theta_{ij} - \theta_{ij}^*)$$

한편 계통분리 Mechanism은 계통으로부터 분리되려는 발전기가 2대 이상일 경우 이들 발전기 근과 나머지 발전기근간의 Gross Motion에 의해 결정된다.

이 개념은 Coherency 개념과 궤를 같이하고, 또 빨리 변화하는 모드와 천천히 변화하는 모드의 구분 즉 Time Separation에도 적용된다. 따라서 각각의 그룹내에서 발전기간 상호운동에 관련된 운동에너지는 계통 불안정에 영향을 주지 아니하므로 이에 해당하는 에너지는 제외되어야 한다.

이들 운동에너지 정정(Kinetic Energy Correction)이라 부르고 정정된 에너지는 다음과 같이 주어진다. 일반적으로 n 까지 발전기가 계통으로부터 분리될 때

$$M_T = \sum_{i=1}^k M_i, \quad M_T = \sum_{i=k+1}^n M_i \\ W_T = \sum_{i=1}^k M_i \tilde{\omega}_i / M_T, \quad W_T = \sum_{i=k+1}^n M_i \tilde{\omega}_i / M_T \quad \text{이라하면}$$

$$M_{02} = M_I \cdot M_{II} / M_I + M_{II}, \quad \omega_{02} = \omega_I - \omega_{II} \text{ 가 되고}$$

장정된 운동에너지 $V_{KE}/corr$ 는

$$V_{KE}/corr = \frac{1}{2} M_{02} \omega_{02}^2 \text{ 로 주어진다.}$$

이 운동에너지가 불안정 요인이 되는 운동에너지이며 에너지 해석에 의한 안정도 평가에는 반드시 이 값을 사용해야 한다.

4. 불안정 모드 결정 방법

가. 불안정 모드의 결정

제어 불안정 평형점을 계산하기 위한 초기조건으로서의 불안정 모드의 결정은 다음과 같다.

외란이 제거된 후 계통궤적이 진행하는 방향에 존재하는 후보 불안정 모드들 i, j 발전기에 의한 것으로 하면 근사 불안정 평형점을 다음과 같이 계산한다.

$$\theta = [\theta_1^i, \theta_2^i, \dots, \pi - \theta_1^j, \dots, \pi - \theta_2^j, \dots, \theta_n^k]$$

여기서 θ : 외란 제거후 안정평형점

이렇게 계산된 근사 불안정 평형점은 $\sum M_i \theta_i = 0$ 조건에 위배되므로 관성 중심 이동을 고려하여 보상한다. 이와 같이 하여 얻어진 불안정 평형점 값을 이용하여 위치에너지 마진 ΔV_{PE} 를 계산한다. 위와 같은 방법으로 각 후보모드에 대해 계산된 위치에너지 마진을 정정된 운동에너지로 정규화 하였을 때 가장 작은 위치에너지 마진을 갖는 모드가 불안정 모드가 된다. 이로부터 정확한 제어 불안정 평형점 계산이 시작된다.

나. 후보 불안정 모드의 선정

불안정 모드를 결정하기 위해서는 주어진 외란조건에 대해 적절한 후보 모드를 선택할 수 있어야 하는데 예상되는 모든 모드에 대한 검토는 그 계산량이 방대하므로 실제적이지 못하다. 일반적으로 계통해석은 대상 계통에 대한 감각이 있는 계통 분석가가 실시하므로 경험이나 분석대상으로 하는 경우의 특성을 사전에 예측한 것에 기술적 판단요소를 가미하여 후보를 선정한 후 입력데이터도 활용하여 불안정 모드를 판별하는 방법이 사용된다. 그러나 계통규모(발전기 수 축면에서)가 커지고, 계통 구성이 복잡한 경우는 후보모드 선정이 용이하지 않게 될 수가 있다. 이런 경우 대상 계통 특성과 외란의 영향을 추정할 수 있는 index 즉, 외란 제거 시점의 각 발전기의 운동에너지와 가속력을 이용하여 후보모드 선정하는 방법이 사용된다. 참고문헌은 후보모드 선정에 이용되는 값으로 발전기의 운동에너지와 가속력을 이용하여 전체 운동에너지 대신 정정된 운동에너지가 큰 발전기 그룹이 실제의 불안정 모드가 될 가능성이 높은 것으로 하였으나 이 과정에서 실제 불안정 모드에 속하는 발전기가 제외된 가능성이 있다. 따라서 후보모드 선정에 사용되는 운동에너지는 정정된 운동에너지 뿐만 아니라 각각의 발전기가 가지는 운동에너지 정보도 이용해야 한다.

이를 정리하면 제어불안정 모드 결정과정은 다음과 같이 이루어진다.

5. 안정도 해석

에너지 함수 방법에 의한 전력계통 과도 안정도 해석은 다음과 같이 이루어진다.

- step1 : 조류계산 결과 및 발전기 데이터를 입력시켜 발전기 내부모션 전압(E)과 위상각(δ)을 계산한다.
- STEP2 : 외란기간 및 외란 제거후 계통을 발전기 내부모션까지 축소하여 어드미턴스 행렬(Y Matrix)을 계산한다.
- step3 : 외란 제거시의 발전기 최전자 위상각(θ^i) 및 속도(ω^i)를 계산한다.
- step4 : 외란 제거후 계통의 안정 평형점(SEP)을 계산한다.
- step5 : 불안정 모드를 결정하여 제어불안정 평형점(the controlling UEP)를 계산한다.
- step6 : (θ^i, ω^i) 에서의 과도에너지 V^i 와 제어불안정 평형점 (the controlling UEP)에서의 위치에너지(임계에너지) V^u 를 계산한다.
- step7 : 임계에너지와 과도에너지의 차이 즉 에너지 마진 $\Delta V = V^i - V^u$ 를 계산한다.

안정도 판정 : 만일 에너지 마진이 영보다 크면 계통은 안정하고 음이 되면 불안정하다.

위와 같은 에너지 마진은 계통의 안정도를 판별하는 척도로 사용될 수 있으며 이런 성질을 이용하여 사고에 따른 계통의 동기 달로가 예측될 시 안정화 제어 도구로 사용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

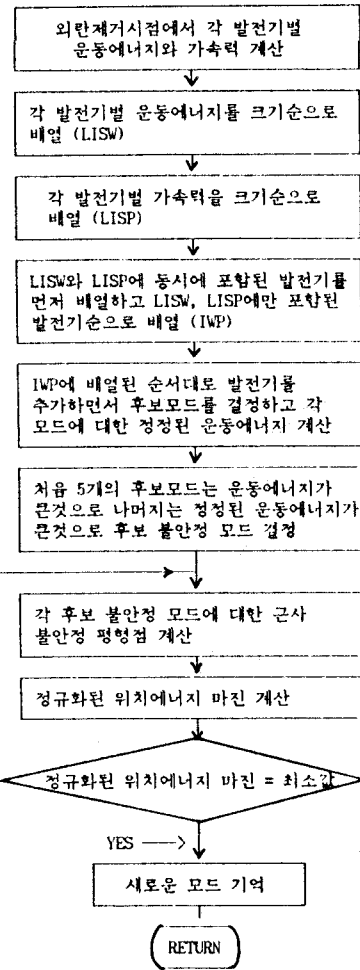
6. 실계통 적용 결과

검토 대상 계통

에너지 함수 방법에 의한 전력계통의 과도 안정도 평가대상으로 한 계통은 총 발전량과 부하가 [표 3]과 같은 계통이다. [표 3] 대상계통의 총 발전량과 부하

발전량(MW)	역률 (%)	부하 (MW)	역률 (%)
18,215	93.1	17,878	90.6

위 대상 계통은 76기의 발전기가 운전하고 있으며 계통구성의 특징은 위상상으로 구성된 345KV 기간 송전망 계통의 외곽지역에 분포된 발전기 한곳만 대표되고 운전상의 특징은 남부지역에 밀집된 전원으로부터 북서 지역의 부하 중심지로 전력 조류의 흐름으로 대표되고 있다.



전선별 구성비를 살펴보면 원자력 발전 구성비가 38%가 되는 계통운전 특성을 보이고 있다.

검토 조건

적용사고(contingency)는 345KV 모선부분의 송전선로 사고가 발생하여 60Hz후 차단기 동작에 의한 선로개방으로 사고를 제거하는 것을 모의 하였다.

적용사고와 사고 제거를 위한 선로개방은 [표 4]와 같다.

[표 4] 적용사고

Case 번호	사고발생모션	개 방 선 로
Case 1	신양산	고리 #5, 6 - 신양산 1 고리 #5, 6 - 신양산 2
Case 2	울진	울진 - 신영주 1 울진 - 신영주 2

검토내용

위의 대상계통에 검토조건을 적용하여 계산한 에너지 해석과 불안정 모드는 [표 5]와 같다.

[표 5] 불안정 모드 및 에너지 해석결과

Case 번호	critical energy	energy margin		정정된 운동 에너지	불안정 모드
		ΔV	$\Delta V/V_{KE}/corr$		
1	9.73514	6.85097	3.78970	1.807779	고리 #5 고리 #6
2	8.28221	5.27161	3.94533	1.33616	울진 #1 울진 #2

이상에서 에너지 마진이 영보다 크므로 안정한 것으로 판명되었다.

한편 임계교각 제거시간(critical clearing time)계산결과와 [표 6]에 PSS/E Simulation결과와 함께 정리하였다.

[표 6] 임계고장 제거시간 비교

Case번호	TEF로 계산한 CCT	Simulation에 의한 계산 안정 불안정
1	0.1896	0.2167 - 0.2250
2	0.2131	0.2000 - 0.2083

임계고장 제거시간 계산을 위한 PSS/E 시뮬레이션결과를 다음그림과 같다.

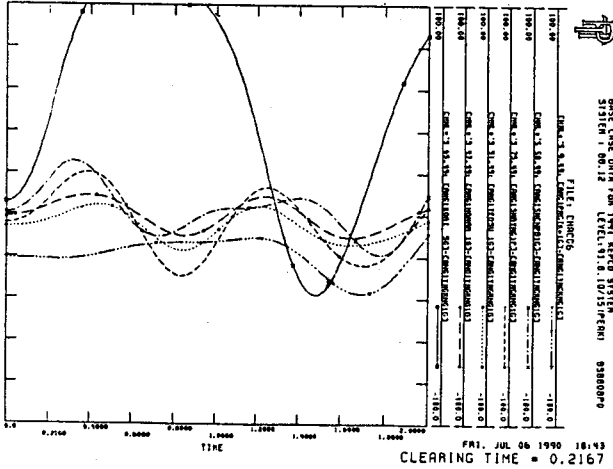


그림 (A-1) case 1: 일계 안정한 경우

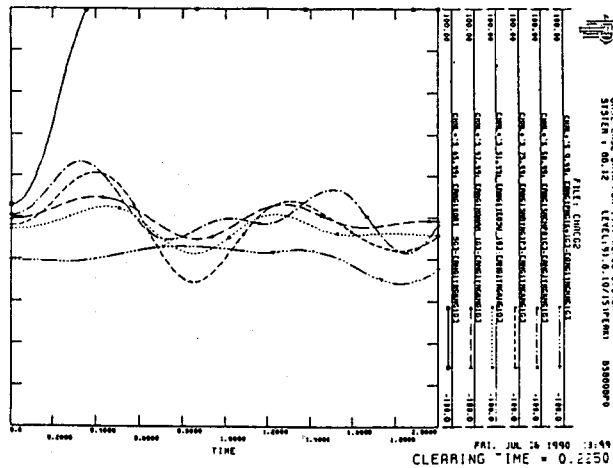


그림 (A-2) case 1: 일계 불안정한 경우

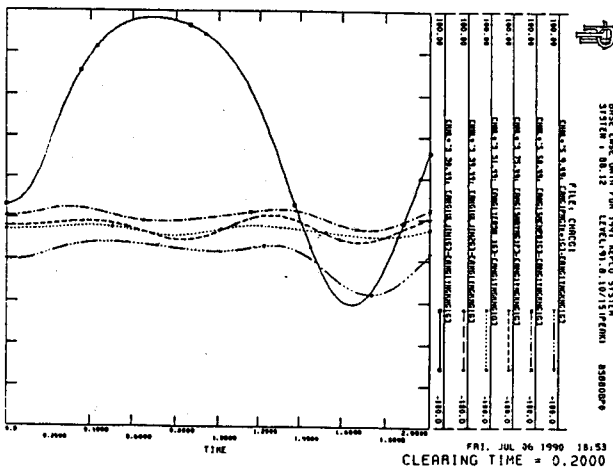


그림 (A-3) case 2: 일계 안정한 경우

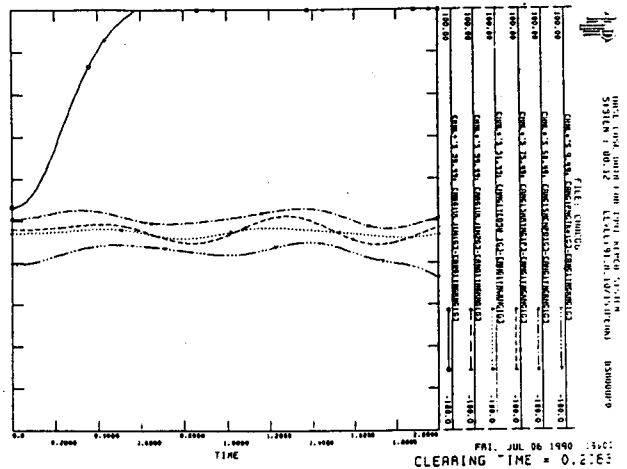


그림 (A-4) case 2: 일계 불안정한 경우

6. 결론

본 연구에서는 에너지 함수 방법을 이용한 전력계통의 과도 안정도 해석 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서 중점적으로 검토된 사항을 정리하면 다음과 같다.

○ 시간 모의 방법에 의하지 않고 직접 방법으로 전력계통의 과도안정도를 평가하고 안정 혹은 불안정의 정도를 에너지 마진 개념과 이 마진을 결정된 운동에너지로 정규화하여 계통의 안정 여유를 정량적으로 분석할 수 있는 프로그램의 개발을 목적으로하여 직접 방법중 현재 시점에서 실제용 적용 가능성이 가장 높은 에너지 함수 방법에 의한 프로그램을 개발하였다.

○ 한전 계통해석 Tool로서 한전 실무 engineer들이 편리하게 사용할 수 있도록 PSS/E 패키지의 데이터 베이스를 최대한 이용할 수 있도록 개발되었다.

○ 에너지 함수 프로그램에서는 한전 계통특성을 고려하여 제어불안정 평형점 계산을 위한 후보 불안정 모드 선정을 자동화하여 프로그램에서 처리하도록 하였다.

이는 실무 사용자로 하여금 후보 불안정모드 선정에 유연성을 갖게 하기도 할 뿐 아니라 계통 분석가가 제시하는 후보 모드와의 상호 비교로 계통 분리 mechanism에 대한 이해를 증진 시킬 수 있다.

참고문헌

1. Fouad, A.Krueple, K. C., Mamandur, K. R. C., "Transient Stability Margin as aToll for Dynamic Security assesment." EPRI Report EL-1755, March 1981.
2. Fouad, A.A.,Vittal, V., and Tadyoo Oh. "Critical Energy for Direct Transient Stability Assesment of a Multimachine Power System." IEEE Trans., PAS-103(Aug 1984) : 2199-2206
3. Fouad, A. A., Vittal, V., Rajagopal, S, Carvalho, M. A., Tang, C.K., Mitche, J.V., and Pereira, M.V. "Direct Transient Stability Analysis Using Energy Functions: Application Stability to Large Power Networks." Paper No. 86WM066-5 Presented at the IEEE/PES Meeing, New York, NY, Feb. 1986.
4. Fouad, A.A., Ghafurion -A., Nodehi, K., and Mansour, Y. "CALCULATION, of Generation- Shedding Requirements of B.C. Hydro System Using transient Energy function." IEEE Trans., PWR-1, No.2(1986) : 17-24
5. Fouad, A.A., Vittal, V., Oh, T., and raine, J.G."Investigation of Loss of Generation Disturbances in Florida Power Light Co. Network by the Transient Energy Function Method." IEEE Trans., PWR-1, No.3(1989) : 80-88
6. KRC-87S-J02, "에너지 함수를 이용한 전력계통의 과도 안정도 평가에 관한 연구" 최종보고서. 1990. 5