

에너지 함수 방법에 의한 계통의 과도 안정도
해석시 불안정 모드 선정에 관한 연구

오테규 전영환*
한국전기연구소

권태원 추진부 이근준 함한근
한전기술연구원

A Study on the Selection of MOI in the Transient Energy
Function Method for Power System Transient Stability

T.K. Oh Y.H. Chum
KERI

T.W. Kwon J.B. Choo K.J. Lee Y.K. Ham
KEPCO

Abstract

In this paper, the selection method of MOI was modified and was applied to KEPCO power system. The results are better than that obtained from the previous method and compare well with those obtained by time simulation.

Key words : The Transient Energy Function, Transient Stability, Time Simulation.

1. 서론

전력계통의 과도 안정도 해석 방법으로 지금까지 널리 사용되고 있는 시간 모의 방법은 계산 시간이 많이 걸려 사용에 어려움이 따른다. 이런 문제를 해결하기 위해 현재 에너지함수 방법 및 신경회로망을 이용한 계통 과도 안정도 해석을 위한 새로운 방법이 활발히 연구되고 있으며 특히, 에너지 함수 방법에 있어서 주목할 만한 결과가 발표되고 있다. 에너지 함수 방법의 발달 과정에 있어서 과도 에너지의 임계 에너지의 인식이 정확한 안정도 해석 결과를 얻는데 크게 기여했다. 그러나 임계 에너지를 계산하기 위해서는 올바른 불안정 모드를 알아내야 하며 그 불안정 모드에 대한 정확한 평형점(불안정 평형점) 계산이 매우 중요하다. 불안정 모드 결정은 적절한 후보모드의 선택과 선택된 후보모드 중 올바른 불안정 모드 선정으로 구분하여 이루어진다. 실제적인 대규모 계통에서 후보모드 선정은 계통 분석가의 기술적 판단에 의한 방법과 계통 조건으로 부터 자동으로 선택하는 방법으로 구별할 수 있는데 여기서 자동 선택시 경험한 문제점에 대해 설명하고 그 해결 방안을 제시하였다.

II. 수학적 정식화

전력계통의 운동방정식을 고전모델¹⁾을 사용하여 표현하면 운동 방정식은 다음과 같이 된다.

$$M_i \ddot{\delta}_i = P_i - P_{ei}$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

여기서

- n : 발전기 수
- M_i : 발전기 i의 관성계수
- ω_i : 발전기 i 회전자 속도 편차
(동기속도로 회전하고 있는 기준축에 대해)
- δ_i : 발전기 i 회전자 위상각
(동기속도로 회전하고 있는 기준축에 대해)

$$P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii}$$

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij})$$

P_{mi} : 발전기 i의 기계적 입력 (일정)

식 (1)은 동기속도로 회전하고 있는 임의의 기준축에 대해 표현된 것이며 이 식을 관성중심 기준축으로의 변환하여 표현하는 것이 에너지 함수 방법 정식화의 중요한 과정이 된다. 관성 기준축 변환은 계통분리 Mechanism을 보다 분명히 나타내며, 불안정에 영향을 주지 않고 관성 중심축 운동에만 관련된 에너지를 제거 한다. 관성 중심축 변환을 위해

$$M_T \dot{\omega}_0 = \sum_{i=1}^n M_i \dot{\omega}_i$$

$$\delta_0 = \sum_{i=1}^n M_i \delta_i / M_T$$

$$\omega_0 = \dot{\delta}_0$$

라고 정의하면 식 (1)로부터 다음과 같은 관성 중심축 운동 방정식을 얻게 된다.

$$M_T \dot{\omega}_0 = \sum_{i=1}^n (P_i - P_{ei}) = P_{\omega 0} \quad (2)$$

관성 중심축을 기준으로 하여 상태변수를 다음과 같이 정의 하면

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0$$

$$\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0$$

식 (1) - 식 (2)로부터

$$M_i \ddot{\theta}_i = P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{\omega 0}$$

$$\dot{\theta}_i = \tilde{\omega}_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

을 얻게 된다. 아울러 정의에 의해

$$\sum_{i=1}^n M_i \dot{\theta}_i = 0$$

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

임을 알 수 있다.

III. 에너지 함수

식 (3)과 같이 표현한 미분 방정식의 평형점은 우변을 영으로 놓은

$$0 = P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{\omega 0}$$

$$0 = \tilde{\omega}_i \quad i=1,2,\dots,n$$

비선형 연립 방정식의 해가 된다. 외란이 제거된 후의 계통의 평형점의 수는 발전기수의 증가에 따라 크게

증가 하는데 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 소위 제어 불안정 평형점 (The Controlling Unstable Equilibrium Point, UEP)가 된다. 제어불안정 평형점의 물리적 의미는 외란이 임계적으로 제거되면 이후 계통의 궤적은 이점 근방을 통과 한다는 것이다. 즉 검토대상이 되는 안정점이 점에 의해 결정되며, 이점에는 불안정 모드에 관한 정보가 포함되어 있다. 따라서 이 UEP의 정확한 판별과 계산은 정확한 안정도 평가 위해 대단히 중요하다. 일차적분 (혹은 에너지 적분)에 의해 얻어지는 에너지 함수는 SEP를 적분구간의 하한값으로 하며 다음과 같이 주어진다.

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \dot{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^0) - \int_{\theta_{ij}^0}^{\theta_{ij}} D_{ij} \cos \theta_{ij} d\theta_{ij}] \quad (4)$$

에너지 함수의 각항은 물리적 의미를 가지는데, 첫째항은 운동에너지, 둘째항은 회전자 position 에너지, 셋째항은 마그네틱 에너지, 넷째항은 Dissipation 에너지이고 마지막 세항을 합쳐 위치에너지라 부른다. 이 에너지 함수로부터 외란제거시의 회전자 위상각 및 속도를 대입하여 과도 에너지를 계산하고 임계 에너지는 제어불안정 평형점에서 위치에너지로 주어진다. 이때 네째항 계산은 선형적 근사화를 사용하여 계산한다. 한편 계통 분리 Mechanism은 계통으로부터 분리되려는 발전기가 2대 이상일 경우 이들 발전기군과 나머지 발전기군 간의 Gross Motion에 의해 결정된다. 이 개념은 Coherency 개념과 궤를 같이하고, 또 발리 변화하는 모드와 천천히 변화하는 모드의 구분 즉 Time Separation에도 적용된다. 따라서 각각의 그룹 내에서의 발전기간 상호운동에 관련된 운동에너지는 계통 불안정에 영향을 주지 아니하므로 이에 해당하는 에너지는 제외되어야 한다. 이를 운동에너지 정정 (Kinetic Energy Correction)이라 부르고 정정된 에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$M_I = \sum_{i \in I} M_i$$

$$M_{II} = \sum_{i \in II} M_i$$

$$\omega_I = \sum_{i \in I} M_i \tilde{\omega}_i / M_I$$

$$\omega_{II} = \sum_{i \in II} M_i \tilde{\omega}_i / M_{II} \quad \text{이라 하면}$$

$$M_{eq} = \frac{M_I \cdot M_{II}}{M_I + M_{II}}$$

$$\omega_{eq} = \omega_I - \omega_{II} \quad \text{가 되고}$$

정정된 운동에너지 $V_{KEIcorr}$ 는

$$V_{KEIcorr} = \frac{1}{2} M_{eq} \omega_{eq}^2 \quad (5)$$

로 주어진다. 이 운동 에너지가 불안정 요인이 되는 운동 에너지이며 에너지 해석에 의한 안정도 평가에는 반드시 이 값을 사용해야 한다.

IV. 불안정 모드 결정 방법

1. 불안정 모드의 결정

제어불안정 평형점을 계산하기 위한 불안정 모드의 결정은 참고문헌¹⁾에서와 같이 한다. 즉 외란이 제거된 후 계통 궤적이 진행하는 방향에 존재하는

후보 불안정 모드를 i, j 발전기에 의한 것으로 하면 근사 불안정 평형점 ω 다음과 같이 계산한다.

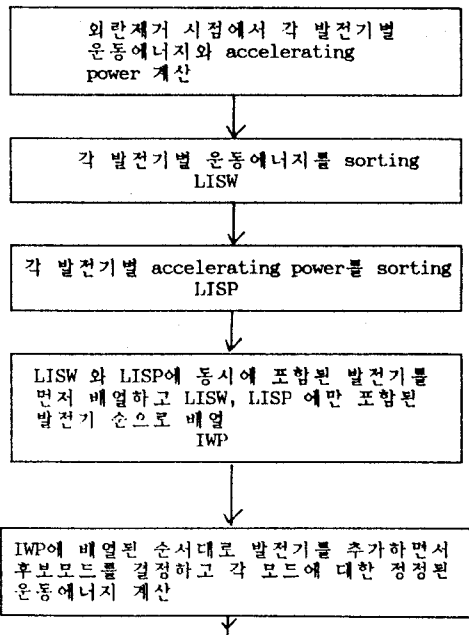
$$\omega^0 = [\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \omega - \theta_1^0, \dots, \omega - \theta_2^0, \dots, \theta_n^0]$$

여기서 θ^0 : 외란 제거후 안정평형점

이렇게 계산된 근사 불안정 평형점은 $\sum M_i \omega_i = 0$ 조건에 위배되므로 관성 중심 이동을 고려하여 보정한다. 이와 같이 하여 얻어진 불안정 평형점을 이용하여 위치에너지 마진 ΔV_{pe} 을 계산한다. 위와같은 방법으로 각 후보모드에 대해 계산된 위치에너지 마진을 정된 운동에너지로 정규화 하였을 때 가장 작은 위치에너지 마진값을 갖는 후보 불안정 모드가 된다. 이로부터 정확한 제어불안정 평형점 계산이 시작된다.

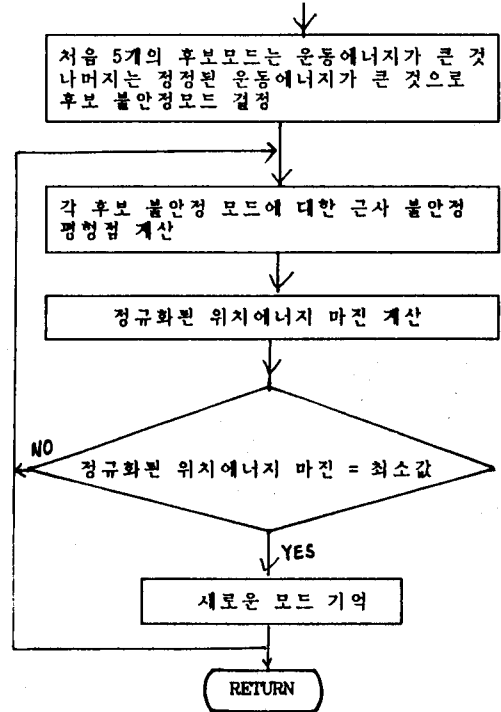
2. 후보 불안정 모드의 선정

불안정모드를 결정하기 위해서는 주어진 외란 조건에 대해 적절한 후보모드를 선택할 수 있어야 하는데 예상되는 모든 모드에 대한 검토는 그 계산량이 방대하므로 실제적이지 못하다. 일반적으로 계통 해석은 대상계통에 대한 감각이 있는 계통 분석가가 실시하므로 경험이나 분석대상으로 하는 case의 특성을 사전에 예측한 것에 기술적 판단요소를 가미하여 후보를 선정할 후 입력 데이터로 활용하여 불안정 모드를 판별하는 방법이 사용된다. 그러나 계통 규모(발전기 수 측면에서)가 커지고, 계통 구성이 복잡한 경우는 후보 모드 선정이 용이하지 않게 될 수가 있다. 이런 경우 대상계통 특성과 외란의 영향을 측정할 수 있는 index 즉, 외란제거 시점의 각 발전기의 운동에너지와 accelerating power를 이용하여 후보모드를 선정하는 방법이 사용된다. 참고문헌은 후보모드 선정에 이용되는 값으로 발전기의 운동에너지와 accelerating power를 이용하여 전체 운동에너지 대신 정정된 운동에너지가 큰 발전기 그룹이 실제의 불안정모드가 될 가능성이 높을 것으로 하였으나 이 과정에서 실제 불안정 모드에 속하는 발전기가 I 가능성이 있다. 따라서 후보 모드 선정에 사용되는 운동에너지는 정정된 운동에너지 뿐만 아니라 각각의 발전기가 가지는 운동에너지 정보를 이용하여야 한다. 이를 정리하면 제어불안정모드 결정과정은 다음과 같이 이루어진다.



case 번호	사고발생모션	사고제거를 위한 개방선로
case 1	708	704-708 1
case 2	303	704-708 2
case 3	303	303-304 1
case 4	502	303-304 2
case 5	504	302-303 1
case 6	504	302-303 2
case 7	708	501-502 1
case 8	103	501-502 2
case 9	402	503-504 1
case10	301	503-504 2
case11	402	504-402 1
case12	503	504-402 2
case13	602	708-602 1
case14	704	708-602 2
		101-103 1
		101-103 2
		101-402 1
		101-402 2
		201-301 1
		201-301 2
		504-402 1
		504-402 2
		503-504 1
		503-504 2
		602-708 1
		602-708 2
		704-708 1
		704-708 2

<표 1> case 별 사고 및 사고제거 데이터



V. 사례연구 결과

위 그림에서 제시한 방법을 1991년도 실제통에 적용하여 그 유용성을 검증해 보았다. 각 case 별 불안정 모드를 본 연구에서 개발된 프로그램 결과와 미국 PTI사에서 개발한 전력계통 해석 패키지 PSS/E 프로그램을 이용하여 얻은 결과와 비교하였다.

VI. 결론 및 토의

본 논문에서는 불안정 모드를 결정하기 위한 후보 모드 선정에 대해 살펴 보았다. 표1과 표2에서의 같이 비교적 식별하기 쉬운 불안정 모드 즉 plant 모드(case 1 - case 7)에 대해서는 동일한 결과를 얻고 있으나 area 모드에 대해서는 올바른 불안정 모드가 후보 모드 선정시 누락된 것을 알 수 있다. 한편 임계고장제거 시간이 0.5 초 이상으로 길어지는 사례에 대해서는 에너지함수 방법에 의한 임계고장제거 시간 오차가 증가하는 추세를 보이고 있는데 이는 과도에너지 계산상의 오차에 기인하는 것으로 추정되는데 이를 개선하기 위한 검토가 진행중이다.

참고 문헌

1. Magnuson, P. C. "Transient Energy Method of Calculating Stability." AIEE Trans., PAS-66 (1947) : 745-755
2. Aylett, P.D. "The Energy Integral Criterion of Transient Stability Limits of Power Systems." Proceedings of IEEE 105 (C) (1958): 527-528
3. Gless, G. E. "Direct Method of Lyapunov Applied to transient Power Stability." IEEE Trans., PAS-85 (Feb. 1966) : 158-168

case 번호	종래의 방법	임계사고제거 시간	
		제안된 방법	시간모의방법
case 1	0.1896	0.1896	0.2167-0.2250
case 2	0.2131	0.2131	0.2000-0.2088
case 3	0.2082	0.2082	0.2000-0.2083
case 4	0.2296	0.2296	0.2170-0.2250
case 5	0.2416	0.2416	0.2583-0.2667
case 6	0.3223	0.3223	0.3083-0.3170
case 7	0.2838	0.2838	0.3000-0.3083
case 8	0.4876	0.2116	0.2500-0.2750
case 9	0.3190	0.3190	0.3250-0.3500
case10	1.2198	0.4371	0.4500-0.5000
case11	0.3102	0.2711	0.3000-0.3250
case12	1.3891	0.3162	0.5000-0.6000
case13	1.0919	0.2723	0.3000-0.3500
case14	0.7189	0.2132	0.2500-0.3000

<표 2> 임계고장제거 시간 비교

4. El-Abiad, A. H. and Nagappan, K. "Transient Stability regions of Multimachine Power Systems." IEEE Trans., PAS-85 (Feb. 1966) : 169-179
5. Athay, T., Podmore, R. and Virmani, S. "A Practical Method fo Direct Analysis of Transient Stability." IEEE Trans., PAS-98 No. 2 (1979) : 573-584
6. Fouad, A. A., Kruempel, K. C., Mamandur, K. R. C., Stanton, S. E, Pai, M. A. and Vittal, V. "Transient Stability Margin as a Tool for Dynamic Security Assessment." EPRI Report EL-1755, March 1981.
7. Anderson, P. M. and Fouad, A. A. Power System Control and Stability. Ames, Iowa : Iowa State University Press, 1977.
8. Miller, R. K. and Michel, A. N. Ordinary Differential Equations. New York : Academic Press, 1982
9. 鈴木守, 柳橋健, 合田忠弘, 押田秀治, 대용량 전원 계통의 on-line 안정화 제어 방식. 전력 기술 연구회 자료, 자료번호 PE-88-98, 일본전기학회
10. Fouad, A. A., Vittal, V., and Taekyoo Oh. "Critical Energy for Direct Transient Stability Assessment of a Multimachine Power System." IEEE Trans., PAS-103 (Aug 1984) : 2199-2206
11. 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 to Large Power Networks." Paper No. 86 WM066-5 Presented at the IEEE-PES Meeting, New York, NY, Feb. 1986.