

에너지함수에 의한 통합안정도해석

문영현, 이응혁*, 이윤섭*, 오용택**, 김백***
연세대, 공주대*, 한국기술교육대**, 철도전문대***

Integrated Stability Analysis for Power Systems Using Energy Function

Young-Hyun Moon, Eung-Hyuk Lee, Yoon-Seop Lee*,Yong-Taeg Oh**,Baik Kim***
Yonsei Univ., Gongju Univ.*, Korea Tech.& Education Univ.**.Railroad Collage***

Abstract - This paper presents an integrated stability analysis by the direct energy function method based on Equivalent Mechanical Model(EMM) which reflects the system behavior related to both angle and voltage stabilities. Actually, angle and voltage stability are intimately related in power system, so complete decoupling of these stability analysis is not possible in general, particularly in stressed power systems. In this paper, it is shown that a identical energy function can be used for angle and voltage stability analysis. The proposed energy function reflects the line resistances and reactive powers under the constraints of the same R/X ratio. The energy margin between UEP and SEP presents a good collapse proximity index in both types of stability analysis.

1. 서론

최근 급격한 전력수요증가에 따라 계통안정성이 중요 문제로 부각되고 있고 87년 동계 정전사고 이후 전압 안정도는 세계적인 관심을 모으고 있다. 전력계통 안정도와 관련하여 종래에는 각안정도와 전압 안정도를 분리하여 별개의 연구과제로 다루어 오고 있으나, Overbye가 에너지함수를 전압 안정도 해석에 도입하면서부터 통합적인 안정도 해석의 가능성이 예견되어 왔으며 [1], 최근에는 이 두 가지 안정도 문제는 별개의 것이 아니고 계통 특성상 동시에 취급해야 할 시스템 안정도 문제라는 점이 인식되어 가고 있다. 최근 Pai등은 이러한 시스템 안정도 성질에 관한 기본 아이디어를 정리하여 발표한 바 있고 원리적 가능성을 제시하였다.[2] 그러나, 이들은 전압붕괴 메커니즘과 각안정도 메커니즘 사이의 상관 관계를 규명하지 못해 실용적인 방안을 제시하지 못하였고, 따라서 그에 대한 후속 연구가 아직 발표되지 않고 있다.

본 논문에서는 전력 계통에 대한 역학 모델을 분석함으로써 전압 안정도와 각안정도 사이의 관계를 정확히 밝힘으로써 계통 안정도 해석의 통합적인 해석이 가능함을 이론적으로 규명하고 에너지 함수 해석법을 사용한 통합접근 방안을 제시하고자 한

다. 제안한 모델을 사용하면 각안정도 해석에 사용되는 에너지 함수 유도가 가능할 뿐만 아니라 역학 모델에 의한 전압 붕괴 메커니즘을 설명할 수 있으며 각안정도에 사용되는 에너지 함수가 전압 안정도와 직접적으로 관련되어 있음을 밝힐 수 있다. 본 논문에서는 통합적 안정도 해석이론을 이에 근거하여 개발하고 에너지함수법에 의한 접근 방안을 채택하여 통합적 안정도 판정 방법 등을 제시하며 모델 계통에 대한 검증을 거치고자 한다.

2. 에너지함수에 의한 통합안정도 해석

전압안정도와 각안정도사이에는 계통특성상 밀접한 관계를 유지하며 운전되고 있으며 제시한 에너지함수를 사용하면 전압안정도와 각안정도를 동시에 고려할 수 있는 통합안정도 해석이 가능하다. 일반적으로 전력계통은 다음의 관계식으로 표현된다.

$$\dot{x} = f(x, y, \lambda) \tag{1}$$

$$\epsilon y = g(x, y, \lambda) \tag{2}$$

여기서 ϵ 은 매우 작은 양의 값을 요소로 갖는 diagonal matrix이며 λ 는 부하등을 나타내는 시스템 파라미터임

식(1)는 전력계통에서 발전기 swing 관계식이나 큰 값의 시정수를 갖는 여자기나 조속기 등의 제어요소를 나타내는 상태방정식이고 식(2)는 EMTP(Electro-Magnetic Transient Phenomena)현상을 표현하는 상태방정식이다. 특별히 과도현상을 해석하는 경우를 제외한 대부분의 전력계통해석에서는 EMTP현상을 무시한 정상상태해석을 하고 있으므로 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = f(x, y, \lambda) \tag{3}$$

$$0 = g(x, y, \lambda) \tag{4}$$

외란이나 고장에 의한 계통의 swing현상을 해석하는 각 안정도는 식 (3),(4) 를 이용한 time simulation을 통하여 안정도해석이 가능하나 전압안정도해석은 현재 시스템의 운전상태 x 에만 관련되어 있고 상태변화속도 \dot{x} 에는 무관하므로 전압안정도 해석을 위해서는 x 와 λ 를 파라미터로보는 파라미터안정도해석이 요구된다. 이것이 파라미터변화에 따른 전압붕괴현상이 수초에서 수십분대에 걸쳐 각 시간대에 걸쳐 일어나는 복잡한 양상을 갖는 이유이다.

각 불안정과 전압불안정현상은 계통의 특성상 유기적인 관계를

가지며 동시에 발생하는 점을 감안할 때 통합된 안정도해석의 필요성이 제기되고 있으며, 이는 식 (3),(4)를 통하여 각안정도 해석이 가능하고 또한 현 운전상태 x 를 통하여 전압안정도 해석이 가능하므로 결론적으로, 식(3),(4)를 통하여 각 안정도와 전압안정도를 동시에 해석이 가능하며, 식 (3),(4)는 제시한 에너지 함수로부터 구할 수 있으므로 제시한 에너지함수를 이용하면 각 안정도와 전압안정도를 동시에 해석할 수 있는 통합안정도해석이 가능하다.

각안정도 해석에서는 통상 모션전압은 일정전압이 유지된다고 가정하므로 모션전압 변화는 무시한 상태에서 외란에 따른 발전기 위상각의 변화에 포인트를 맞추고 있다. 에너지 함수를 사용하면 외란에 따른 시스템에너지 추이를 관찰할 수 있다. 고장발생으로 인하여 발전기 운동에너지($\frac{1}{2} M\omega^2$)가 증가하게 되며 시스템패러에 따른 위치에너지도 증가하여 전체적인 시스템에너지가 증가한다. 고장이 제거되면 시스템은 새로운 안정점으로 이동하게 되며 시스템에너지는 감소한다. 즉, 고장제거후의 에너지와 불안정평형점에서의 에너지를 비교함으로써 시스템의 안정성여부를 판정하게 되며 고장제거후의 에너지가 계속 증가하여 시스템 안정영역을 벗어나는 경우 시스템은 불안정하게 된다.

전압안정도해석에서는 부하증가에 따른 모션전압의 변화가 주요 관련이 되며 해석관점에 따라 발전기 여자기나 부하의 동적요소를 고려할 수 있으나 본 논문에서는 long-term 안정도 관점에서 일정 전력 부하가 일정역률로 증가하는 경우만을 고려한다. 부하증가에 따라 시스템운전점은 변화하게 되며 불안정평형점(UEP)에 접근할수록 시스템은 전압안정도 측면에서 불안정하게 된다. 에너지 함수를 이용하면 불안정평형점과 안정평형점의 에너지마진으로 안정도를 판정할 수 있으며 에너지마진이 영이 되는 경우 불안정평형점과 안정평형점이 겹쳐지게 되며 saddle-node bifurcation 현상이 발생하게 되어 시스템은 붕괴한다. 전압안정도 측면에서 볼때 시스템 파라미터 변화에 따라 2^{n-1} 개의 불안정평형점이 존재하게 되며 부하가 증가함에 따라 그 수는 감소하게 되어 임계점에 근접하면 안정도 해석에서 중요한 역할을 하는 SEP와 Type 1 UEP 만이 존재하게 된다. 여기서 Type 1 UEP 는 시스템 평형점중에서 조류 계산 Jacobian행렬의 고유치중 한 개가 음이 되는 점을 말한다. Type 1 UEP 와 SEP 의 에너지마진을 통하여 전압안정도를 해석하게 되며 부하증가에 따라 Type 1 UEP 와 SEP는 접근하게 되며 겹쳐지는 경우 붕괴점에 도달하게 된다.

본 논문에서는 통합적 안정도 해석이론을 역학모델이론에 근거하여 개발하고 에너지함수법에 의한 접근 방안을 채택하여 통합안정도 해석을 수행하였다. R/X비가 일정한 경우의 선로저항이 고려된 에너지함수를 통하여 부하증가에 따른 전압안정도를 해석하였으며, 각 부하상태에서 상정사고를 가정하여 계통사고 시 각 안정도와 전압안정도 사이의 상관관계를 검토하였다. 전압안정도와 각안정도는 밀접한 관계를 유지하고 있으며 이를 모델계통에 적용하여 통합안정도해석을 수행하였다. 즉, 불안정

평형점과 안정평형점사이의 에너지마진을 통하여 부하증가에 따른 불안정평형점들의 추이를 관찰할 수 있으며 전압안정도 측면에서 전압붕괴점까지의 근접도지표를 제시할 수 있다. 각각의 부하상태에서 상정사고를 발생시켜 각 안정도를 해석할 경우에도 전압안정도 해석시 사용한 동일한 에너지함수를 통하여 해석이 가능하며 선로저항및 모션전압의 변화까지도 고려된 에너지함수를 이용함으로써 더욱 실제계에 근접한 정확한 안정도 해석이 가능하다.

2.1 선로저항이 고려된 에너지함수

에너지함수에 의한 각안정도 해석과 전압안정도 해석은 각각 별개의 연구 과제로 많은 연구가 수행된 바 있다. 그러나 각안정도와 전압안정도의 접근방법 사이에는 상당한 차이가 있어 유사한 에너지함수를 공통으로 사용하고 있음에도 불구하고 통합적인 안정도 해석이 불가능하였다. 즉 종래의 각안정도 해석에서는 선로저항 영향과 모션전압 변화를 거의 무시한 반면에 전압안정도 해석에서는 이 두 요소가 결정적인 인자로 작용할 수 있기 때문이다. 따라서 통합적인 안정도 해석을 위해서는 모션전압 변화와 선로저항을 에너지함수에 효과적으로 반영시킬 수 있는 방안이 제시되어야 하며 전자는 기존의 에너지 함수로도 가능하나 선로저항 고려 방안은 아직 효과적인 방법이 없다. 기존의 에너지함수에서 저항 관련 에너지항이 경로의존적분 형태로 표현되어 적당한 처리 방법이 없어 전압안정도 해석을 위한 에너지함수 계산에 여러 가지 문제점이 발생했었고 이에 대한 해결 방안이 여러 각도에서 모색되었으나 현재까지 별다른 진전이 없었다.

본 논문에서는 전력계통 안정도 해석을 위한 에너지함수 도출에 관한 연구 도중 제2종 에너지 함수를 발견하게 되었고, 이것을 종래의 에너지함수와 병합하여 새로운 에너지함수를 정의하면 R/X비가 일정한 계통에 대하여 선로 저항 관련 에너지항의 경로 의존성을 해결할 수 있다.[4] 계통의 모든 선로는 R/X비가 일정하고 다음식을 만족한다고 가정하였다.

$$K = \frac{R_{ij}}{X_{ij}} \quad \text{for all } ij \quad (5)$$

이때 에너지함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.(증명은[4]참조)

$$\begin{aligned} U = & \sum_i \left[\frac{1}{2} M_i \omega_i^2 \right] + \sum_i \frac{1}{2} B_{iio} V_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i,j} B_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} \\ & + \sum_i c \int K Q_{id} d\delta_i - \sum_i c \int K (I_{id} dE_{ai} + I_{ad} dE_{ai}) + \frac{1}{2} \sum_i K r_{ai} (I_{ai}^2 + I_{i0}^2) \\ & - \sum_i c \int P_{im} d\delta_i - \sum_i c \int (I_{id} dE_{ai} - I_{ad} dE_{ai}) + \sum_i c \int r_{ai} (I_{ai}^2 + I_{i0}^2) d\delta_i \\ & + \sum_i c \int r_{ai} (I_{ad} dI_{ai} - I_{ad} dI_{ai}) \\ & + \sum_i c \int \left[K \left(\frac{P_{vi}}{V_i} dV_i - Q_{Ld} d\theta_i \right) + (P_{Ld} d\theta_i + \frac{Q_{vi}}{V_i} dV_i) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

$$\left(\text{where } B_{iio} = -\sum_j \frac{1}{X_{ij}}, B_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} \right)$$

3. 적용 사례

3.1 3 모선 계통

다음의 3모선 계통(Fig.1)을 통하여 통합안정도 해석을 수행하였다. 4번 모선은 무한대모선으로 각안정도 해석시 기준점으로 선정할 수 있으며, 1번 모선은 발전기모선으로 단자전압이 전압조정장치에 의해 1[pu]로 유지되고, 3번 모선은 부하모선으로 일정역률의 일정전력부하를 가정한다. 개발된 에너지함수를 적용하여 각 안정도와 전압안정도 해석이 가능함을 보이고자 하며 선로저항을 무시하고 해석한 경우와 비교하기로 한다.

부하증가에 따른 모선전압의 변화를 전압안정도 측면에서 해석하고, 발전기모선에 3상단락고장을 가정하여 계통고장시 발전기 위상각의 Swing 현상을 해석하는 각안정도 측면을 분석한 후 에너지함수를 통하여 이를 검증한다. 즉, 전압안정도와 각안정도해석시 동일한 에너지함수를 사용하여 해석이 가능하므로 각안정도와 전압안정도를 동시에 고려할 경우 에너지함수를 통한 통합안정도 해석을 제시하였다.(표 1)

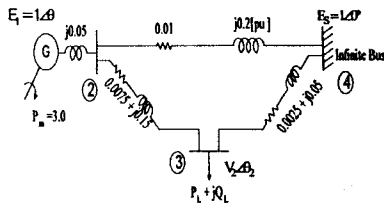


그림 1 3 모선 계통(선로저항고려)
Fig. 1 3 Bus System (Line Resistance Included)

표 1. 통합안정도 해석(선로저항 고려)
Table 1 Integrated Stability Analysis for 3 Bus System Considering the Line Resistance

Stability Analysis Load	Voltage Stability		Angular Stability	
	Euep_v	Euep_t	E(tccl+)	Time Simulation (Critical Clearing Time, Δt=0.01)
P13=2 Q13=1	6.3462	4.3889	4.0342	0.24
P13=3 Q13=1.5	4.5130	4.0924	3.5839	0.23
P13=4 Q13=2	2.9817	3.6789	3.1525	0.23
P13=5 Q13=2.5	1.7251	3.0315	2.7559	0.22
P1=5.7 Q1=2.85	1.0105	2.4327	2.4014	0.21
P13=5.8 Q13=2.9	0.9201	0.9201	0.7527	0.21
P13=6 Q13=3	0.7488	0.7488	0.6225	0.20
P13=6.4 Q13=3.2	0.4456	0.4456	0.5917	0.20
P13=7.0 Q13=3.5	0.1063	0.1063	0.4961	0.20
P13=7.2 Q13=3.6	0.0333	0.0333	0.4960	0.20
P13=7.3 Q13=3.65	0.0000	0.0000	Voltage	Collapse

통합안정도해석시 선로저항의 영향을 분석하기 위하여 선로저항을 무시한경우의 해석결과를 표 2와 같다.

표 2 통합안정도 해석(선로저항 무시)
Table 2 Integrated Stability Analysis with the Negligence of Line Resistance

Energy Load	E_uep_v	E_uep_t	E(tccl+) (임계고장에너지)	Time Simulation (Critical Clearing Time, Δt=0.01)
P1=2 Q1=1	6.6017	4.9145	4.1213	0.24
P1=4 Q1=2	3.2552	4.2243	3.6293	0.23
P1=5.7 Q1=2.85	1.2348	2.8416	2.7596	0.22
P1=6 Q1=3	0.9616	0.9616	0.8352	0.21
P1=6.4 Q1=3.2	0.6334	0.6334	0.6862	0.20
P1=7.2 Q1=3.6	0.1405	0.1405	0.5949	0.20
P1=7.6 Q1=3.8	0.0078	0.0078	0.5614	0.20
P1=7.8 Q1=3.9	0.0	0.0	Voltage	Collapse

4. 결론

본 논문에서는 전력계통의 등가역학모델(EMM)에 기초한 선로저항이 고려된 시스템에너지 함수를 통하여 계통의 각안정도 및 전압안정도를 동시에 해석할 수 있는 통합 안정도(Integrated Stability) 해석을 제시하였다.

각안정도와 전압안정도 해석시 동일한 에너지함수를 사용함으로써 통합안정도해석이 가능함을 제시하였고 선로저항을 고려함으로써 실제계에 근접한 안정도해석이 됨을 확인하였다. 불안정평형점과 안정평형점과의 에너지마진을 통하여 안정도지표를 제시할 수 있으며 불안정평형점들의 추이도 확인할 수 있다. 선로저항을 무시한 경우와 선로저항이 고려된 경우를 비교하였으며, 선로저항이 고려된 경우가 전압붕괴현상이 빨리 발생함을 확인할 수 있으며 보다 실제계에 근접한 정확한 해석임을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] C.L. DeMarco, T.J. Overbye, "An Energy Based Security Measure for Assessing Vulnerability to Voltage Collapse," IEEE Trans. on Power System, Vol.5, No.2, May 1990
- [2] T.J. Overbye, M.A. Pai and P.W. Sauer, "Some Aspects of the Energy Function Approach to Angle and Voltage Stability Analysis in Power Systems," IEEE 31th Conference on Decision & Control, Tucson, AZ, FA11, Dec. 1992.
- [3] A.R. Bergen, D.J. Hill, "Structure Preserving Model for Power System Stability Analysis", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS -100, No.1, Jan. 1981
- [4] 문영현,이용혁,김백, "과도안정도 직접해석법에서 선로저항을 고려한 에너지함수개발," 대한전기학회논문지, 제 44권, 8호, pp 977-987, 1995. 8
- [5] Y.H Moon, B. Kim, E.H. Lee, " A Study on the Identical Basis of Static Voltage Stability Analysis Methods in Power Systems," Trans. KIEE, Vol. 45. No. 4. pp.457-466 Apr. 1996