댐핑영향을 고려한 에너지함수를 이용한 다기계통 과도안정도해석

이기제* 최병곤** 권용준* 김현성* 문영현*
*연세대학교 전기전자공학과 **고려대학교 전력시스템기술연구센터

Direct Transient Stability Analysis for Multi-Machine Power Systems by Using Damping-reflected Energy Functions

Ki-Je Lee*, Byoung-Kon Choi**, Yong-Jun Kwon*, Hyun-Sung Kim*, Young-Hyun Moon*
*Yonsei University, **Korea University Advanced Power System Research Center

Abstract - 다모선 계통의 정확한 과도 안정도 직접해석을 위해 댐핑영향은 고려해야 할 중요한 요소 중의 하나이나 일반화가 어려워 최근까지 무시되어 왔다. 본 논문에서는 시스템을 나타내는 함수들의 적분 관계식들을 고려함으로써 다모선 계통에서의 댐핑영향을 반영한 에너지 함수를 유도하였으며 유도 과정에 있어 최근 다모선 계통에 보편적으로 적용되고 있는 관성중심(Center of Inertia :COI) 표현법으로 전개를 시도하였다. 유도된 에너지함수를 PEBS(Potential Energy Boundary Surface) 직접법에 적용하여 임계위치에너지를 산출하였으며, 임계고장제거시간을 계산함으로써 과도안정도직접해석법을 수행하였다. 제안된 에너지 함수를 WSCC 3기 9모선 샘플 시스템에 적용하여 댐핑이 고려된 에너지함수가 실제 계통을 보다 정확하게 표현하고 있음을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서 론

전력계통과 같은 비선형 시스템의 운용에 있어 안정도 문제는 가장 먼저 다루어져야 할 이슈 중의 하나이다. 지금까지 Lyapunov 이론, Popov 이론, 그리고 Lure-type의 비선형 시스템에 대한 confinement 이론 등 비선형 시스템 안정도 해석에 관련 많은 이론들이 개발되어 왔다.[1][2] 그러나 대부분의 경우에 있어서 에너지 함수에 포함되어 있는 댐핑영향을 반영하기 위해서는 Popov 방법과 같이 극도로 복잡한 방법을 요구한다. 최근 리액턴스만 고려된 전력시스템에 대하여 운동의 1차 적분(first integral of motion)을 이용하여 댐핑영향을 반영한 에너지함수를 유도하는 효과적인 방법이 제안되었다.[1] 제안된 에너지함수들의 그룹은 댐핑으로 인하여 잃어버리는 손실의 일부분을 에너지함수에 반영하고 있으며 이를 위한 체계적인 방법이 개발되어졌다. 댐핑이 고려되어진 에너지 함수의 시간 미분이 일반적인 운전영역에서는 항상 negative semi-definite 성질을 만족한다는 것이 증명되었으며 기존 댐핑영향을 무시한 에너지함수와 비교하여 흡입 영역의 추정을 상당히 개선시킬 수 있었다.

본 논문은 기존연구인 1기 무한모선에 대한 댐핑영향을 반영한 에너지함수를 다기계통으로 확대하고 그 효용성을 검증하고자한다. 전통적인 접근에서의 일반화에서 가장 어려운 점은 극도로 복잡한 과정이 요구되어지는 다모선 시스템에서 에너지함수의 시간 미분이 항상 영보다 작거나 같은지를 보증하는 것이다. 본 연구에서는 시스템을 나타내는 상태방정식으로부터 댐핑관련 적분항을 효율적으로 분리하여 다모선 계통에 대한 시간 미분이 항상 영보다 작거나 같도록 에너지 함수의 일부분에 댐핑에 의한 손실 부분을 반영하는 효과적인 기법을 제시한다.

다기계통에 대한 에너지함수 기반 과도 안정도 직접해석을 위해 보편적으로 사용되고 있는 관성중심(Center of Inertia: COI) 표현법[5]으로 에너지함수를 전개하고 유도된 에너지함수를 PEBS[4] 직접법에 적용하여 임계에너지를 산출하며, 이를 이용하여 임계고장시간을 계산함으로써 과도안정도직접해석법을 수행한다. 제안된 이론을 WSCC-9 모선 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 다기계통에 대한 댐핑영향을 반영한 에너지함수 유도

전력 계통 과도안정도 직접해석을 위해서는 임계고장제거시간 (Critical Clearing Time : CCT)의 계산이 필요하며 이를 위해 시스템의 흡인영역 (region of attraction)을 효과적으로 반영할 수 있는 에너지함수의 유도가 필수적이다.[5] 본 장에서는 댐핑영향을 고려한 계통 동요방정식 (swing equation)으로부터 댐핑 관련 에너지 적분항을 패러미터 λ를 이용하여 에너지함수에 반영할 수 기법을 제시하고자 한다. 또한 다모선 계통에 대한 효과적인 안정도 평가를 위해 관성중심(Center of Inertia: COI)으로 변형한 에너지 함수를 유도하고자 한다.

에너지 함수를 관성중심(Center of Inertia: COI) 표현방식으로 변형된 에너지함수로 나타내면 계통이 고장 난 후 고장을 복구 시켰을 때 발전기의 절대 위상각이 아닌 기준 값과의 상대적인 차이로만 나타나기 때문에 전체적인 분석에는 영향을 미치지 않는다. COI변형이 안된 상태에서 안정도 해석을 수행 할 수 있으나 다모선의 경우 고장 복구 후 시스템의 발전기 절대 위상각의 SEP가 고장제거 시간에 의존적이어 일정 전력부하모델이 아닌 일정 임피던스 부하모델일 경우 댐핑영향을 반영한 시스템 에너지 산출에 어려움이 발생하게 된다.

그림1은 다기 계통 시스템의 일반적인 표현이며 본 논문에서는 댐핑영향을 고려한 에너지 함수 유도에 집중하기 위해 모든 발전기들을 내부 전압이 일정하게 유지되는 고전모델 (classical model)[7]이라고 가정한다. 또한 부하는 1차 동요에 대한 과도안정도 해석에 보편적으로 적용하고 있는 일정 임피던스 부하모델을 사용하였다.[7]

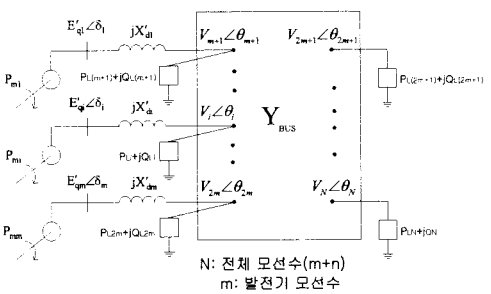


그림1. 다모선 전력 계통도

COI 변형된 에너지함수는 다음과 같다.
위의 식을 이용하면 COI formulation 한 새로운 에너지보존 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W=\sum_{i=1}^{m}\frac{1}{2}M_i\tilde{w}_i^2-\frac{1}{2}\sum_{i=m+1}^{N}B_{ii}(V_i^2-V_{ii}^2)-\sum_{i=m+1}^{N-1}\sum_{j>i}^{N}V_iV_jB_{ij}\cos\theta_{ij}\Big|_{x_0}^{x}$$
$$-\sum_{i}^{N}P_{mi}(\delta_i-\delta_i^s)+\sum_{i}^{N}P_{Li}(\theta_i-\theta_{ii})+Q_{Li}ln(\frac{V_i}{V_{ii}})+\sum_{i=m+1}^{N}\int G_{ii}V_i^2d\theta_i$$
$$+\sum_{i=1}^{m}(V_{i+m}^2-V_{i+m^s}^2)-2E_i'(V_{i+m}\cos(\delta_i-\theta_{i+m})-V_{i+m}^n\cos(\delta_{ii}-\theta_{i+m}^n))/2X_{ii}'$$
$$+\sum_{i=1}^{m}\int D_i\tilde{w}_i^2dt+\sum_{i=1}^{m}\int D_i(w_0-w_s)d\tilde{\delta}_i=0$$

$$\text{where, }\begin{cases}\tilde{\delta}_i=\delta_i-\delta_0\\ \tilde{w}_i=w_i-w_0\\ \delta_0=\frac{1}{M_T}\sum_{i=1}^{m}\delta_iM_i\quad,\ M_T=\sum_{i=1}^{m}M_i\end{cases}\tag{1}$$

위 에너지 보존 식에서 일정 임피던스 부하는 컨덕턴스 관련 경로의존 적분항으로 표현되는데 이는 아래와 같은 trapezoidal 적분을 통해 계산될 수 있으며 계산시간에 큰 영향을 미치지 않는다. 일정 임피던스 부하의 컨덕턴스 관련 에너지를 $V_G(\theta)$라 하면,

$$V_G(\theta)=\sum_{i=m+1}^{N}I_i\tag{2}$$

k^{th} step에서의 $I_i(k)$는

$$I_i(k)=I_i(k-1)+\frac{1}{2}G_{ii}(V_i^2(k)+V_i^2(k-1)(\theta_i(k)-\theta_i(k-1))$$
$$I_i(0)=0\tag{3}$$

댐핑관련 항 중 마지막 항은 trapezoidal 적분이나 직선 근사화에 의해 쉽게 구할 수 있으며 그 값이 크지 않기 때문에 직선 근사화를 하여도 오차가 크게 발생하지 않는다. 댐핑 효과를 반영하기 위하여 댐핑에 의한 손실 부분을 에너지 적분의 적절한 형태로 바꾸어줄 필요가 있다. 이것은 계통 동요방정식으로부터 이끌어내어진 적분 관계식들을 사용함으로써 구할 수 있다. i번째 발전기의 Swing 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$M_i\ddot{\Delta\delta}_i+D_i\dot{\Delta\delta}_i=P_{mi}-P_{ei}\tag{4}$$

이것을 COI 변환을 하면,

$$M_i(\ddot{\overline{\Delta\delta}}_i+\ddot{\Delta\delta}_0)+D_i(\dot{\overline{\Delta\delta}}_i+\dot{\Delta\delta}_0)=P_{mi}-P_{ei}\tag{5}$$

양변에 부하각 $\overline{\Delta\delta}_{Li}$를 곱하고 시간 t에 관해 적분한다.

$$\int M_i\ddot{\overline{\Delta\delta}}_i(\overline{\Delta\delta}_i-\overline{\Delta\theta}_i)dt+\int D_i\dot{\overline{\Delta\delta}}_i(\overline{\Delta\delta}_i-\overline{\Delta\theta}_i)dt$$
$$=\int(P_{mi}-P_{ei})\overline{\Delta\delta}_{Li}dt-\int(M_i\ddot{\Delta\delta}_0+D_i\dot{\Delta\delta}_0)(\overline{\Delta\delta}_i-\overline{\Delta\theta}_i)dt$$

여기서 $\delta_{Li}=\delta_i-\theta_i$
$\overline{\Delta\theta}_i=\bar{\theta}_i-\bar{\theta}_{i^s}$
$\overline{\Delta\delta}_{Li}=\bar{\delta}_{Li}-\bar{\delta}_{Li^s}$ (6)

그리고 좌변을 전개한 후 부분적분하면,

$$M_i\dot{\overline{\Delta\delta}}_i\overline{\Delta\delta}_i-M_i\int\dot{\overline{\Delta\delta}}_i^2dt+\frac{1}{2}D_i\overline{\Delta\delta}_i^2-\int M_i\ddot{\overline{\Delta\delta}}_i\overline{\Delta\theta}_idt-\int D_i\dot{\overline{\Delta\delta}}_i\overline{\Delta\theta}_idt$$
$$=\int(P_{mi}-P_{ei})\overline{\Delta\delta}_{Li}dt-\int(M_i\ddot{\Delta\delta}_0+D_i\dot{\Delta\delta}_0)(\overline{\Delta\delta}_i-\overline{\Delta\theta}_i)dt\tag{7}$$

위 식에서 댐핑에 관계된 부분만 따로 써보면,

$$\int\tilde{w}_i^2dt=-\tilde{w}_i\overline{\Delta\theta}_i+c\int_{\Delta\theta_{i0}}^{\Delta\theta_i}\tilde{w}_id\overline{\Delta\theta}_i+\tilde{w}_i\overline{\Delta\delta}_i-c\int_{\Delta\delta_{i0}}^{\Delta\delta_i}\frac{D_i}{M_i}\overline{\Delta\theta}_id\overline{\Delta\delta}_i+\tilde{w}_i\overline{\Delta\delta}_i$$
$$+\frac{1}{2}\frac{D_i}{M_i}\overline{\Delta\delta}_i^2-\frac{1}{M_i}\int(P_{mi}-P_{ei})\overline{\Delta\delta}_{Li}dt$$
$$+\frac{1}{M_i}\int(M_i\ddot{\Delta\delta}_0+D_i\dot{\Delta\delta}_0)(\overline{\Delta\delta}_i-\overline{\Delta\theta}_i)dt\tag{8}$$

위 식에서 경로에 따른 적분들은 근사적으로 선적분으로 계산되어진다. 선적분 된 결과를 넣어 정리하면,

$$\int\tilde{w}_i^2dt\cong-\tilde{w}_i\overline{\Delta\theta}_i+\frac{1}{2}\overline{\Delta\theta}_i(\tilde{w}_i+\tilde{w}_{i0})-\frac{1}{2}\frac{D_i}{M_i}\overline{\Delta\theta}_i\overline{\Delta\delta}_i+\tilde{w}_i\overline{\Delta\delta}_i+\frac{1}{2}\frac{D_i}{M_i}\overline{\Delta\delta}_i^2$$
$$-\frac{1}{M_i}\int(P_{mi}-P_{ei})\overline{\Delta\delta}_{Li}dt+\sum_{i}^{m}\frac{1}{2}\overline{\Delta\delta}_{Li}\Delta w_0+\sum_{i}^{m}\frac{D_i}{M_i}\frac{\overline{\Delta\delta}_{Li}\Delta\delta_0}{2}\tag{9}$$

에너지 보존 법칙 내부에서 댐핑에 의한 손실 중 λ만큼을 식(9)를 사용함으로써 에너지 적분 내부로 변환시킬 수 있고, 그 결과로 다기 계통에서 댐핑이 고려되어진 새로운 에너지 함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E_\lambda=\sum_{i=1}^{m}\frac{1}{2}M_i\tilde{w}_i^2-\frac{1}{2}\sum_{i=m+1}^{N}B_{ii}(V_i^2-V_{ii}^2)-\sum_{i=m+1}^{N-1}\sum_{j>i}^{N}V_iV_jB_{ij}\cos\theta_{ij}\Big|_{x_0}^{x}$$
$$-\sum_{i}P_{mi}(\delta_i-\delta_i^s)+\sum_{i}^{N}P_{Li}(\theta_i-\theta_{ii})+Q_{Li}ln(\frac{V_i}{V_{ii}})]$$
$$+\sum_{i=1}^{m}(V_{i+m}^2-V_{i+m^s}^2)-2E_i'(V_{i+m}\cos(\delta_i-\theta_{i+m})-V_{i+m}^n\cos(\delta_{ii}-\theta_{i+m}^n))/2X_{ii}'$$
$$+\sum_{i=1}^{m}\lambda_i[-\tilde{w}_i\overline{\Delta\theta}_i+\frac{1}{2}\overline{\Delta\theta}_i(\tilde{w}_i+\tilde{w}_{i0})-\frac{1}{2}\frac{D_i}{M_i}\overline{\Delta\theta}_i\overline{\Delta\delta}_i+\tilde{w}_i\overline{\Delta\delta}_i+\frac{1}{2}\frac{D_i}{M_i}\overline{\Delta\delta}_i^2$$
$$+\frac{D_i}{2}\overline{\Delta\delta}_{Li}\Delta w_0+\frac{D_i^2}{2M_i}\overline{\Delta\delta}_{Li}\Delta\delta_0]$$

여기서 $\lambda\in[0,1]$ (10)

위 방정식의 시간 미분 값이 항상 영보다 작거나 같다는 것은 다음 방정식을 통해 쉽게 보여 질 수 있다[8].

$$\frac{dE_\lambda}{dt}=\sum_{i=1}^{m}[-(1-\lambda_i)D_i\tilde{w}_i^2+\frac{D_i\lambda_i}{M_i}(P_{mi}-P_{ei})\overline{\Delta\delta}_{Li}]\le 0$$

(적절한 동작 영역 내에 있는 모든 시간 t에 적용된다.)with $0\le\lambda_i\le1(i=1,\ldots.m)$ (11)

2.2 제안된 에너지 함수의 시뮬레이션 결과

댐핑고려 에너지함수의 유용성을 보이기 위해서 관성중심(COI)표현법으로 된 에너지함수를 이용하여 고장제거시간(CCT)을 구하고 다음의 WSCC 9모선 시스템에 적용하여 시뮬레이션 하였다. 여기서 계산의 단순화를 위하여 모든 발전기들은 전압이 일정하게 유지되어지는 고전 모델로 고려하였으며 모든 부하는 일정 임피던스부하(constant impedance load) 모델을 사용하였다. 또한 선로의 저항은 무시하였다. WSCC 9모선에 대한 발전기, 부하, 선로 데이터들을 아래의 표에 제시하였다.

표1. WSCC 9모선 시스템에 대한 데이터

(a) Generator/LoadData

(unit : pu , Base : 100MVA)

Gen Bus No.	H(sec)	D[pu/rad]	P_{η} [pu]	X'_{di} [pu]	E'_{qi} [pu]	Load Bus No.	P_L	Q_L
1	23.64	0.05	0.00	0.0608	1.056	5	1.25	0.5
2	6.4	0.05	1.63	0.1198	1.050	6	0.9	0.3
3	3.01	0.05	0.85	0.1813	1.016	8	1.00	0.35

(b)LineData

Line No.	FromBus-ToBus	Line impedance
1	1-4	j0.0576
2	2-7	j0.0625
3	3-9	j0.0586
4	4-5	j0.085
5	4-6	j0.092
6	5-7	j0.161
7	6-9	j0.170
8	7-8	j0.072
9	8-9	j0.1008

표1에 제시된 데이터들을 이용하여 댐핑의 비율을 변화시켜가며 임계고장제거시간을 계산하였다. 단순화를 위하여 모든 발전기들은 같은 댐핑 계수를 가지고 있다고 하고 각 단계별로 0.01, 0.05 그리고 0.1[pu/rad]로 변화시켜 시뮬레이션 하였다. 또한 계속적으로 변하는 댐핑 반영계수 λ를 가지고 테스트 함으로써 댐핑 반영정도에 따른 고장제거시간을 산출 비교하였다. 각각의 발전기는 그들 자신의 댐핑 반영계수 λ를 가지고 있지만 본 연구에서는 단순화를 위하여 모든 발전기들이 같은 λ를 가지고 있다고 가정하였고 모선 7에서 3상 고장이 발생했으며 고장 제거 이후 시스템은 고장 이전 상태로 복구된다고 가정하였다.

다음의 그래프는 댐핑이 0.05[pu/rad]일때 시간에 따른 에너지 함수의 변화를 나타낸다. 제안된 에너지 함수의 시간 미분이 항상 영보다 작거나 같다라는 것을 잘 만족한다는 사실을 보여준다.

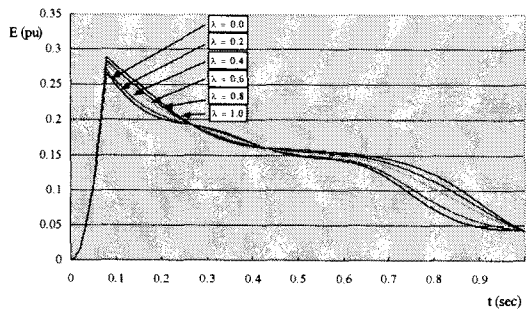
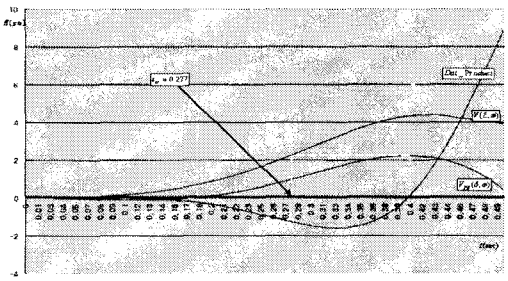
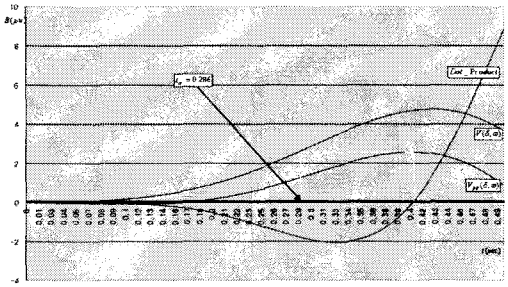


그림2. 댐핑반영정도에 따른 에너지함수 변화
(D=0.05[pu/rad])

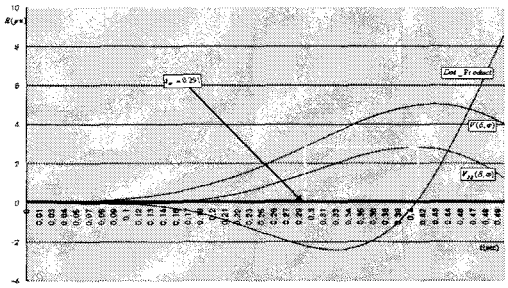
다음의 그래프들은 댐핑의 반영정도에 따른 고장제거 시간의 변화를 보여준다.



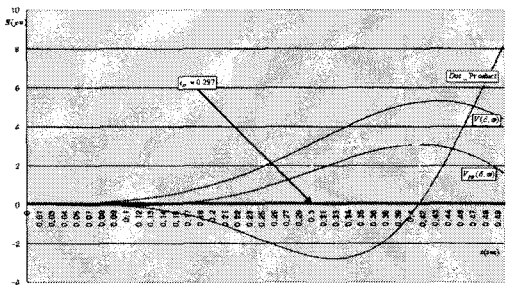
(a) λ=0.0



(b) λ=0.4



(c) λ=0.7



(d) λ=1.0

그림3. 댐핑반영정도에 따른 고장제거시간 변화
(D=0.05[pu/rad])

표2. 댐핑에 따른 고장제거시간 변화 데이터

(unit: sec)

	D=0.01[pu/rad] t_{cr}=0.251(sec)	D=0.05[pu/rad] t_{cr}=0.293(sec)	D=0.1[pu/rad] t_{cr}=0.344(sec)
λ=0.0	0.244	0.277	0.324
λ=0.4	0.246	0.286	0.337
λ=0.7	0.247	0.291	0.344
λ=1.0	0.249	0.297	0.352

tcr : 시모의 해석에 의한 임계고장 제거시간(CCT)

위에서 보여 진 그래프들과 표2의 결과에서 보면 알 수 있듯이 댐핑반영계수 λ가 커질수록 time simulation의 간접법으로 구한 임계고장제거 시간에 근접함을 알 수 있고, 또한 댐핑계수 D가 증가함 따라 고장제거시간 점차적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 표2 상단에 tcr로 표기된 임계고장제거시간은 반복적인 time simulation을 통해 구해진 값이 시스템의 실제 임계고장제거시간을 의미한다. 그러나 time simulation의 간접법은 앞에서 언급한 바와 같이 반복적인 수행을 통해서만 임계고장제거시간이 구해지므로 상당한 시간을 필요로 한다. 반면에 PEBS 직접법에 의하면 댐핑을 모두 반영한 에너지함수와 위치에너지의 변화만 알고 있으면 임계고장제거시간을 빠른 시간 내에 구할 수 있다. 제안된 댐핑영향 고려 에너지함수를 통해 보다 정확한 안정도 판별이 가능함을 알 수 있다. 그러나 λ=1.0일때 D=0.05, 0.1의 경우 실제 tcr보다 큰 값이 산출되는 현상이 발생하였다. 이는 댐핑관련 경로의존 적분항의 직선 근사화에 의한 오류에 기인한 것으로 추정되며 이의 개선 연구가 진행되고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 댐핑영향을 반영한 에너지함수 유도를 1기 무한모선에서 다모선 계통으로 확장하여 다기계통에 대한 과도안정도 해석을 시도하였다. 다모선 계통에서 댐핑을 고려한 보다 정확한 에너지 함수를 이용함으로써 간접법과 거의 같은 정확한 임계고장제거시간을 빠른 시간 내에 산출할 수 있음을 보였다. 이를 WSCC 9모선에 적용해 봄으로써 그 효용성을 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 에너지보존법칙을 이용하여 댐핑영향을 고려한 다모선계통 에너지함수를 유도하였다.
2) 과도안정도해석을 용이하게 하기 위하여 관성중심(COI)형태의 에너지함수를 사용하여 PEBS 직접법을 수행하였다.
3) PEBS 직접법의 시뮬레이션을 통해 댐핑반영정도에 따른 고장제거시간을 계산하고 time simulation의 간접법의 임계고장제거 시간과 비교함으로써 댐핑고려 에너지함수를 이용한 직접법의 타당성을 검증하였다.

향후에는 일정 전력부하, 일정 임피던스부하등 복합모델, 발전기 상세모델을 고려하고 고속 비반복 시모의 및 BCU 방법과 접목하여 좀 더 향상된 과도안정도해석에 대한 연구를 진행하고자 한다.

[참 고 문 헌]

[1] M. Ribbens-Pavella, & F. j. Evans, "Direct methods for studying dynamics of large-scale electric power systems : a survey", Automatica, 21(1), p. 1-21, 1985.

[2] J. l. Willems, "The application of Lyapunov methods to the computation of transient stability regions for *multi-machine power systems*" , Proc. Int. Elec. Eng., Vol. 115, p. 1315-1317, 1969

[3] Y.-H. Moon, et al., "Development of an energy function reflection the transfer conductance for direct stability analysis in power system", IEEE Proc.-Generation *Transmission and Distribution.*, Yol. 144, No. 5, p. 503-509, 1997

[4] N. Kakimoto, Y. Ohsawa, and M. Hayashi, "Transient Stability Analysis of Electric Power System Via Lure Type Lyapunov Functions, Parts I and II", Trans. IEE of Japan, 98, 5/6, *May/June* 1978.

[5] M. A. Pai, "Energy function methods in power system stability", Boston. MA: Kluwer Academic Publishers. 1989

[6] Y.-H. Moon, B.-K. Choi, T.-H. Roh, "Estimating the domain of attraction for power *systems via a group of* damping-reflected energy functions", Automatica, Vol. 36, p. 419-425, March 2000.

[7] Peter W. Sauer, M. A. Pai, "Power System Dynamics and Stability", Prentice Hall Inc., 1998

[8] Y.-H. Moon, Y.-J. Kwon, H.-S. Ryu, B.-K. *Choi*, "Derivation of an energy function reflecting damping effects in multi-machine power systems", 40th IEEE CDC, p. 461-465, 2001