

대규모 전력계통의 과도안정도 상정사고 선택에 고유치감도 응용

심관식* 남해곤** 김용구** 송성근**
 * 서남대학교 ** 전남대학교

Applications of Eigen-Sensitivity for Contingency Screening of Transient Stability in Large Scale Power Systems

Kwan-Shik Shim* Hae-Kon Nam** Yong-Ku Kim** Sung-Geun Song**
 * Seonam University ** Chonnam National University

Abstract - This paper presents a new systematic contingency selection and screening method for transient stability. The variation of modal synchronizing torque coefficient(MSTC) is computed using eigen-sensitivity analysis of the electromechanical oscillation modes in small signal stability model and contingencies are ranked in decreasing order of the sensitivities of the MSTC(SMSTC). The relevant clusters are identified using the eigenvector or participating factor. The proposed algorithm is tested on the KEPCO system. Ranking obtained by the SMSTC is consistent with the time simulation results by PSS/E.

Keywords: transient stability, contingency ranking, modal synchronizing coefficient, eigen-sensitivity, small signal stability.

1. 서 론

전력계통에 다양한 안정도 문제에서 과도안정도는 각 발전기가 동기화를 유지하는 가의 여부에 관심이 있다. 과도안정도에서 상정사고 선택 문제는 전력계통 계획, 운용에 있어 매우 중요한 문제인데, 지금까지 대규모 전력계통에서 과도안정도 해석은 주로 시간영역해석을 이용하였다. 그러나 시간영역해석은 계통제어, 운용에 대한 다양한 정보를 제공하지 못하고 많은 계산시간 소요되어 대규모 계통에 직접 적용하는 데는 많은 어려움이 있다.

이 논문에서는 고유치감도로부터 동기화 토크 계수 변동률(sensitivities of the modal synchronizing torque coefficient:SMSTC)을 계산하고, 이를 과도안정도의 상정사고 선택의 지표로 이용하였다. 문헌 [1]에는 1기 무한모선계통에서 전로리액턴스와 고유치, 그리고 동기화 토크 계수의 상관관계가 직접적인 수식으로 표현될 수 있음을 기술하였다. 이로부터 고유치의 변화와 동기화토크 계수 변화 사이에 관계를 얻을 수 있고, 새로운 정수인 SMSTC를 정의하였으며 이를 이용하여 과도안정도 상정사고를 선택하였다.

SMSTC를 이용한 상정사고 선택 알고리즘은 확대행렬을 사용하므로 대규모계통에 적용할 수 있는 실질적인 기법이다. 이 논문에서는 SMSTC를 이용한 상정사고 선택 알고리즘을 실제 한전계통에 적용하여 과도안정도 상정사고 해석의 지표를 얻었다. 그리고 PSS/E의 결과와 비교 검증함으로써 제안한 이론과 알고리즘에 의해서 얻어진 지표가 과도안정도 상정사고 해석에 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

먼저 전력계통의 안정도 문제에서 자주 혼용되어 사용되는 선택의 의미와 이와 관련된 용어들을 정의한다.

선택(selection) - 대규모 계통에서 안정도에 취약한 제어나 선로들을 근사적으로 선택하는 것으로 가장 포괄적인 의미를 내포하고 있다. 예를들어 2000개의 선로 중에 취약선로 "선택"은 500~600개의 선로를 선택하는 것이다.

선정(screening) - "선택" 보다 좁은 의미로 이미 선택된 선로들 중에서 중요한 몇 개의 요소만 다시 선정하는 것이다. 500~600개의 선로 중에서 40~50개의 선로를 선정하는 것을 의미한다.

순위(ranking) - "선정"된 선로에서 중요도 순서로 그 "순위"를 정하는 것을 의미한다.

이 논문에서 제안한 SMSTC는 "선택"과 "선정"을 모두 포함하고 있으며, 순위 결정에도 이용할 수 있다.

2. 전력계통의 선형모델과 고유치감도 해석

전력계통에서 계통상태방정식은 상태변수 벡터와 모션 전압 벡터를 이용하여 미분방정식과 대수방정식으로 나타내어지고, 두 방정식에서 확대행렬을 얻을 수 있다. 전력계통에서 미분-대수방정식은 그 특성상 매우 스파스하므로 안정도해석의 모든 연산에 이 행렬을 사용하는 것이 효율적이다.

대규모 전력계통 해석을 위해서 개발된, 고유치계산 알고리즘 대부분은 확대행렬을 사용하고 있고, 고유치감도 계산에서도 확대행렬을 사용하여 계산과정을 수행하면 2차 고유치감도와 고유벡터 감도를 계산할 수 있다. 전력계통의 확대행렬과 고유치감도는 문헌 [2]에 상세하게 기술되어 있다.

3. 동기화토크 계수 변동률(SMSTC)

과도안정도 문제는 각 발전기가 동기화를 유지하는 가에 관심이 있다. 동기화를 유지하는 문제와 함께 동기화 토크 계수는 발전기 위상각 변화와 전기적토크 변화의 비율로 정의되는데, 이는 동기화 유지 문제가 발전기 위상각의 문제임을 알 수 있다.

또한 각 발전기는 자기 자신의 고유 진동주파수를 가지고 있는데, 동기화토크 계수는 고유진동주파수의 함수로 표현된다. 그리고 고유진동주파수는 리액턴스, 고유치의 변화의 함수로 표현되므로 결과적으로 동기화토크 계수는 고유치의 변화의 함수로 나타낼 수 있다. 1기 무한모선 계통에서 이들의 관계를 요약하면 다음과 같다.

발전기 모델은 고전모델이라 가정하고, 고정자 저항을 포함한 모든 저항은 무시할 때, 전기적토크의 변화와 위상각의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_e = \frac{E E_B}{X_T} \cos \delta_0 \Delta \delta = K_S \Delta \delta \quad (1)$$

여기에서

K_S : 동기화토크 계수(MSTC)

- E' : 발전기 내부전압
- E_B : 무한모선 전압
- X_d' : 발전기 내부리액턴스
- X_E : 선로리액턴스
- X_T : $X_d' + X_E$

동요방정식에서 특성방정식의 고유값으로부터 비제동 고유주파수와 MSTC 사이에는 식 (2)의 관계가 성립함을 알 수 있고, 일반적으로 제동계수는 그 크기가 작기 때문에 이를 무시하면, 비제동고유주파수와 고유값의 허수부 ω_d 는 같다[1].

$$\omega_n = \sqrt{K_s \frac{\omega_0}{2H}} = \omega_d \quad (2)$$

결국 MSTC는 고유치의 허수부의 제곱과 비례관계가 성립하므로 MSTC의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta K_s = \frac{2H}{\omega_0} (2\omega_d \Delta\omega_d + \Delta\omega_d^2) \quad (3)$$

그리고 2차 항을 무시하면, 동기화토크 계수 변동률 (SMSTC)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S_{st} = \frac{K_s - K_s}{K_s} = \frac{\Delta K_s}{K_s} = \frac{2\Delta\omega_d}{\omega_d} \quad (4)$$

여기에서 $\Delta\omega_d$ 는 저주파진동모드의 허수부의 변화로 고유치감도로부터 얻을 수 있다. 즉, 선로리액턴스에 대한 고유치감도 계산에서 고유치의 허수부의 변화를 알 수 있고, 임의의 선로리액턴스가 변화할 때, 동기화토크 계수 변동률(SMSTC) S_{st} 를 계산할 수 있다. 그리고 SMSTC는 선로리액턴스가 변화할 때, 동기화토크 계수의 변화를 나타내므로 과도안정도의 상정사고 지표로써 사용할 수 있다.

이 개념은 모드 변환(modal transformation)에 의해 다기계통으로의 확장될 수 있다. 다기계통에서 각 발전기 군은 고유한 진동주파수를 가지고 있다. 각각의 진동모드에 대한 선로리액턴스 고유치감도에서 SMSTC를 계산할 수 있다. 이 SMSTC는 각 선로의 리액턴스 변화가 특정발전기의 동기화토크 계수에 미치는 영향을 나타내고 있으므로 다기계통에서 발생하는 과도안정도 상정사고 선택에 지표로 사용할 수 있다.

4. 결 과

SMSTC에 의한 과도안정도 상정사고 선택 알고리즘을 비교적 저차의 계통인 New English 계통에 적용한 결과는 문헌 [1]에 상세하게 기술되어 있다. 여기에서는 실제 대규모 계통인 한전계통에 제안한 알고리즘을 적용한 결과를 기술하고, 그 결과와 PSS/E의 결과를 비교하였다. 제안한 알고리즘을 적용한 한전계통은 215기의 발전기와 791 모선, 1575 선로로 구성되어 있으며, 이의 간단한 계통도는 그림 1과 같다.

참고로 이 논문에서 사용한 한전 계통 데이터는 실제 계통 조건과는 상당한 차이가 있을 수 있으며, 이 논문의 과도안정도 해석 결과와 실제와는 다를 수 있다. 이 논문에서는 과도안정도 상정사고 선택에 있어서 제안한 SMSTC 알고리즘이 실제 대규모 계통에도 성공적으로 적용 가능한가 하는 것을 시험하기 위해서 한전계통을 시험계통으로 사용한 것임을 밝힌다.

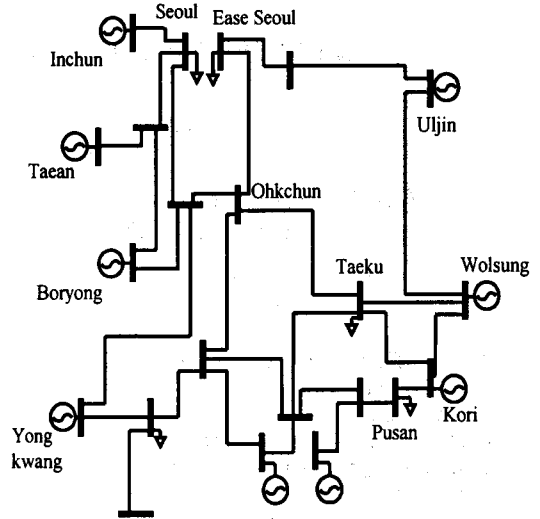


그림. 1. 한전계통의 간단한 계통도.

한전계통에서 고유진동주파수가 0.2~12Hz인 고유치들은 86개가 존재한다. 이들 고유치에 대해서 선로리액턴스에 대한 확대행렬의 고유치감도를 적용하여 고유치의 변화를 계산하였고, 식 (4)를 이용하여 과도안정도 상정사고 지표인 SMSTC를 계산하였으며, 이를 표 1에 나타내었다.

표 1에서는 선택된 선로를 중심으로 나타내었는데, 여기에는 4개의 모드만 관련되어 있다. 표에서 「 S_{st} 」는 SMSTC를 나타내고 있고, 「Critical Line」은 SMSTC에 의해서 선택된 과도안정도에 취약선로를 의미한다. 그리고 「CCT」는 PSS/E에서 시간영역해석을 수행한 결과, 발전기 위상각이 발산하는 cycle을 나타내고 있으며, 「Generator」는 각 진동모드에 참여율이 가장 큰 발전기들을 나타내고 있다.

SMSTC S_{st} 가 가장 큰 선로는 모드 1에서 선로 1500-5150이고 다음으로 모드 3에서 9250-9700선로, 그리고 모드 1의 5150-5500 선로 순서이다. 따라서 이 선로들을 과도안정도에 가장 취약한 선로들로 선택할 수 있다. 이 결과를 PSS/E의 결과인 CCT와 정확하게 일치한다. 나머지 선로들에 대한 SMSTC와 CCT의 순위는 거의 일치하지만, 모드 1의 선로 5150-5600은 SMSTC가 상대적으로 작은 값을 가지고 있어 CCT가 클 것으로 예상되나 PSS/E의 결과 CCT는 작은 값을 가지고 있다. 이의 원인은 향후에 해석할 예정이다.

SMSTC에 의해서 선택된 선로들 중에서 4-5 cycle에 발산하는 선로들에 대해서 고장을 모의하고 이를 그림 2-6에 나타내었다.

그림 2는 정상상태로 운전 중에 선로 1500-5150에 선로 사고가 발생하였을 때, 4 cycle 동안 사고를 모의한 경우로 25151번 발전기의 위상각만이 발산함을 알 수 있다. 25152~4번 지면의 제약으로 나타내지 않았다. 이것은 선로 1500-5150에 SMSTC가 0.03062로 선로들 중에서 가장 큰 값을 가지고 있고 모드 1에 가장 큰 속도참여율을 가지고 있는 발전기는 25151번이기 때문이다. 그리고 그림 3에서는 선로 5150-5500에서 1선 지락사고가 발생하였을 때, 4 cycle 동안 사고를 모의한 경우로 이때도 역시 25151번 발전기의 위상각만이 발산한다. 그림 4-6에는 선로 5150-5600, 9250-9700, 7100-7150의 선로에 대해서 고장을 모의한 결과를 나타내고 있다.

SMSTC계산시간

한 고유치에 대해서 모든 선로 리액턴스에 대한 1차 고유치감도를 계산하는데, P-II 450MHz 개인용 컴퓨터에서 0.8초가 소요되고, 한 선로에 대해서 2차 고유치감도를 계산하는데는 0.6초가 소요된다. 그리고 1차 고유치감도에 의해서 선정된 몇 개의 선로에 대해서만 2차 고유치감도는 계산하므로 결과적으로 한 고유치에 대해서 10개의 선로를 선택한다고 가정할 때, 대략 7초 정도가 소요된다. 따라서 모든 고유치에 대한 SMSTC 계산에는 대략 10분 정도가 소요되나 알고리즘에서 1차 고유치감도에 의해서 SMSTC를 계산하고, 크기 순으로 대략 100개 정도에 상정사고를 선택하고, 이들에 대해서만 2차 고유치감도를 수행하고 SMSTC를 계산하면 과도안정도에 중요한 선로를 선택하는데는 약 2-3분 이내로 결정하는 것이 가능하다. 이는 지금까지 개발된 어떤 알고리즘 보다 계산시간에서 제한한 알고리즘이 우위에 있음을 의미한다. 참고로 여기에서 언급한 계산시간은 한전계통을 축약하거나 모델 변환을 전혀 하지 않은 상태에서 수행한 계산시간이다.

표 1. 동기화토크 변동률과 과도안정도에 취약선로

No.	Mode	Sst	Critical Line	CCT [cycle]	Generator	
1	-0.031+j 5.412	0.03062	1500-5150	4	25151-#1G	
			5150-5500	4	25152-#2G	
			5500-8500	6	25153- #3	
			0.01692	2500-5700	7	25154- #4
			0.01250	5150-5600	4	
2	-0.667+j 7.131	0.01719	9350-9500	8	29151-#1G	
3	-0.885+j 7.572	0.02251	9250-9700	4	29252-#4G	
			0.01730	8150-9250	8	29251-#3G
			0.01186	8500-9250	8	
			0.01299	9350-9500	8	
			0.02015	7100-7150	5	27154- #4
4	-0.517+j 8.853	0.01581	7150-7600	6	27153-#3G	
						27152-#2G
						27151-#1G

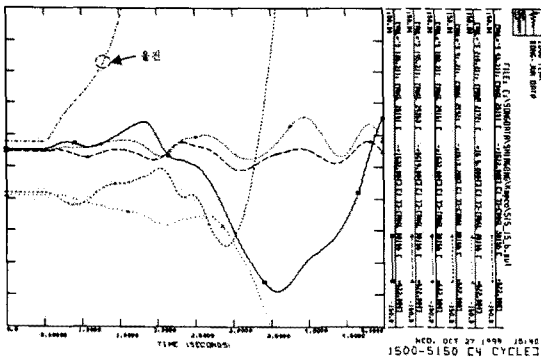


그림 2. PSS/E 결과 (선로 1500-5150)

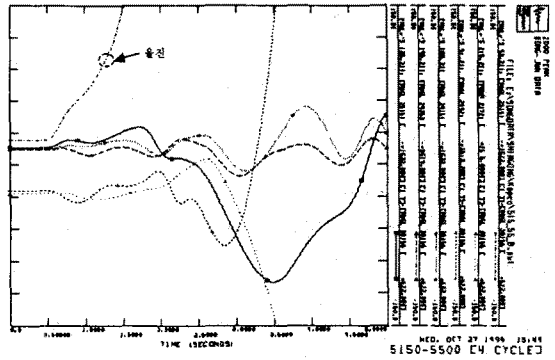


그림 3. PSS/E 결과 (선로 5150-5500)

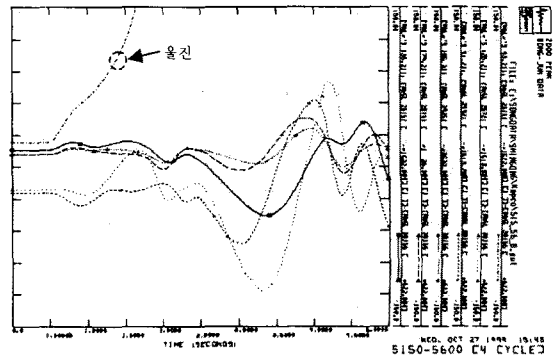


그림 4. PSS/E 결과 (선로 5150-5600)

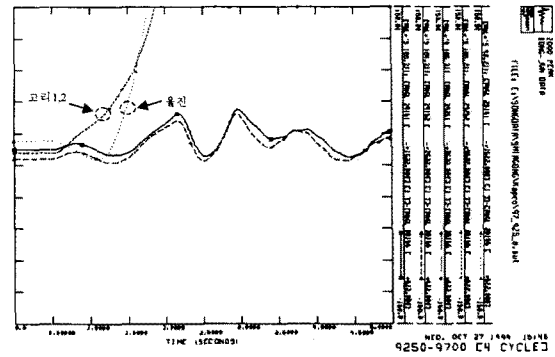


그림 5. PSS/E 결과 (선로 9250-9700)

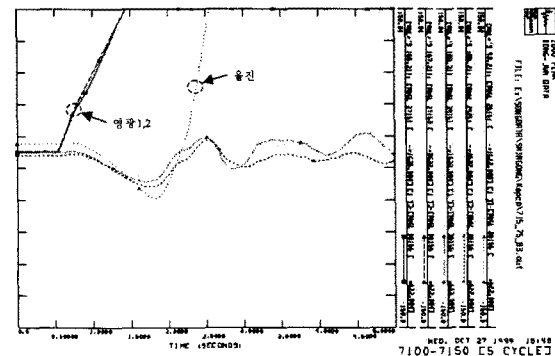


그림 6. PSS/E 결과 (선로 7100-7150)

5. 결 론

이 논문에서는 확대행렬의 고유치감도를 대규모 실제 전력계통인 한전계통의 과도안정도 상정사고 해석에 응용한 결과를 기술하였다.

계통상태행렬의 고유치 허수부의 변화가 MSTC의 변화의 영향을 반영하고 있으므로 고유치 허수부의 변화로부터 과도안정도 상정사고의 지표인 SMSTC를 계산하는 것이 가능하다. SMSTC를 계산하는데 필요로 하는 고유치의 변화는 확대행렬의 고유치감도로부터 계산하였다.

이 논문에서 과도안정도 상정사고의 지표로 사용한 SMSTC 알고리즘을 한전계통에 적용한 결과, 과도안정도에 취약선로와 그에 대응하는 발전기들을 선정할 수 있었고, PSS/E를 이용한 시간영역해석 결과와 상당히 일치함을 확인할 수 있었다.

제안한 알고리즘이 대규모 한전계통에 성공적으로 적용됨으로써 SMSTC가 과도안정도 상정사고 해석에 중요한 도구가 될 수 있음을 확인하였다

(참 고 문 헌)

- [1] 심 판식, 남 해곤, 김 용구, 송 성근, "고유치감도를 이용한 과도안정도의 상정사고 해석법의 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, C권, 1999.7.19-21
- [2] H.K.Nam, Y.G.Kim, K.S.Shim, K.Y.Lee, "A New Eigenvalue Sensitivity Theory of Augmented Matrix and Its Applications to Power System Stability Analysis", IEEE Trans., PE-464-PWRS-0-02-1999, 게재승인
- [3] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1994.