

등면적법을 이용한 발전기 탈락 안정화방안 전략

장 광 수^{*} Y.Gowada^{**} 박 종 영^{***} 장 병 태^{****} 유 영 식^{*****} 조 범 섭^{*****}
^{*}서울대 ^{**}TMT&D ^{***}KEPRI ^{****}KPX ^{*****}KPX

The stabilization strategy of Generator rejection
 using Equal Area Criterion in Korean Power System

Gwang-Soo Jang^{*} Y.Gowada^{**} Jong-Young Park^{***} Byung-Tae Jang^{****} Young-Sik Lyu^{*****} Burm-Sup Cho^{*****}
^{*}Seoul National University ^{**}TMT&D ^{***}KEPRI ^{****}KPX ^{*****}KPX

Abstract - 전력계통에 대해 적용되고 있는 수많은 안정화 방안으로 발전기 탈락, 부하차단, 계통분리 등의 방법 중에서, 우리나라 계통에서의 과도안정도 문제에 대한 안정화 대책으로는 주로 발전기 탈락이 많이 적용되어 왔다. 본 논문은 이러한 발전기 탈락량에 관한 주제를 다루고 있다. 이러한 발전기 탈락을 적용하기 위해서 과도안정도 취약지점에 대해 KPX 보고서를 참조하여 상정사고 지점을 선정하고, 해당지역 계통에 대해 등면적법을 적용, 적정 발전기 탈락량을 계산하였다. 이러한 사전 연산형(off-line) 형 발전기 탈락 외에도 온라인 상에서의 발전기 탈락량 계산방법과 그 문제점에 대해서도 고려하였다.

0.34sec까지 설정하고 있는 것도 있다.

2.2 상정사고의 선정

상정사고의 선정은 '우리나라 전력계통에서의 여러 가지 사고 현상별 취약개소 도출 및 해소 방안 연구'(KPX, 한전 전력 연구원, 2002.12) 보고서를 참조하여, 그 중에서 선정된 상정사고 중에서 다음과 같이 3지점을 다시 선정하였다. (PSS/E 2004년도 계통)

영광 - 신광주
 평택 - 화성
 울진 - 신태백

1. 서 론

한국계통은 일본계통 등에 비하면 상당히 highly looped 된 계통이라고 볼 수가 있으며, 이것은 과도안정도에 있어서 상당히 유리한 점이라고 볼 수가 있다. 우리나라 계통에 주로 적용되고 있는 안정화방안 중에, 그 주요한 방안 중의 하나로 발전기 탈락이 있다. 이미 주요 발전기군 근처에서의 발전기 탈락 전략이 수립되어 있는 상태이다. 본 논문은 적정 발전기 탈락량을 결정하는 문제를 다루었다. 그러기 위해 2002년도 KPX보고서를 참조하여, 2004년도 계통에서의 상정사고 지점을 선정하여 그 안정도를 판별한다. 그리고, 상정사고 지점에 대해 등면적법을 적용하여, 탈락될 수 있는 적정 발전량을 결정한다. 이상의 과정은 모두 사전 연산형(off-line)에 해당하는 것으로, online상에서 발전기 탈락량을 결정하는 방법과 그 문제점에 대해서도 간단히 언급하였다.

KPX 보고서에서 상정사고를 선정한 기준은 다음과 같다.

2. 본 론

2.1 등적도의 과정(사전 연산형)

본 논문에서 주로 적용될 상정사고의 종류는 병렬 2회선 사고 (2 parallel transmission line fault)이며, 그 모의 과정의 시간 순서는 다음과 같다.

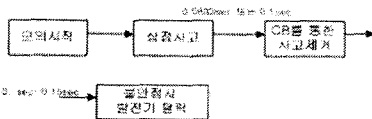


그림 1. 등적도의 과정 (CB : Circuit Breaker)

상정사고 발생에서 CB를 통한 사고제거까지의 시간은 일반적으로 345KV선의 경우에는 0.1sec, 765KV선의 경우에는 0.0833sec로 한다. 사고제거에서 발전기 탈락까지의 시간은 보고서등에서 여러 가지로 택해 모의를 하고 있으나, 0.1sec~0.15sec까지가 보통이며, 때로는 0.05sec나

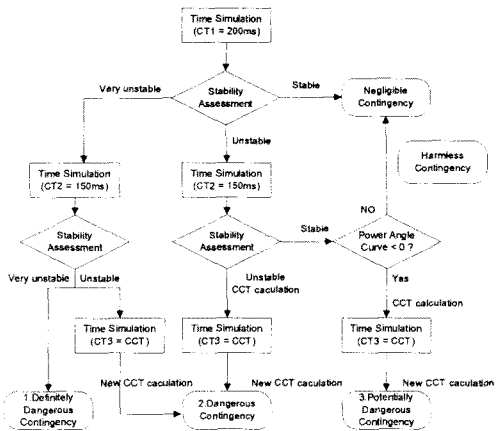


그림 2. 상정사고 선정 기준

위의 그림 첫 단계에서는 상정사고 지속시간을 200ms로 일반적인 값을 훨씬 상회하는 시간으로 주고 PSS/E로 모의하였다. 이 단계에서 안정한 상정사고는 무시할 만 한 경우(Negligible contingency)가 됨을 쉽게 알 수 있다. 나머지는 곧 불안정한 사고가 되는데, 이 중 '매우 불안정한 상정사고(Very Unstable Contingency)'는 CB에 의해 사고가 제거된 후의 전기적 출력 곡선이 기계적 입력 곡선의 값을 회복하지 못하는 경우를 말한다. 즉, 그림 3 과 같은 경우가 된다. 이러한 '아주 불안정한 상정사고'는 아무리 사고 지속 시간을 짧게 하더라도 아주 불안정한 경우를 벗어날 수 없음을 알 수 있다. 또한, 등면적법에서 볼 때, 감속영역(deceleration area)가 아주 존재하지 않는 경우가 된다.

두 번째 단계에서는 상정사고 지속시간을 50ms 짧게, 즉 150ms로 설정한 후, 첫 번째 단계에서 불안정한 경우로

판명되었던 상정사고에 대해 모의를 한다. 이 경우, 여전히 불안정하면 이것을 불안정한 상정사고(Unstable Contingency)로 판명한 후, 안정하기까지의 마진을 계산하여 이것을 새로운 CCT(Critically Fault Clearing Time)로 설정할 수 있다. 안정하다 할지라도, 수렴과정에서 전기적 출력 곡선에서의 기울기가 0보다 작게 되는 영역까지 넘어가는 부분이 있다면, 그런 경우에 한해서 '잠재적으로 불안정한 상정사고(Potentially Unstable Contingency)'로 부르기로 한다. 안정한 경우, 곡선의 기울기가 0보다 작은 영역으로 넘어가는 부분이 없는 경우는 '무시할 만한 경우'의 범주에 포함시킬 수 있다.

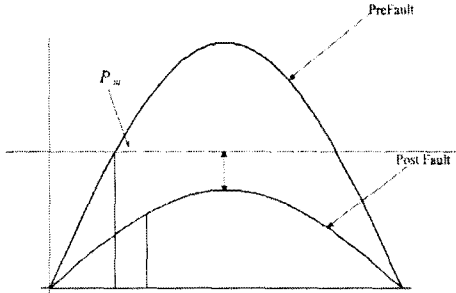


그림 3. 매우 불안정한 경우(Very Unstable Contingency - 발전기의 전기적 출력이 기계적 입력을 회복하지 못하는 경우)

2.3 선정된 상정사고의 모의결과

아래는 2.2절에서 선정된 상정사고의 모의결과를 나타낸 것이다.

상정사고 지역	상정사고 종류	안정도 여부	안정화 방안 / 안정도 여부
영광-신광주	병렬 2회선 사고	불안정	발전기 1기 탈락 (안정) 발전기 2기 탈락 (안정) 발전기 3기 탈락 (안정) 발전기 2기 탈락 (안정)
평택-화성	병렬 2회선 사고	불안정	발전기 1기 탈락 (안정) 발전기 2기 탈락 (안정) 발전기 3기 탈락 (안정)
울진-신대평	병렬 2회선 사고	불안정	발전기 1기 탈락 (안정) 발전기 2기 탈락 (안정)

표 1. 선정된 상정사고의 안정도 판별결과 (2004 PSS/E 데이터)

'평택 - 화성'의 경우를 제외하고는 모두 하나의 발전기를 탈락시킴으로써, 안정화됨을 알 수 있다.

2.4 등면적법을 이용한 적정 발전기 탈락량 계산

선정된 위의 상정사고들에 대해 등면적법을 적용하기 위해 먼저 PSS/E모의를 통해 그림 4에서와 같이 위상각과 전력에 대한 데이터를 얻었다. 위상각의 경우, 동일버스에 연결된 발전기들의 위상각의 weight sum을 취하였고 (inertia에 대해), 전력은 역시 동일 버스로 흐르는 발전기들의 전력의 합을 취하였다. 곡선의 형태는 계통의 저항까지 고려하여 $a_1 \sin(\delta) + a_2 \cos(\delta) + a_3$ 를 취하였다. 사고전의 곡선(Prefault curve)을 얻는 방법은 다음과 같다.

먼저 0.08초 정도의 짧은 사고지속시간을 준 다음, CB에 의한 사고제거가 아니라, PSS/E 모의 상에서 선로를 원상 복구시킨다. 이렇게 하면 정상상태로 수렴하기까지의 데이터를 얻는다. (정상상태를 중심으로 한 데이터) 0.2초 정도의 긴 사고지속을 준 다음, 같은 방식으로 선로를 원상 복구시킨다. 이렇게 하면 위상각이 발산하므로 비교적 긴 범위의 prefault 곡선 데이터를 얻는다. 이상의 2가지 범위의 데이터를 합쳐 최소사승법(Least square method)으로 curve fitting을 해서 prefault 곡선을 얻는다. 사고 지속시간 동안의 곡선과 사고 후의 곡

선도 PSS/E모의를 통해 쉽게 얻을 수 있다. 이 때, 기준 위상각은 삼천포 위상각을 사용하였다.

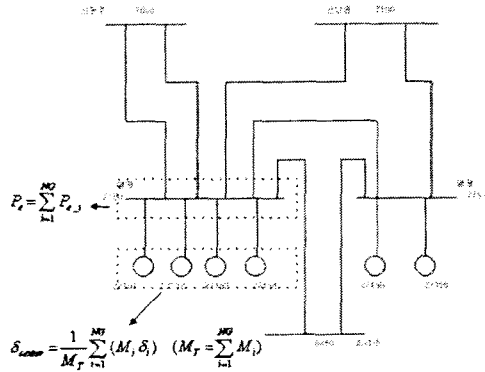


그림 4. 영광-신광주 계통에서의 데이터 수집방법

이와 같은 과정을 거쳐 다음 3지역에 대한 위상각-전력 곡선을 그림 5와 같이 얻었다.

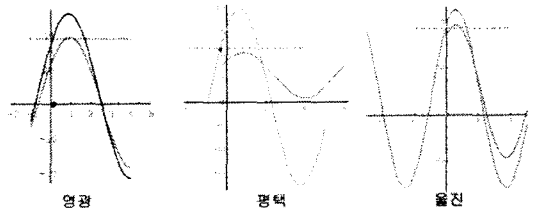


그림 5. 위상각 - 전력 곡선

위 그림에서 보면 약간의 차이는 있지만, CB에 의해 사고 제거된 후의 곡선이 기계적 입력을 거의 회복하지 못함을 알 수 있다. 또한 감속영역(deceleration area) 또한 존재하지 않는다. 발전기 탈락량 결정 문제는 위의 곡선에서 기계적 입력 P_m 을 어느 수준 정도로 떨어뜨려야 감속영역이 가속영역을 넘어설 수 있는냐하는 문제이다. 이것은 다음과 같이 계산될 수 있다.

가속 영역 :

$$accelerationarea = \int_{\delta(steadystate)}^{\delta(faultcleared)} (P_m - P_{e(duringfault)}) d\delta + \int_{\delta(faultcleared)}^{\delta(tc + ST)} P_m - P_{e(faultcleared)} d\delta \quad (1)$$

감속 영역 :

$$decelerationarea = \int_{\delta(tc + ST)}^{\delta(P_m' = P_{equilibrium})} (P_{e(faultcleared)} - P_m') d\delta \quad (2)$$

$\delta(steadystate)$: 정상 상태에서의 위상각

$\delta(faultcleared)$: CB에 의해 사고 제거된 후 전기적 출력 곡선

P_m : 기계적 입력값(일정한 것으로 가정)

$P_{e(during\ fault)}$: 사고 지속 시간동안의 전기적 출력 곡선
 fic : fault cleared, ST : 사고제거 후 발전기 탈락까지의 시간지연

$P_{e(fault\ cleared)}$: CB에 의해 사고제거된 후의 전기적 출력 곡선

P_m' : 발전기 탈락된 후의 기계적 입력값)

식 (1), (2)에서 $acceleration\ area \leq deceleration\ area$ 의 부등식을 P_m' 에 대해 푼다. 따라서 $P_m - P_m'$ 이상의 발전량만 탈락된다면 계통은 안정화되어진다고 할 수 있다.

상정사고 지역	ST	GR(PU)	탈락된 발전기 수
영광	50ms	7.38084	1 G (9.3pu)-안정
	100ms	8.8353	1 G (9.3pu)-안정
	150ms	10.7235	1 G (9.3pu)-불안정, 2 Gs (2 × 2.9pu)-안정
평택	50ms	3.05238	1 G (2.9pu)-불안정, 2 Gs (2 × 2.9pu)-안정
	100ms	3.52857	1 G (2.9pu)-불안정, 2 Gs (2 × 2.9pu)-안정
	150ms	4.16144	1 G (2.9pu)-불안정, 2 Gs (2 × 2.9pu)-안정
울진	50ms	6.27101	1 G (9.3pu)-안정
	100ms	7.27815	1 G (9.3pu)-안정
	150ms	8.54266	1 G (9.3pu)-안정

표 2. 등면적법에 의해 계산된 발전량 탈락과 PSS/E에서 탈락된 발전기 수의 비교
 (ST: 사고제거 후 발전기 탈락까지의 시간지연, GR : 등면적법에 의해 계산된 탈락될 발전량)

PSS/E에서 발전기 탈락이 아닌, 발전량 삭감하는 activity를 찾지 못하였으므로, 일단 표 2와 같이 비교하여 보았다. 등면적법에 의해 계산된 발전량이 PSS/E에서 탈락된 발전량 범위 한도 내에 있으므로, 위의 결과는 일단 타당하다고 말할 수 있다. 예를 들어 평택의 경우를 보면, ST가 150ms인 경우 PSS/E에서 탈락될 발전량이 5.8 PU (2.9 X 2)이고 하나의 발전기를 탈락시켰을 경우(2.9PU)불안정해지는데, 등면적법에 의해 계산된 발전량 탈락값은 이 범위 안에 있다. 따라서 계산된 결과는 타당하다고 말할 수 있다.

2.5 Online 상에서의 발전기 탈락 안정화 방안

이 절에서는 영광지역과 평택지역의 상정사고에 대한, 온라인 상에서의 발전기 탈락모의와 그 문제점을 언급하고자 한다.

온라인 상에서의 모의과정은 그림 6과 같이 가정하고자 한다.

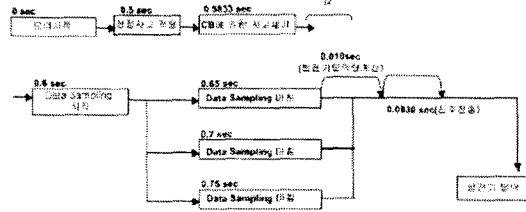


그림 6. 온라인 상에서의 안정화 방안 적용과정

사고제거 후 바로 데이터 샘플링을 시작할 경우, 계통상의 과도적 현상으로 인해 나쁜 데이터가 얻어질 수도 있으므로 α 라는 시간지연을 설정한다. 데이터 샘플링시간이 짧을수록 좋겠지만, 여기서는 일단 0.05sec, 0.1sec, 0.15sec의 세 가지 종류로 나누어 모의해 보기로 하였다. 따라서 발전기 탈락까지의 총 시간지연은 약 $0.1 + sampling\ time(0.05, 0.1, 또는 0.15sec의 3\ 가지) + \alpha$ 가 된다.

아래 그림 7은 이와 같이 모의하여 얻어진 3 가지 샘플

링 시간에 대한 데이터를 curve fitting한 것이다.

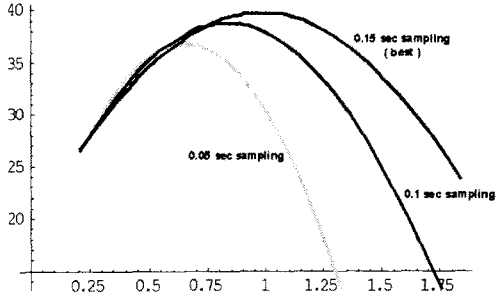


그림 7. CB에 의해 사고제거된 후의 곡선(영광지역-Online)

위에서 얻어진 3가지 곡선 중에서, 샘플링 시간이 0.15sec인 경우가 가장 offline상에서 얻어진 곡선과 가까운 형태를 보였다. 따라서 샘플링시간에 제약이 있는 한, 얻어진 데이터들이 항상 만족스런 curve fitting을 보장하지 않는다는 것을 알 수 있다.

평택지역에서의 curve fitting은 본 논문에서 최대한의 샘플링 시간으로 설정한 0.15sec의 경우에도, 데이터의 형태가 아래로 볼록한 형태를 취한 이유로 offline상에서의 곡선에 근접하지 못하였다. 실제로 이것은 다음과 같이 offline상에서 얻어진 곡선의 모습에서도 잘 드러난다.

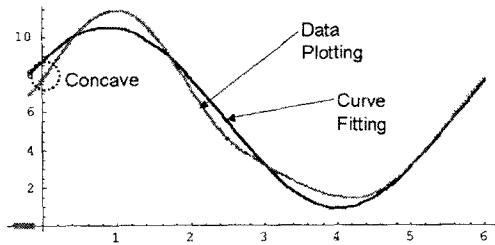


그림 8. 아래로 볼록한 데이터 형태의 예(평택지역-online)

이런 concave한 형태의 데이터는 만약 저항을 무시하고 $P_e - \delta$ 곡선을 모델링하였을 경우, 기계적 입력이 마이너스가 되어야한다는 경우까지 상정할 수도 있으므로, 좋은 curve fitting을 기대할 수 없다.

3. 결론 및 과제

본 논문에서는 2002년 KPX보고서를 참조하여 한국계통에서의 상정사고 지점을 선정한 후, offline상에서 등면적법을 적용하여 적정발전기 탈락량을 계산하였다. 계산한 결과는 PSS/E에서의 모의결과와 비교하여 그 타당성을 검토하였다. online상에서의 모의는 짧은 시간 내에서의 데이터 샘플링이 항상 좋은 curve fitting을 보장하지 못함을 알 수 있었다.따라서 이 경우에 online상에서의 얻어진 데이터가 좋은 curve fitting을 보장할 수 있도록 하는 테크닉이 따로 연구되어야 할 것이다. 따라서 이것을 future work으로 제시한다.

[참고 문헌]

- [1] KPX, KEPRI, 우리나라 전력계통에서의 여러 가지 사고 현상별 취약개소 도출 및 해소 방안 연구, 2002. 12
- [2] Bergen, Power System Analysis, PRENTICE HALL,