

소신호 안정도를 고려한 확률론적 신뢰도 평가 및 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 신뢰도 평가 tool의 구현

장 광 수*, 김 유 창*, 정 하 섭*, 박 종 근*
*서울대학교 전기 컴퓨터 공학부

Probabilistic Reliability Evaluation considering the small signal stability constraints with Monte Carlo simulation

Gwang - Soo Jang*, Yu - Chang Kim*, Ha - Sub Jung*, Jong Keun Park*
*School of Electrical Engineering and Computer Sciences

Abstract - 본 논문에서는 계통의 불확실성을 고려한 확률론적인 방법으로 전력계통의 신뢰도를 평가한다. 발전기 3 state modeling 및 부하의 정규분포 곡선으로 확률론 신뢰도 평가 모델을 가정하였다. 그리하여 Adequacy 및 계통의 전압 및 송전선제약 조건 외에도, 소신호 안정도 항목을 추가하여 보다 동적인 측면에서의 신뢰도 평가가 이루어지도록 하였다. 이러한 평가 방법의 결과에 의하여 각 평가 항목 간의 비율을 비교하였으며, 이를 통한 PSS의 설치 위치 선정의 근거를 마련하였다. 모의 방법은 Monte Carlo Simulation 방법을 사용하였으며, WSCC 3기 9모선과 New England 10기 39모선을 모의계통으로 하였다.

1. 서 론

전력계통의 신뢰도는 크게 2 가지로 나누어 평가되는데, 적정성(adequacy)과 안전도(security)가 그것이다. 적정성은 부하를 충당하기 위해서 계통이 발전설비를 비롯한 설비들을 얼마나 충분히 갖추고 있는가와 관련된 것이고, 안전도는 외란에 대해서 계통이 견디는 능력을 평가한다. 이러한 나 전력계통의 신뢰도 평가 방법은 전통적으로 결정론적인 방법론에 의지하고 있다. 이는 신뢰도 평가의 상정사고를 고려함에 있어서 최대 용량 발전기의 outage를 가정하거나 발전단에서 가장 가까운 선로의 지락사고를 가정하는 방법을 말한다. 이와 같이 계통에서 가장 severe한 contingency를 고려하는 결정론적인 방법론은 다양한 계통의 운전조건에 대해 유연하게 대처하지 못한다는 단점이 있다. 더구나 전력계통의 규모가 날로 커지고, 전력 산업의 추세가 점점 자유 경쟁 체제로 진입함에 따라, 계통의 불확실성이 점점 증가하고 있고 이에 따라 종래의 결정론적인 신뢰도 평가방법은 과부하를 유발한다는 점이 지적되어져 온 만큼, 종래의 결정론적인 신뢰도 평가에 대한 재고(再考)의 필요성이 점점 증가하고 있는 실정이다. 본 논문은 이러한 추세에 맞추어 확률론적인 방법을 통하여 계통의 신뢰도를 평가하되[1-3], 계통의 동적인 측면까지도 고려하기 위해서 비교적 독립적으로 연구되어져 온 소신호 안정도 평가항목[4-8]을 추가하였다.

결과적으로 본 논문은 다음과 같은 2가지 질문에 답하는 것을 목적으로 하였다.

- 계통의 소신호 안정도 평가 항목은 전체 신뢰도에 얼마만큼의 영향을 미칠 것인가?
- 계통의 소신호 안정도를 평가하기 위해 확률론적 신뢰도 평가 방법은 어떻게 재구성되어야 하는가?
- 위와 같이 평가된 확률론적 신뢰도 평가의 결과로서 안정화 전략은 어떻게 강구되어야 할 것인가?(예를 들어, Power System Stabilizer-PSS와 같은 FACTS기기의 설치위치 선정 등)

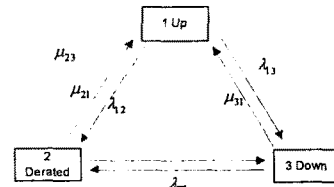
위의 질문에 답하기 위해서 전통적인 발전기 capacity에 관한 3 state 모델 및 부하에 관한 정규 분포 가정이 사용되었으며[9], 발전기 random dispatch 모델이 따로 제안되었다. 신뢰도 지수의 직접적인 평가방법으로 Monte Carlo simulation을 사용하였으며, 중복된 sampling을 피하기 위한 process가 이 따로 제안되었다. Monte Carlo simulation으로 평가된 결과로서의 신뢰도 지수를 통하여 각 발전기가 불안정도에 참여하는 정도를 나타내는 CFU(Contribution Factor to the Unstable modes)가 제안되었고, 이를 통하여 PSS의 설치위치 선정의 근거를 마련하였다. 모의에는 WSCC 3기 9모선이 사용되었다.

2. 본 론

2.1 전력계통의 확률 모델링

2.1.1 발전기 capacity 상태 모델

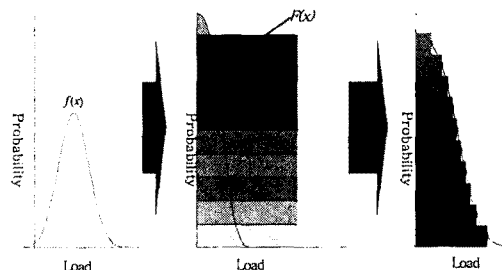
발전기 available capacity에는 Markov process를 이용한 다음과 같은 3-state 모델을 사용하였다.



<그림 1> 발전기 capacity에 관한 3 - state 모델

2.1.2 부하 상태 모델

부하상태 모델에는 다음 그림<2>와 같이 정규분포를 가정한 후, discrete 하게 각 부하 수준을 나누었는데, 모의에서는 총 20개의 level로 나누었다.



<그림 2> 부하 level에 정규 분포 모델 및 sectionalization

2.1.3 발전량 random dispatch 모델

$$Gout_k = U[Max[0, P_{Dtotal} - (\sum_{j=1}^{k-1} Gout_j + \sum_{j=k+1}^m Gcap_j)], \sum_{j=1}^{k-1} Min[Gcap_j, P_{Dtotal} - \sum_{j=1}^{k-1} Gout_j]] \quad (1)$$

식 (1)에서의 발전기 random dispatch model은 전체 부하량을 만족되 각 발전기의 용량을 벗어나지 않는 범위 내에서 random dispatch 하도록 하고 있다.

2.2 신뢰도 평가 항목

2.2.1 적정성 평가항목

$$Gcap_{total} > P_{Dtotal} \quad (2)$$

2.2.2 안전도 평가항목

- Steady state constraints
- 조류계산의 수렴 조건: 전압 붕괴점과 밀접하게 연관된다.
- 송전선 열용량 제약 조건: phase angle로서 간략화하였다.

$$|\theta_i - \theta_j| \leq \theta_{spec} \quad (3)$$
- 버스 전압 크기 제약 조건: $V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max}$ (4)
- 슬래버스 등에서의 발전량 제약조건:

$$P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max}, Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max} \quad (5)$$
- Small signal stability constraint:

$$Re(\lambda_k) > 0 \quad (6)$$

위의 평가 순서가 다음 그림 <3>에 잘 나타나 있으며, 전체 P(F)는 다음과 같이 계산된다.

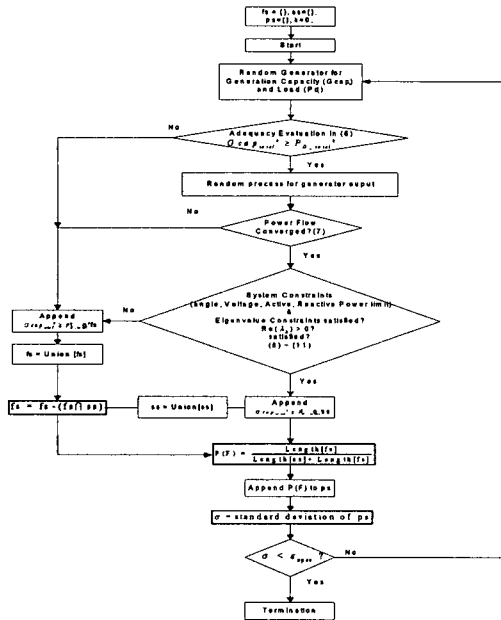
$$P(F) = \frac{Length[fs]}{Length[ss] + Length[fs]}, P(S) = 1 - P(F) \quad (7)$$

2.3 CFU(Contribution Factor to the Unstable modes)

본 논문에서 제안하는 CFU는 "Random 하게 생성된 각각의 operating point에서 각 발전기가 불안정모드들에 대하여 최대 참여계수를 가지는 횟수의 normalization"으로 정의된다. 즉, CFU를 통하여 PSS의 설치 우선 순위를 정할 수 있게 된다.

2.4 모의 결과

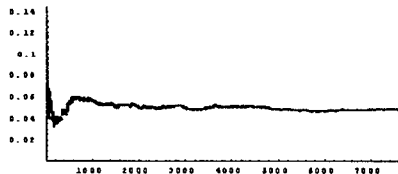
본 논문에서의 모의에는 WSCC 3기 9모선이 사용되었다.



〈그림 3〉 Monte Carlo simulation flow chart

2.4.1 신뢰도 지수의 계산

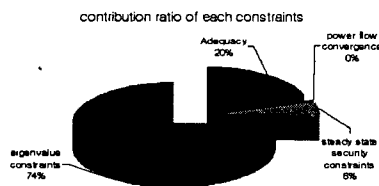
전체 신뢰도 지수 P(F)는 다음 그림 <4>와 같이 0.0481433 으로 수렴하였다.



〈그림 4〉 Monte Carlo simulation을 통한 P(F)의 수렴

2.4.2 각 평가 항목의 비율

신뢰도 지수 0.0481433에 대한 각 신뢰도 평가 항목 간의 비율은 다음과 같다.

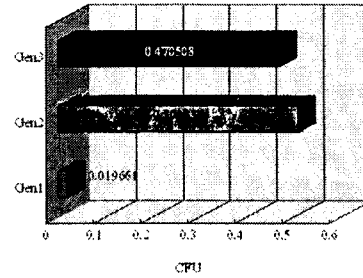


〈그림 5〉 전체 P(F)에 대한 각 평가항목간의 비율

위의 그림에서 보듯이 고유치 평가항목이 전체 P(F)에 대해 차지하는 비율은 74%로서 불안정성에 대하여 가장 취약한 제약조건으로 나타났다.

2.4.3 CFU및 PSS의 설치

각 발전기에서 CFU를 계산한 결과가 다음 그림<6>에 잘 나타나 있다.



〈그림 6〉 각 발전기에서의 CFU

위의 그림 <6>에 의하면 PSS설치 우선 순위는 발전기 2 → 3 → 1순으로 된다.

3. 결 론

본 논문은 정적인 측면에 머물러 있는 신뢰도 평가에 동적인 측면을 도입하는 것을 목적으로 하였으며, 이러한 신뢰도 평가의 결과가 과연 안정화 전략에 어떻게 쓰일 수 있는가에 대한 질문에 대답하려고 노력하였다. 그리하여 확률론적 신뢰도 평가 방법에 소신호 안정도 평가 항목을 추가하여 좀 더 동적인 측면에서 신뢰도를 평가하는 방법을 제안하였으며, 이를 위하여 발전기 3 state model 및 부하의 정규분포를 가정하고, 발전기 random dispatch model을 따로 제안하였다. 결과적으로 소신호 안정도가 전체 신뢰도 지수에 미치는 영향을 평가하여, 그 비중이 대단히 큼을 모의 결과를 통하여 보였다. 평가된 신뢰도지수의 결과를 통하여 CFU를 계산하였으며, CFU가 PSS의 설치 우선 순위를 정하는 유용한 정보가 될 수 있음을 보였다.

〔참 고 문 헌〕

- [1]Singh, C, Mitra, J, " Monte Carlo simulation for reliability analysis of emergency and standby power systems", IEEE Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE, Volume 3, 8-12 Oct. 1995 Pages 2290 - 2295
- [2]R.. Billinton, R. Kark, "Application of Monte Carlo simulation to generating system well-being analysis", Power Systems, IEEE Transactions on Volume 14, Issue 3, Aug. 1999 Page 1172 - 1177
- [3] Billinton, R, Aboreshaid, S, "Security evaluation of composite power systems", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- Volume 142, Issue 5, Sept. 1995 Pages 511 - 516
- [4] Tse. C.T, Tso. S.K, "Approach to the study of small-perturbation stability of multimachine systems", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Volume 135, Issue 5, Sept. 1988 Pages 396 - 405
- [5] K. Wang, C.T.Tse, K.M.Tsang, "Algorithm for power system dynamic stability studies taking account the variation of load power", Advances in Power System Control, Operation and Management, 1997. APSCOM-97. Fourth International Conference on (Conf. Publ. No. 450) Volume 2, 11-14 Nov. 1997 Pages 445 - 450 vol.2
- [6] K.W.Wang, C.Y.Chung, C.T.Tse, K.M.Tsang, "Probabilistic eigenvalue sensitivity indices for robust PSS site selection", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-Volume 148, Issue 6, Nov. 2001 Pages 603 - 609
- [7] C.Y.Chung, K.W.Wang, C.T.Tse, X.Y.Bian, A.K.David, "Probabilistic eigenvalue sensitivity analysis and PSS design in multimachine systems", Power Systems, IEEE Transactions on Volume 18, Issue 4, Nov. 2003 Pages 1439 - 1445
- [8] Z. Xu, Z.Y.Dong, P. Zhang, "Probabilistic small signal analysis using Monte Carlo simulation", Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE June 12-16, 2005 Pages 1707 - 1713
- [9] R. Billinton, W.Li, " Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods", 1994, Plenum Press, New York