

전력계통의 안정도 해석용 발전기제어계의 EUROSTAG 모형 개발 및 적용

김학만 · 오태규

한국전기연구원

E-mail : hmkim@keri.re.kr, tkoh@keri.re.kr

Development & Application of Generator Control System Models of EUROSTAG for Stability Study of Power Systems

Hak Man Kim and Tae Kyo Oh

Korea Electrotechnology Research Institute

요 약

신규 발전소 부지 및 송전선 경로지 확보의 어려움 때문에 신규 발전기들은 기존의 발전단지에 건설되고 송전망은 더 복잡한 망의 형태로 구성되고 있다. 이러한 구조적인 특징은 전력계통의 운용의 신뢰성에 제약을 발생시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 전력계통의 해석의 고도화와 적절한 대책이 요구된다. 또한 현재 진행중인 전력산업의 구조 개편 이후, 신뢰성과 경제성을 동시에 추구하여야 하는 경쟁적 전력시장에서의 계통해석 결과에 따른 비용 발생시에 책임소재의 투명성과 해석결과에 대한 검증이 필요하게 되어 계통해석 기술의 고도화와 이를 구현하기 위한 해석 프로그램의 다변화가 절실하게 요구된다. 본 논문에서는 대규모 전력계통 해석 프로그램인 EUROSTAG의 발전기 제어계 계통의 모형을 개발하였고, 성능을 입증하기 위해서 현재 전력회사에서 사용되는 PSS/E와 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

Abstracts — Because of the difficulty of acquiring new generation sites and right-of-way, additional units have been added to the existing generation sites and the transmission system has been developed into highly meshed configuration. This structural characteristics may cause restriction on the reliable operation of power systems. In other to meet with this problem, the enhancement of system analysis techniques and establishment of appropriate measures have been required in this situation. In addition the deregulation of electric power industry in Korea would require better tools for power system analysis and control. In this paper, exciter system models, speed governor system models and PSS models of EUROSTAG for stability study are developed. Comparison with simulation results of PSS/E is performed for verification of EUROSTAG models.

1. 서 론

최근 전력산업 구조개편 추진에 따라 지금까지의 독점적인 전력산업 환경에서 한국전력공사가 신뢰도 중심의 계통운용을 유지하여 왔고, 계통 해석도 특정 프로그램에 의존하고 있는데, 앞으로 신뢰성과 경제성을 동시에 추구하여야 하는 경쟁적 전력시장에서의 계통해석 결과에 따른 비용 발생시의 책임소재에 대한 투명성과 해석결과에 대한 검증이 필요하게 되어 계통해석 기술

의 고도화와 이를 구현하기 위한 해석 프로그램의 다변화가 절실하게 요구된다.

현재 우리계통의 안정도 해석은 주로 PTI의 PSS/E를 이용하여 검토되고 있으며, PSS/E의 해석을 위한 발전기 제어계의 파라미터가 구축되어 있다. PSS/E는 전력계통의 계획, 운용 검토를 위한 다양한 조건의 해석에서는 사용에 편리한 다양한 기능들을 제공하는 반면, 사용자 모델 추가의 제약, 고유치 해석에서 상태변수 수의 제약 등 동특성 해석에서는 다소 제약이 있다.

Table 1. Generator control system models.

여자 시스템 모형	IEEEX1, IEEX2A, IEEET1, IEEET3, EXAC1, EXAC1A, EXAC3, EXPIC1, EXST1, EXST2, EXST3, SCRX
조속기/터빈 시스템 모형	HYGOV, IEEEG1, IEEEG3, IEEESGO, TGOV1, GAST, GAST2A
PSS 모형	IEEEST, PSS2A, PTIST1

Table 2. Compared generators.

발전기	여자 시스템 모형	조속기/터빈 시스템 모형	PSS 모형
일산 1호기	EXAC1	GAST	-
울진 1호기	EXPIC1	IEEEG1	IEEEST

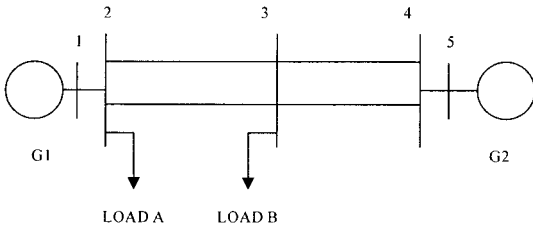


Fig. 1. Test system.

TRACTEBEL과 EDF에서 공동 개발한 전력계통 안정도 해석 프로그램인 EUROSTAG은 시뮬레이션 시간 간격의 자동조절 기능이 있어 해의 수렴성이 향상되었으며, 매크로블록을 이용한 사용자 모델의 작성이 쉬우며, 임계고장제거시간 추정 기능이 있어 안정도의 스크린 기능이 제공되며, 고유치 해석 또한 MATLAB과 연동되어 사용할 수 있어 실제계의 미소신호안정도 해석이 가능한 등 동특성 해석에서 다양한 기능을 제공한다^{[14][15]}. 따라서 계통 해석 측면에서 PSS/E의 부족한 점을 많이 보완할 수 있어 전력계통 고도화에 효과적이라 판단된다.

본 연구에서는 EUROSTAG을 이용하여 우리계통의 안정도를 해석하기 위해서 우리 계통의 발전기의 제어계 모형을 개발하였고, 모형의 성능을 검증하기 위해서 PTI

의 PSS/E와 시뮬레이션 결과를 비교, 검토하였다.

2. 발전기 제어계의 EUROSTAG 모형 및 성능 검토

2-1. 개발 모형

2001년 현재 우리 계통 해석에 이용되는 발전기 제어계의 PSS/E 모형^[14]을 토대로 개발한 EUROSTAG의 발전기 제어계 모형은 Table 1과 같으며, 여자 시스템 모형 12가지, 조속기/터빈 시스템 모형 7가지, PSS 모형 3가지로 구성되어 있다. 본 연구에서는 Table 1에 나타나 있는 발전기 제어계 모형을 EUROSTAG에서 제공되는 매크로언어(macro-language)를 이용하여 개발하였다.

2-2. 성능 검토 방법

성능 검토 방법은 개발한 발전기 제어계 모형을 포함하는 우리 계통의 발전기를 선택하여 Fig. 1의 1기 무한대 테스트 계통에서 다음의 3~4단계로 나누어 검토하였다. 단계별로 시뮬레이션에 이용된 모형과 비교대상은 다음과 같다.

○ 단계 1 : 변환된 동기기 모형 동특성 비교

EUROSTAG은 PSS/E의 데이터 형식으로 구성된 동기기 모형을 EUROSTAG 데이터 형식으로 변환하는 기능을 제공하는데, 이 단계에서 여자 시스템은 일정 Efd 모형과 조속기/터빈 시스템은 일정 Pm 모형으로 표현하여 변환된 동

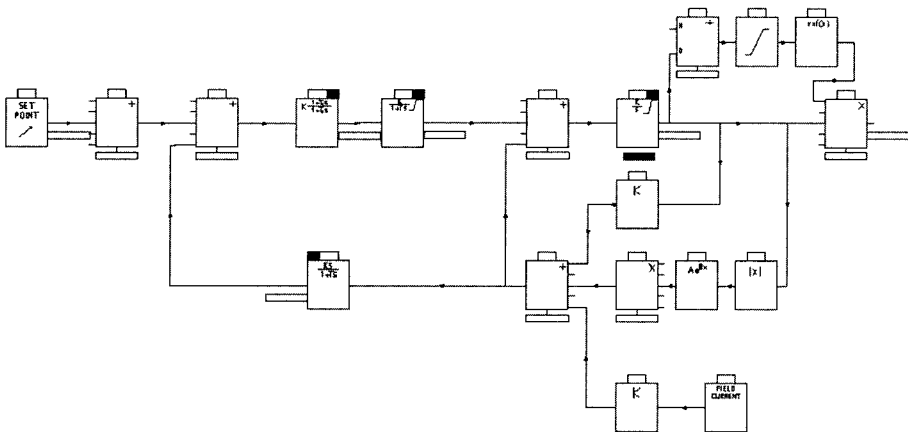


Fig. 2. EXAC1 model.

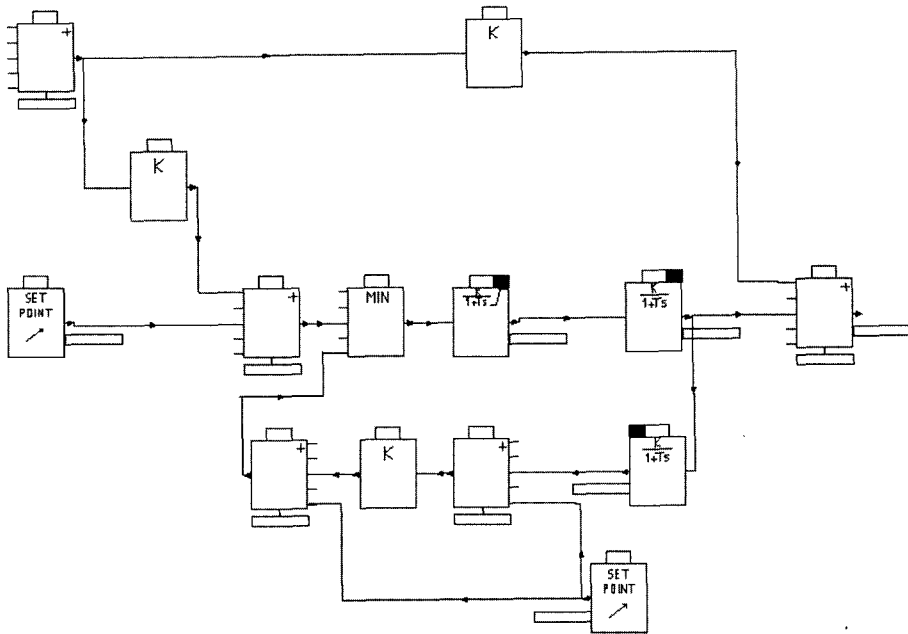


Fig. 3. GAST model.

기기 모형의 타당성을 PSS/E의 시뮬레이션 결과와 비교, 검토하였다. 비교 대상으로는 회전자 각을 이용하였다.

○ 단계 2 : 여자 시스템 모형 성능 비교

변환된 동기기 모형과 일정 Pm 모형을 이용하여 개발된 여자 시스템 모형의 성능을 시뮬레이션을 통하여 PSS/E의 결과와 비교, 검토하였다. 비교 대상으로는 단자 전압을 이용하였다.

○ 단계 3 : 조속기/터빈 시스템을 포함한 발전기 동특성 비교

동기기와 여자 시스템 모형이 일치되면 전체 발전기의 동특성 비교로 조속기/터빈 시스템 모형의 타당성과 전체 발전기 제어계를 고려한 발전기의 동특성을 모두 검토할 수 있다. 따라서 이 단계에서는 변환된 동기기 모형, 개발한 여자 시스템 모형과 조속기/터빈 시스템 모형을 모두 포함한 시뮬레이션을 통하여 PSS/E의 결과와 비교, 검토하였다. 이 방법으로 조속기/터빈 시스템 모형만을 검토하는 단계를 줄였으며, 이 단계의 비교 대상으로는 회전자 각을 이용하였다.

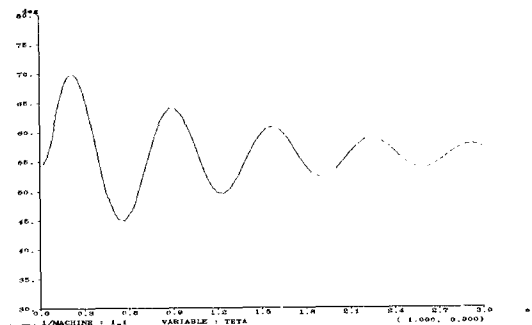
○ 단계 4 : PSS를 포함한 발전기 동특성 비교

PSS가 있는 발전기에 대해서는 PSS가 포함된 완전한 발전기 제어계 모형을 이용한 시뮬레이션을 통하여 PSS/E의 결과와 비교, 검토하였다. 비교 대상으로는 회전자 각을 이용하였다.

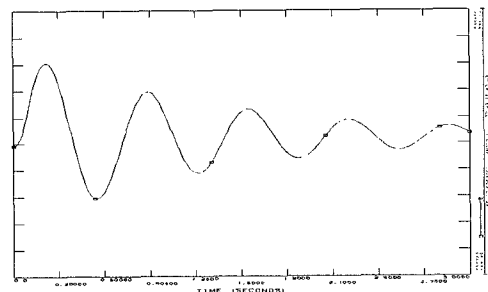
테스트 1기 무한대 모선 계통의 부하량과 선로 정수와 전압 계급은 대상 발전기에 맞게 변동하였으며, 검

토 시나리오는 다음과 같이 하였다.

○ 0초 : 모선 2 인근에 3상 고장



(a) EUROSTAG



(b) PSS/E

Fig. 4. Rotor angle comparison.

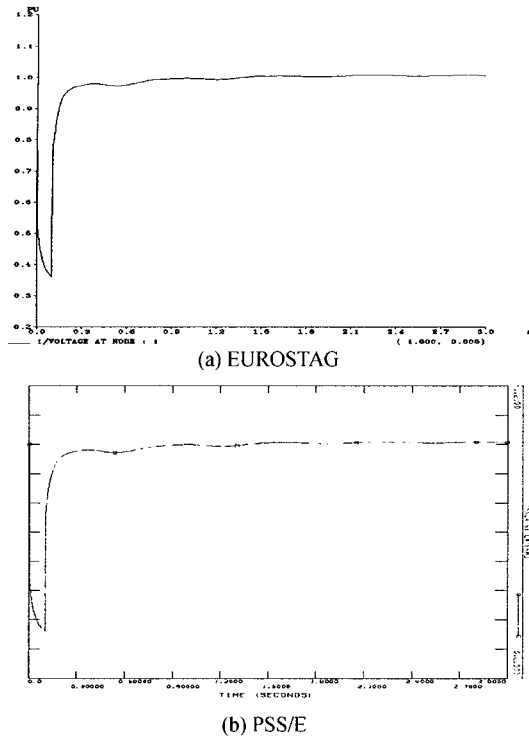


Fig. 5. Terminal voltage comparison.

○ 0.1초 : 모선 2 인근의 3상 고장 제거 및 선로 2-3(1 회선) 개방

2-3. 성능 비교

2-3-1. 비교 대상 발전기

본 논문에서는 지면의 제약으로 개발한 모든 모형의 비교 결과를 기술할 수 없어 Table 2의 발전기의 제어 계 모형에 대해서만 PSS/E와의 비교 결과를 기술하였다. 참고로 EUROSTAG은 시뮬레이션 단위 시간이 자동으로 조정되는 관계^{[14][15]}로 두 프로그램에서 동일한 시

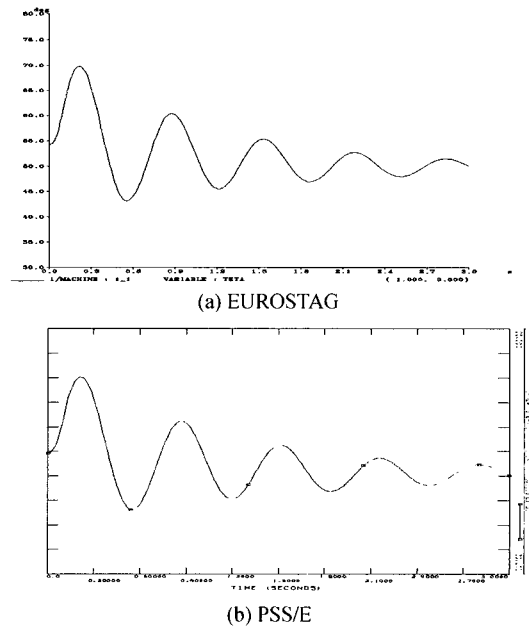


Fig. 6. Rotor angle comparison.

간의 데이터를 습득할 수 없으므로 PSS/E와 EUROSTAG의 시뮬레이션 비교 결과를 한 그림 위에 중첩해서 나타낼 수 없어서 각각 그림으로 나타내었다. 그러나 스케일은 동일하게 설정하였다.

2-3-2. 일산 1호기

EXAC1, GAST의 두 가지 모형의 성능 검토를 하기 위해서 일산 1호기를 선택하였다. Figs. 2, 3은 EXAC1, GAST의 두 가지 모형을 EUROSTAG의 매크로언어를 이용하여 구성한 것을 나타낸 것이다.

일산 1호기의 동기기 모형은 원통형이며, 일정 Efd, 일정 Pm 모형을 이용한 PSS/E와 EUROSTAG의 시뮬레이션 결과의 회전자 각을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 5는 여자 시스템 모형인 EXAC1과 일정 Pm

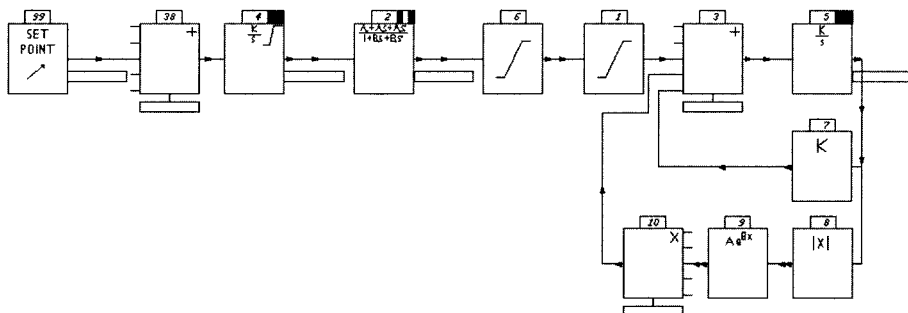


Fig. 7. EXPIC1 model.

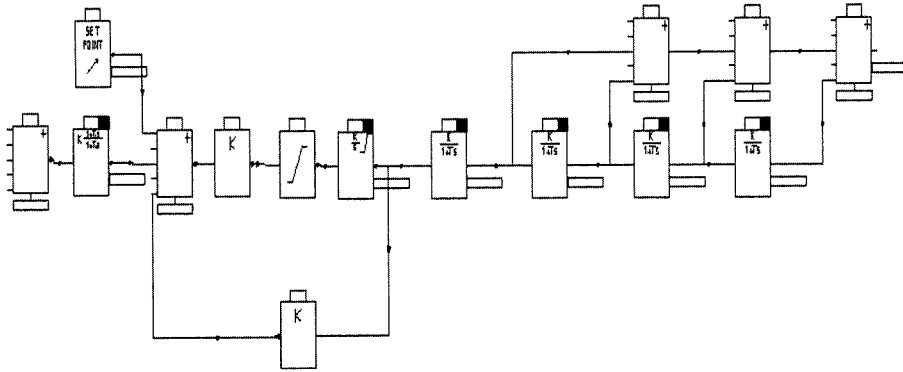


Fig. 8. IEEEG1 model.

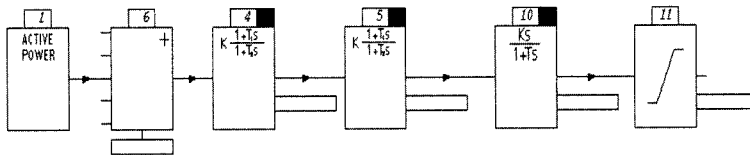
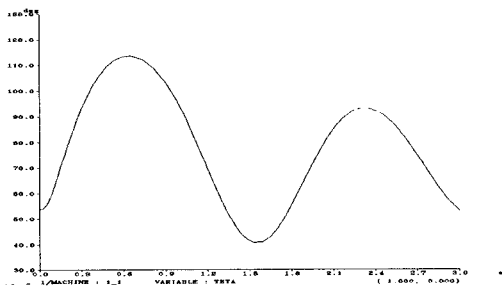


Fig. 9. IEEEEST model.

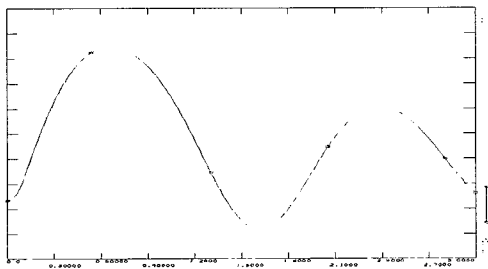
모형을 적용하여 시뮬레이션한 것으로 각각 PSS/E와 EUROSTAG의 모의 결과의 단자 전압을 나타낸 것이다.

Fig. 6은 여자 시스템 모형인 EXAC1과 조속기/터빈

시스템 모형인 GAST를 적용하여 시뮬레이션한 것으로 각각 PSS/E와 EUROSTAG의 모의 결과의 회전자 각을 나타낸 것이다.

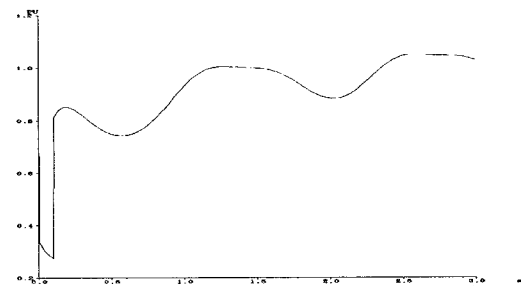


(a) EUROSTAG

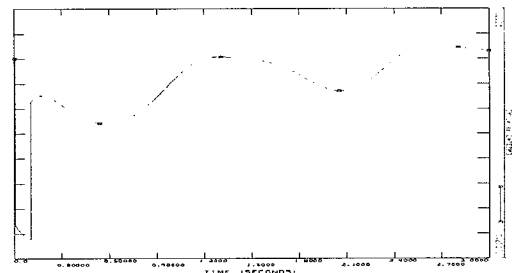


(b) PSS/E

Fig. 10. Rotor angle comparison.



(a) EUROSTAG



(b) PSS/E

Fig. 11. Terminal voltage comparison.

2-3-3. 울진 1호기

EXPIC1, IEEEG1, IEEEEST의 세 가지 모형의 성능 검토를 하기 위해서 울진 1호기를 선택하였다. Figs. 7, 8, 9는 EXPIC1, IEEEG1, IEEEEST의 세 가지 모형을 EUROSTAG의 매크로언어를 이용하여 구성한 것을 나

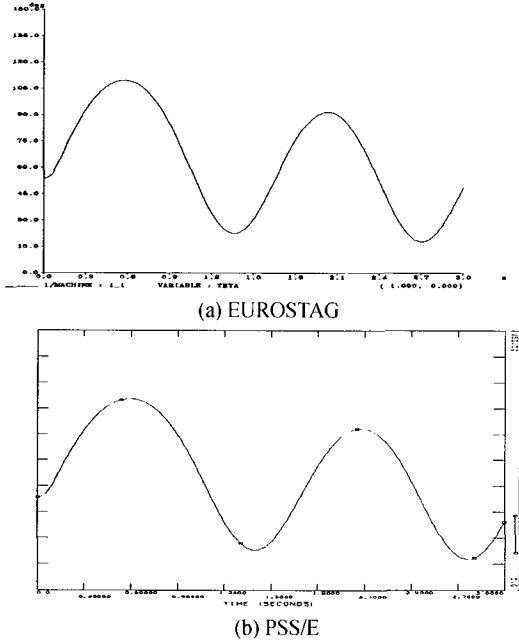


Fig. 12. Rotor angle comparison.

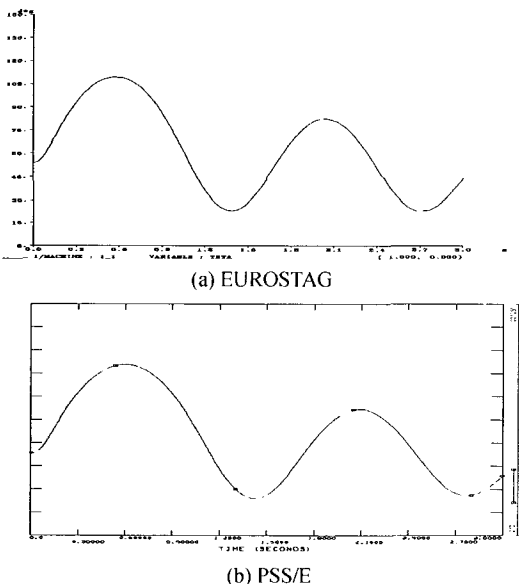


Fig. 13. Rotor angle comparison.

타낸 것이다.

울진 1호기의 동기기 모형은 원통형이며, 일정 Efd, 일정 Pm 모형을 이용한 PSS/E와 EUROSTAG의 시뮬레이션 결과의 회전자 각을 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 11는 여자 시스템 모형인 EXPIC1과 일정 Pm 모형을 적용하여 시뮬레이션한 것으로 각각 PSS/E와 EUROSTAG의 모의 결과의 단자 전압을 나타낸 것이다.

Fig. 12는 여자 시스템 모형인 EXPIC1과 조속기/터빈 시스템 모형인 IEEEG1을 적용하여 시뮬레이션한 것으로 각각 PSS/E와 EUROSTAG의 모의 결과의 회전자 각을 나타낸 것이다.

Fig. 13은 EXPIC1, IEEEG1 모형에 PSS 모형인 IEEEEST 모형을 추가 적용하여 시뮬레이션한 것으로 각각 PSS/E와 EUROSTAG의 모의 결과의 회전자 각을 나타낸 것이다.

2-3-4. 성능 비교 결과

2-3-2~2-3-3에서 확인할 수 있듯이 개발한 발전기 제어계 EUROSTAG 모형을 이용한 1기 무한대 모선 계통에서의 시뮬레이션 결과는 PSS/E의 시뮬레이션 결과와 거의 동일한 수준의 결과를 보였다. 그 외 본 논문에서 기술하지 않은 모형에 대해서도 EUROSTAG과 PSS/E의 시뮬레이션 결과가 거의 동일한 수준의 결과를 보였다⁵⁾.

3. 과도 안정도 해석 적용

3-1. 검토 대상 계통 및 상정 사고

개발한 발전기 제어계 EUROSTAG 모형을 이용하여 실 계통에 적용하여 과도 안정도 해석을 수행하였다. 2001년 계통에서 검토한 상정사고 리스트는 Table 3과 같고, PSS/E의 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해서 Table 4와 같이 관측 대상 발전기 각을 4개의 그룹으로 나누었다.

그리고 검토 시나리오는 다음과 같다.

- a) 0초 : 해당 모선 인근에 3상 고장

Table 3. Contingency list.

Case	상정 사고 선로
1	동서울 - 신용인 345 kV 2회선 차단
2	영광 - 신광주 345 kV 2회선 차단

Table 4. Rotor angle list.

Group	발전기 명
1	일산 GT #1, 평택 #1, 울진 원자력 #1
2	청평 #1, 태안 #1, 보령 #1
3	영광 원자력 #3, 여수 #2, 월성 원자력 #2
4	고리 원자력 #3, 울산 ST #1, 영남 #1

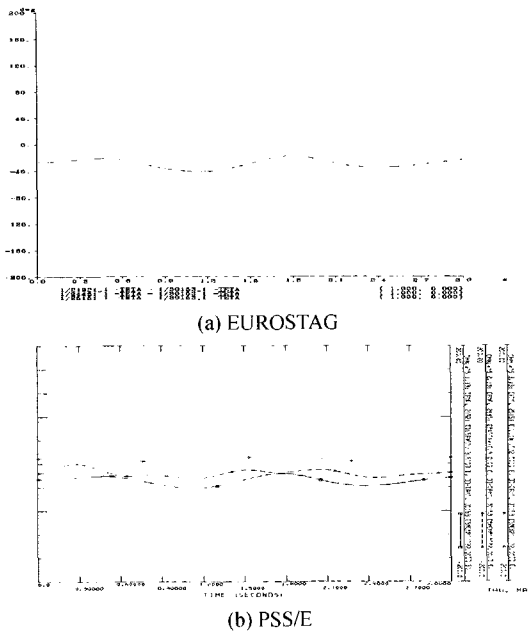


Fig. 14. Simulation results of case 1 (Group 1).

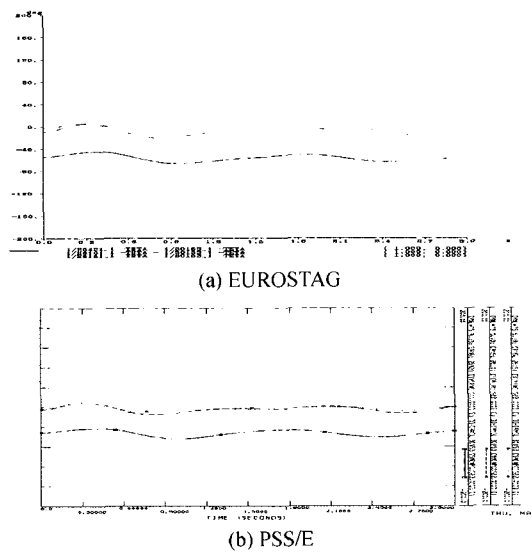


Fig. 15. Simulation results of case 1 (Group 2).

b) 0.1초 : 해당 모선 인근의 3상고장 제거 및 해당 선로 개방

3-2. 안정도 해석 비교 결과

3-2-1. 동서울 - 신용인 345 kV 2회선 차단 상정사고
Fig. 14는 동서울 - 신용인 345 kV 2회선 차단 상정

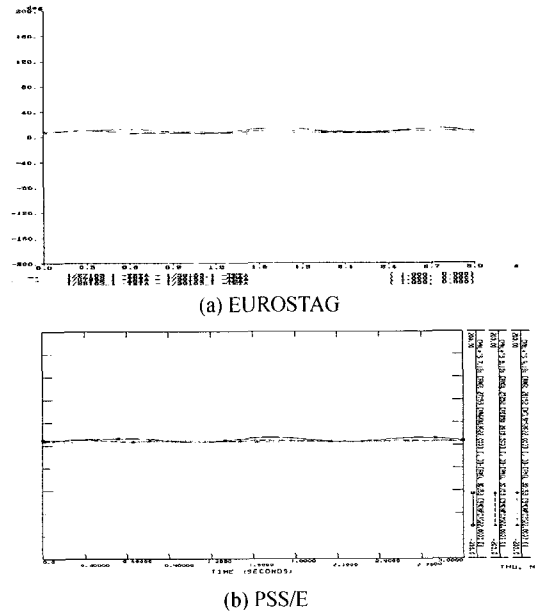


Fig. 16. Simulation results of case 1 (Group 3).

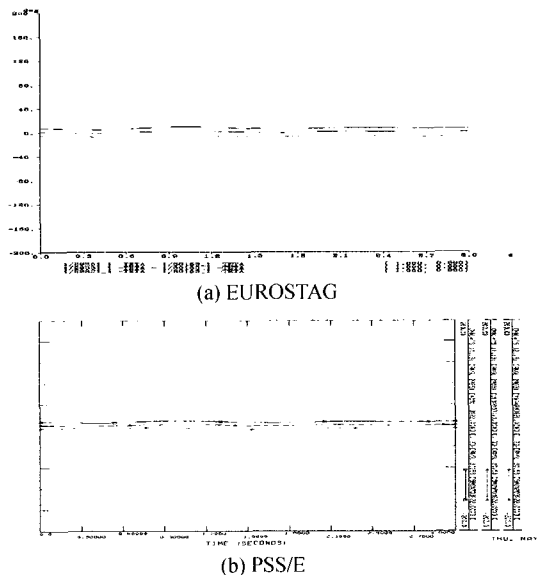


Fig. 17. Simulation results of case 1 (Group 4).

사고에 대해서 일산 GT 1호기, 평택 1호기, 울진 원자력 1호기의 회전자 각을 나타낸 것이다. Fig. 14에서와 같이 EUROSTAG 및 PSS/E의 해석 결과 그림은 거의 동일한 결과를 보인다.

Fig. 15는 동서울 - 신용인 345 kV 2회선 차단 상정 사고에 대해서 청평 1호기, 태안 1호기, 보령 1호기의 회전

자 각을 나타낸 것이다. Fig. 15에서와 같이 EUROSTAG 및 PSS/E의 해석 결과 그림은 거의 동일한 결과를 보인다.

Fig. 16은 동서울 - 신용인 345 kV 2회선 차단 상정 사고에 대해서 영광 원자력 3호기, 여수 2호기, 월성 원자력 2호기의 회전자 각을 나타낸 것이다. Fig. 16에서와 같이 EUROSTAG 및 PSS/E의 해석 결과 그림은 거의 동일한 결과를 보인다.

Fig. 17은 동서울 - 신용인 345 kV 2회선 차단 상정 사고에 대해서 고리 원자력 3호기, 울산 ST 1호기, 영

남 1호기의 회전자 각을 나타낸 것이다. Fig. 17에서와 같이 EUROSTAG 및 PSS/E의 해석 결과 그림은 거의 동일한 결과를 보인다.

3-2-2. 영광 - 신광주 345 kV 2회선 차단 상정 사고

Fig. 18은 영광 - 신광주 345 kV 2회선 차단 상정 사고에 대해서 일산 GT 1호기, 평택 1호기, 울진 원자력

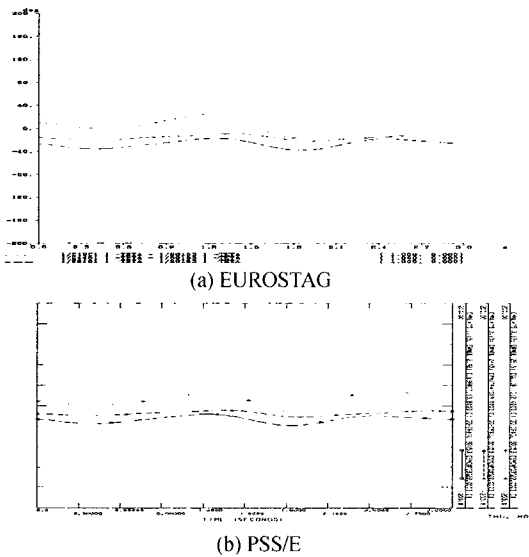


Fig. 18. Simulation results of case 2 (Group 1).

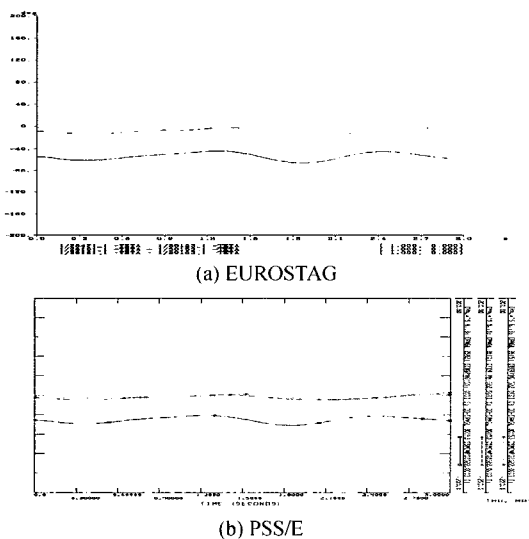


Fig. 19. Simulation results of case 2 (Group 2).

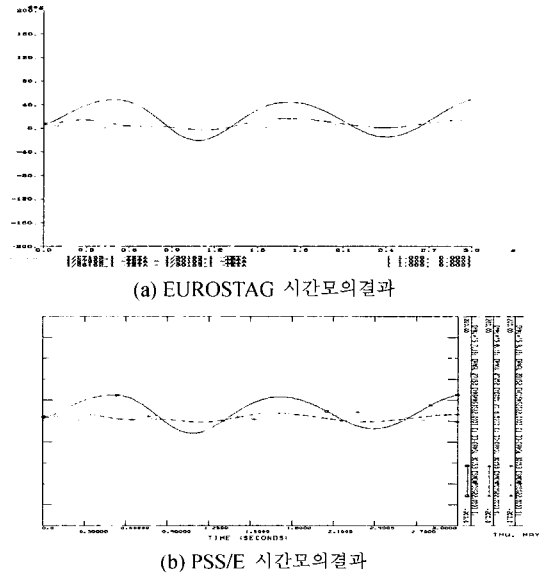


Fig. 20. Simulation results of case 2 (Group 3).

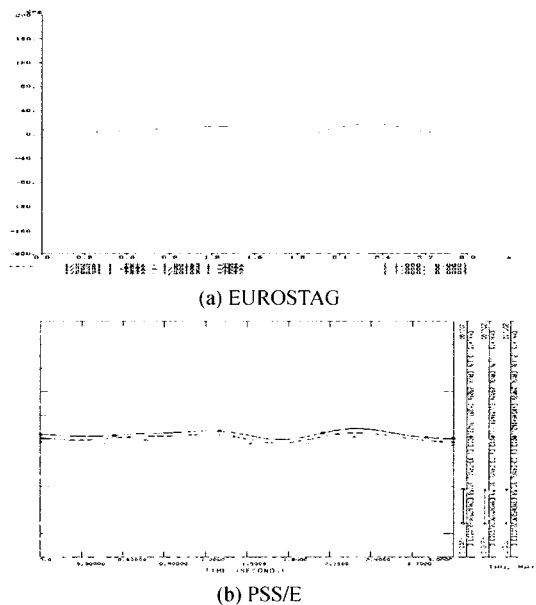


Fig. 21. Simulation results of case 2 (Group 4).

1호기의 회전자 각을 나타낸 것이다. Fig. 18에서와 같이 EUROSTAG 및 PSS/E의 해석 결과 그림은 거의 동일한 결과를 보인다.

Fig. 19는 영광 - 신광주 345 kV 2회선 차단 상정 사고에 대해서 청평 1호기, 태안 1호기, 보령 1호기의 회전자 각을 나타낸 것이다. Fig. 19에서와 같이 EUROSTAG 및 PSS/E의 해석 결과 그림은 거의 동일한 결과를 보인다.

Fig. 20은 영광 - 신광주 345 kV 2회선 차단 상정 사고에 대해서 영광 원자력 3호기, 여수 2호기, 월성 원자력 2호기의 회전자 각을 나타낸 것이다. Fig. 20에서와 같이 영광 원자력 발전기에 동요 지속 모드가 발생하였다. EUROSTAG 및 PSS/E의 해석 결과 그림은 거의 동일한 결과를 보인다.

Fig. 21은 영광 - 신광주 345 kV 2회선 차단 상정 사고에 대해서 고리 원자력 3호기, 울산 ST 1호기, 영남 1호기의 회전자 각을 나타낸 것이다. Fig. 21에서와 같이 EUROSTAG 및 PSS/E의 해석 결과 그림은 거의 동일한 결과를 보인다.

4. 결 론

본 연구를 통해서 개발된 발전기 제어계의 EUROSTAG 모형은 다음과 같다.

○ 여자 시스템 모형

- IEEEX1, IEEX2A, IEEET1, IEEET3, EXAC1, EXAC1A, EXAC3, EXPIC1, EXST1, EXST2, EXST3, SCRX

○ 조속기/터빈 시스템 모형

- HYGOV, IEEEG1, IEEEG2, IEEESGO, TGOV1, GAST, GAST2A

○ PSS 모형

- IEEEST, PSS2A, PTIST1

개발한 모형의 성능을 평가하기 위해서 1기 무한대 모선 계통에서의 시뮬레이션과 우리계통 데이터로 안정도 해석을 수행하여 PSS/E의 결과와 비교하였다. 비교 결과, 거의 동일한 수준의 동특성을 보여 개발한 모형의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

본 연구를 통해서 EUROSTAG을 이용해서 우리계통을 해석할 수 있는 기반이 구축되었으며, 추후 실 계통 해석에의 많은 활용이 기대된다.

참고문헌

1. TRACTEBEL-EDF: EUROSTAG User's Manual Release 3.2, May (1994).
2. Vernotte, J.F., Panciatici, P. and *et al.*: "High Fidelity Simulation of Power System Dynamics", IEEE Computer Applications in Power, 37-41, Jan. (1995).
3. Meyer, B. and Stubbe, M.: "EUROSTAG, a Single Toll for Power System Simulation", Transmission & Distribution International, March (1992).
4. Power Technologies Inc.: PSS/E-24 Power System Simulator Program Operation Manual & Application Guide, Dec. (1995).
5. 한국전력거래소: 전력계통 해석용 프로그램 개발 및 DB 구축(최종보고서) (2001).
6. TRACTEBEL-EDF: EUROSTAG Tutorial, May (1994).
7. Power Technologies Inc.: PSS/E-24 Power System Simulator Program Operation Manual & Application Guide, Dec. (1995).
8. Kundur, P.: Power System Stability and Control, McGraw-Hill Inc. (1994).