

대용량 원전 전력계통 안전성 평가를 위한 과도안정도 해석 프로그램 개발

이병일*, 오성균*, 김건중*, 주운표**
 * 충남대학교, ** 원자력안전기술원

Development of Transient Stability Analysis Program
 for Large Nuclear Power Plant Safty Evaluation

B. Rhee*, S.K. Oh*, K.J. Kim*, O.P.Zhu**

* Chungnam National University. ** Korea Institute of Nuclear Safety

Abstract - 이 연구에서는 2010년도 154kV, 345kV 및 765kV 송전 계통을 대상으로 전력 조류 계산 및 과도안정도 해석 프로그램을 개발하여 새로 건설되는 대용량 원전 전력계통의 안전성을 평가하였다. 개발된 프로그램은 실계통 전체 송전망 및 전국 발전기 모선을 대상으로 전력 조류계산, 3상 단락 고장계산, 과도안정도 계산을 위하여 통합된 형태의 MS-Windows 기반 프로그램 패키지로 개발되었다.

프로그램의 효용성 검증을 위한 사례연구로 2010년의 송전계통에 대한 전력 조류를 계산하여 과도안정도를 해석한 결과 대용량 원전 전력계통은 극단적인 경우를 제외하고는 과도적으로 안정함을 확인하였다.

1. 서 론

다른 발전소에 비해 원자력 발전소는 그 안전성이 무엇보다도 중요하게 취급되고 있다, 따라서 원자력 발전소가 연결되는 전력계통의 변화에 따른 원자력 발전소의 안전성 역시 중요하게 취급되어야 한다.[1,2]

2010년을 기준으로 하여 볼 때, 전력계통은 더욱 대형화되어 가고 있고 선로에 흐르는 조류 역시 점점 커지고 있다. 특히, 원자력 발전소 주변의 선로는 그 특성상 대용량의 조류가 형성되며, 이러한 선로에 사고가 발생하면 그 영향으로 원자력 발전소의 안전성이 문제가 된다.[2,3]

대용량 전력계통의 사고에 대해 원전의 안전성을 예측하는 한 방법으로 발전소의 과도안정도를 중심으로 하여 대용량의 상정사고에 따른 원자력발전소의 안전성을 예측해 보기 위해 전력조류 계산, 3상 단락고장 계산, 과도안정도 계산 등을 수행하기 위해 상용 프로그램(PSS/E, CYME 등)을 대체하여 간편하게 사용할 수 있는 과도안정도 해석 프로그램을 개발하였다. 이렇게 함으로써 향후 건설될 원전에 대한 영향 요소를 분석하고 불안전 요소를 보완하여 안전성을 강화할 수 있다.

이 논문에서는 먼저, 프로그램 개발에 사용한 가정과 발전기 및 선로에 대한 적용 모델을 설명하고, 이들을 이용한 과도안정도 계산 및 해석 절차와 구성 모델에 대해 설명한다.

프로그램의 효용성 검증을 위한 사례연구로 2010년 예상 송전계통을 대상으로 사례연구를 수행하여 그 결과를 고찰하고 향후 연구 발전 방향을 제시하였다.

2. 발전기 및 선로의 모델링

2.1 발전기의 모델링

시스템의 과도안정도는 고장이 발생하여 이를 감지한 각종 보호 설비가 작동되고 난 후 일정 시간 이내에 시스템이 안정하게 운전되는가를 확인하는 것이다. 이 연구에서는 2010년도에 예상 운전 발전기를 모델로 하여 보호 설비 작동시간과 여유분을 포함하여 고장 발생 후 6cycle(0.1초)이 지나면 보호설비가 작동되는 것으로 기준을 삼았다.

고장 발생후 보호설비가 작동하는 동안 시정수가 큰 발전기의 조속기는 신속한 반응이 곤란하므로 조속기의 효과를 고려하지 않고 기계적 입력을 일정하다고 가정한다.[4,5] 또, 각 발전기에 마련된 각종 제어기에 대해서도 단기간 응답이 곤란한 점을 이용하여 제어기의 동적 보상효과와 1-2cycle동안만 작용하는 차과도시정수와 차과도 리액턴스에 포함된 계동권선의 효과도 고려하지 않았다. [5,6]

전력안정화 설비와 연계된 여자기는 계자자속을 신속하게 증가시켜 과도기간 중/후에 유기 기전력을 증가시켜 안정도를 향상시키도록 작동되나, 규제의 관점에서 최적 제어점 설정 등 선로 조건에 따른 현장 tuning을 신뢰할 수 없으므로 이를 무시한다.

이상의 가정을 통해 얻을 수 있는 과도 해석용 발전기 운동방정식은 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_o - \omega = \Delta\omega \tag{1}$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\omega_o}{2H} (P_M - P_E) = \frac{\pi f_o}{H} (P_M - P_E) \tag{2}$$

$$P_E = \frac{E'V}{X_d} \sin\delta \tag{3}$$

여기서,

- H : 동기기 관성정수
- P_M : 원동기의 기계적 출력(일정)
- P_E : 발전기의 전기적 출력
- f_o : 계통의 정격 주파수 (f_o = 2πω_o)

고장 이전의 발전기는 평형상태에 있을 것이므로 발전기의 기계적 출력은 전기적 출력과 같을 것이며, 이는 고장 이전의 조류 계산을 통해 구해지는 발전기의 출력과 같게 된다.

고장 상태가 되면 기계적 출력은 고장 이전의 상태를 계속 유지하고 전기적 출력과 부하각은 미분방정식을 통해 계산되어진다.[2,8]

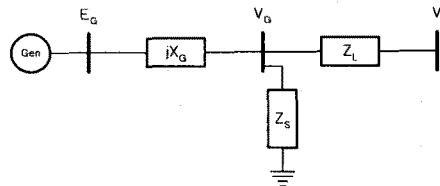


그림 1 발전모선에서의 유기 기전력, 단자전압

그림 1에서 보는바와 같이 발전기는 이상적인 전압원으로서의 유기 기전력과 내부 리액턴스 조합으로 표현되고 발전기 단자전압을 \hat{V}_G 로 표기하였다.

유기 기전력은 초기 조류계산의 결과로부터 아래 식(4)를 이용하여 복소 유기 기전력의 절대 값인 전압크기와

유기전력의 부하각을 초기값 $\delta_0 = \delta_G$ 로 구할 수 있다.

$$\dot{E}_G = \dot{V}_G + j \cdot X_d \cdot \dot{I}_G = |E_G| \angle \delta_G \quad (4)$$

고장상태 및 고장 복구상태에서는 전력 동요 미분방정식에서 Δt 시간 이후의 부하각이 결정되면, 부하각으로 유기전력의 복소값을 다시 계산한다

2.2 전송 선로 및 부하 모델링

부하는 요구 전력을 테브난 등가회로로 보아 어드미턴스 형태로 표현할 수 있으므로 그림 2와 같이 수동 회로망으로 구성한다. 이때 수동 부하 등가 어드미턴스는 아래 (5)식으로 구할 수 있다.

$$y_{Di} = \frac{S_i^*}{V_i^*} \frac{1}{V_i} = \frac{P_i^{spec} - jQ_i^{spec}}{V_i^{*calc}} \frac{1}{V_i^{calc}} = \frac{P_i^{spec} - jQ_i^{spec}}{|V_i^{calc}|^2} \quad (5)$$

여기서 부하 등가 어드미턴스는 어드미턴스 행렬의 대각 요소에만 포함되고, 상점자 spec은 전력조류계산 시 지정값, calc는 부하모선에 대하여 전력조류계산으로 얻은 해이다.

이 때, 발전기 과도 리액턴스도 대각 행렬에 포함시켜 확장 수동 회로망을 구성한다.

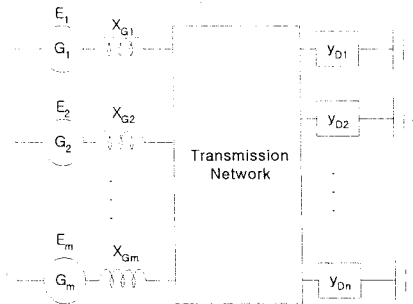


그림 2 부하 등가 어드미턴스

발전기 단자전압 모선과 부하 모선은 모두 등가 어드미턴스로 변환되었기 때문에 수동 선로망 모선에서의 전류(모선에 연결된 모든 선로전류의 합)는 0이다. 다만 발전기만 전류원 I_M 으로 작용하므로, 전체 계통의 전류 방정식은 아래 식(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{MM}] & [Y_{MN}] \\ [Y_{NM}] & [Y_{NN}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_M \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

- M : N모선에 추가된 발전기의 수
- N : 선로망의 모선수

윗 식(6)의 좌하변값이 0인 점을 이용하여 유기전력을 제외한 각 모선의 전압을 소거하여 식(7)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_M &= \{ [Y_{MM}] - [Y_{MN}] \cdot [Y_{NN}]^{-1} \cdot [Y_{NM}] \} \dot{E}_M \\ &= [Y_{reduced}] \cdot \dot{E}_M \end{aligned} \quad (7)$$

3. 사고에 따른 계통의 변화

3.1 3상단락사고

3상 단락사고의 경우 선로의 고장 임피던스는 0이고, 고장 모선은 대지(접지)와 같이 취급된다. 이것은 자기

어드미턴스 항에 무한대(약 10^6 정도)의 Shunt 어드미턴스 값을 반영함으로써 표현된다. 그러면 그 모선의 전압은 거의 0이 된다.[7]

계통에 설치되어 있는 보호 계전기들은 고장을 감지하고 차단기를 동작시켜 고장 선로를 분리하게 되면 고장 모선이 접지에서 비접지로 전환되고, 전압은 다시 회복된다. 여기서 과도안정도를 확인하기 위해 고장 발생으로부터 계통의 보호설비가 작동하여 고장을 분리하는데 까지 소요되는 시간이 짧아짐에 따라 계통의 과도 안정도는 향상되므로, 결국 건설되는 발전소의 보호설비는 과도 안정도가 보장되는 시간 이내에 보호설비가 작동하도록 건설되어야 할 것이다.

3.3 발전기 전기 출력의 변화: 전류 대수 방정식

수동 회로망에 고장이 발생하거나, 차단기가 동작하여 회로망 조건이 변경되면, 수동 회로망의 어드미턴스는 아래 식과 같이 변화된다.

$$[\dot{Y}] = [\dot{Y}_T] + [\dot{Y}_D] + [\dot{Y}_{fault}] \quad (8)$$

여기서, 하첨자 T는 원래 송전망, D는 부하등가회로를, fault는 고장 발생 및 복구 이후의 변화에 대한 값을 의미한다.

계통 어드미턴스가 변화되면, 전류원에 해당하는 발전기 전류는 (7)식과 같은 수동 회로망 선형 대수 방정식으로 구해진다.

발전기의 출력은 앞서 구해진 발전기 복소 전류와 발전기 복소 유기전력을 대입하고 수동 회로망 조건을 적용하여 아래 (9)식으로 구할 수 있다.

$$P_E = \text{Real}(\dot{E}_M \cdot \dot{I}_M^*) \quad (9)$$

4. 과도 안정도 해석 프로그램

4.1 과도안정도 해석 프로그램의 구성

과도안정도 해석을 위한 프로그램은 MS-windows 하에서 수행되도록 Windows기반의 GUI를 채택하여 개발되었다.

프로그램의 각 부분은 객체지향 프로그래밍을 이용하여 모듈화 되어 있어서 향후 다른 프로그램에서의 재사용이 가능하도록 설계되어 있으며 복잡한 대규모의 프로그램에도 손쉽게 적용 가능하여 프로그램의 효용성을 높였고, 각 전력계통 모델을 정확하게 기술할 수 있어 프로그램의 유지보수와 기능개선을 쉽도록 하였다.

입력 데이터는 고장 발생 이전의 초기 조류 계산에 필요한 조류계산 입력 데이터와 고장 발생 후에 고장 계산에 필요한 변동 데이터를 포함하고 있는 입력 데이터 그리고 과도안정도 해석시 운동방정식을 계산하기 위한 발전기 데이터로 구성되어 있으며, 출력은 과도안정도 해석의 결과물로 각 발전기의 부하각, 각속도, 주파수 등 과도 안정도 해석의 확인에 필요한 내용을 데이터로 출력할 수 있게 구성되어 있다.

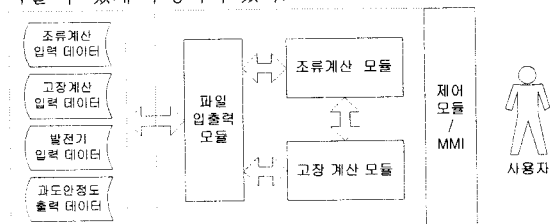


그림 3. 과도안정도 해석 프로그램의 구성 또한 GUI를 이용한 MMI를 적용하여 사용자가 손쉽게

조류계산에 대한 각종 옵션과 과도안정도 해석 조건 등을 대화상자를 이용하여 한 눈에 보고 설정 할 수 있도록 구성하였으며, 출력물은 Excel 표계산 프로그램을 이용하여 확인 할 수 있도록 하였다.

4.2 과도 안정도 해석 절차

그림 4는 프로그램에서 과도안정도 해석을 하는 절차를 보여주고 있다.

해석하고자 하는 대상 자료를 기초로 하여 고장 발생 이전의 정상상태에 대한 초기 전력조류를 계산한다. 전력조류 계산 결과를 이용하여 발전소 모션을 기준으로 하여 부하와 선로를 등가 선로망 어드미턴스로 변화시켜 초기 상태를 설정한 다음, 사고를 상정하여 고장 반영 어드미턴스를 구함으로써 고장 조건을 설정한다.

고장 발생 이후의 고장 계산은 발전기의 전기적 출력을 (5)~(9)식을 이용하여 선형 대수 방정식으로 계산한 후, (1)~(3)식을 이용하여 미분방정식으로 계산하여 발전기의 유기전력 변화를 계산한다. 고장이 복구될 때까지 위의 과정을 반복함으로써 시간 변화에 따른 각 발전기의 상태를 구하고, 보호설비 작동 이후에는 변화된 선로 어드미턴스를 반영하여 필요한 시간 동안 발전기의 상태를 확인한다.

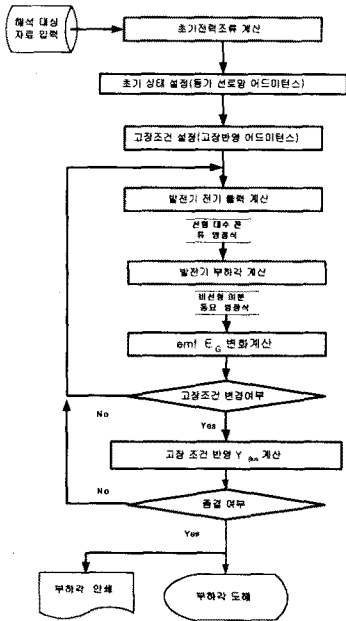


그림 4 과도 안정도 해석 절차

5. 과도안정도 해석 사례 연구

5.1 입력 데이터

개발한 알고리즘을 이용하여 2010년에 예상되는 첨두 부하 실계통을 대상으로 과도안정도 해석을 수행해 보았다. 2010년의 계통은 1057개의 모선으로, 11개의 765kV 모선을 비롯하여 243개의 345kV 모선 등으로 이루어져 있다. 또, 발전모선은 209개, 기준 모선은 삼천포 화력 6호기이고, 지선은 2,193개, 변압기는 410개로 구성되어 있다.

2000년 하계 첨두 부하시 예상 발전량은 60,865MW 및 17,745MVAR이고, 첨두 부하량은 60,042MW 및 27,831MVAR이다. 초기 전력 조류계산 자료 및 조류해는 과도 상태의 초기 입력 값이 된다.

5.2 상정사고 및 해석 결과

다음 표 1과 같은 대용량 조류 및 대용량 원전이 연결되어 있는 3상 선로(circuit)에 대해서 3상 단락사고시 과도 안정도 해석을 수행하였다. 상정사고 1은 765kV의 가장 조류가 큰 선로의 사고이고, 상정사고 2는 765kV의 울진 5,6호기의 2단계 하위 선로 사고이다. 상정사고 3, 4는 각각 고리 5,6호기와 월성 5호기의 스위치 야드에 연결된 선로의 사고이다.

각각의 사고케이스에 대하여 6cycle의 보호설비 작동 시간을 상정하고 과도안정도를 테스트한 결과는 그림 5 ~ 그림 8과 같다.

사고 번호	사고 선로	각 회선당 조류(P+jQ)
1	신서산7-신안성7 (2회선)	1768.4 + j104
2	신태백12-신가평12(2회선)	1335.7 - j70.9
3	고리7 - 북경남7 (2회선)	944.6 + j110.6
4	월성NP#2-신평향3(4회선)	236.2 + j49.5

표 1 조류가 큰 선로들

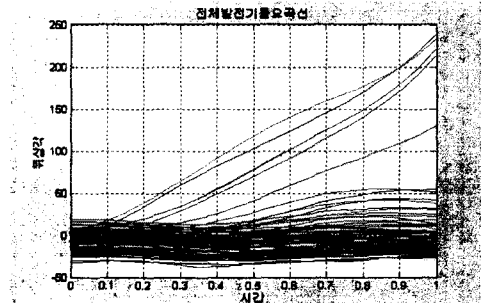


그림 5 사고1의 경우 전체 발전소의 동요 곡선 (2개 회로 고장, 차단시간 0.1초)

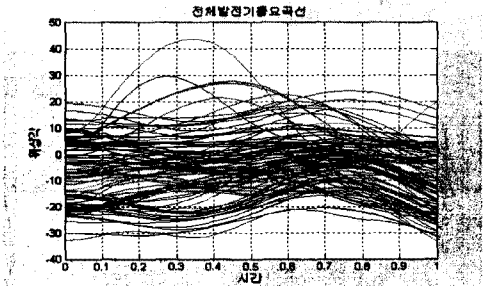


그림 6 사고1의 경우 전체 발전소의 동요 곡선 (1개 회로 고장, 차단시간 0.1초)

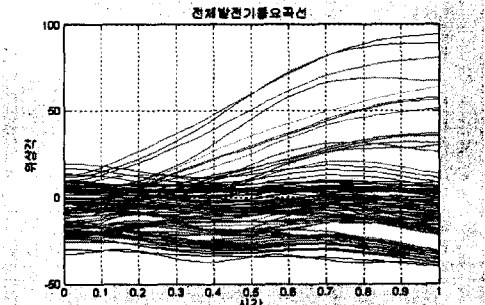


그림 7 사고2의 경우 전체 발전소의 동요 곡선 (2개 회로 고장, 차단시간 0.1초)

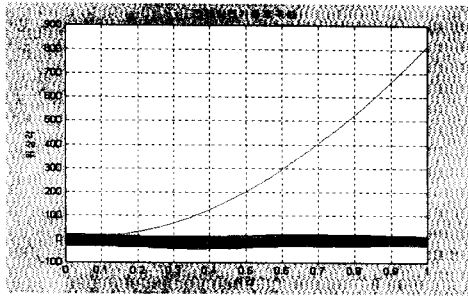


그림 8 사고3의 경우 전체 발전소의 동요 곡선
(2개 회로 고장, 차단시간 0.1초)

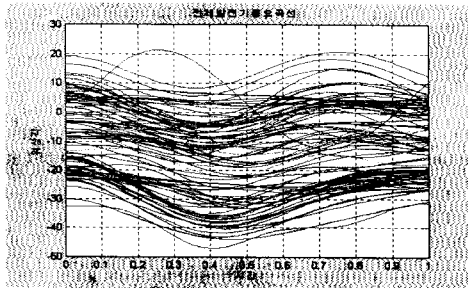


그림 9 사고3의 경우 전체 발전소의 동요 곡선
(1개 회로 고장, 차단시간 0.1초)

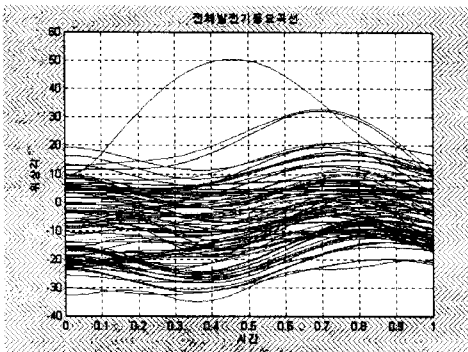


그림 10 사고4의 경우 전체 발전소의 동요 곡선
(3개 회로 고장, 차단시간 0.1초)

전체 계통 중 가장 큰 조류가 흐르는 선로(신서산7 - 신안성7)인 사고 1에서 2개 회로 모두 단락되는 사고가 0.1초 동안 지속되었을 때에는 전체 계통의 발전기 중 일부의 발전기가 탈락되는 현상을 보이고 있다.

사고 3의 경우에는 원전에 연결된 2개의 회로를 모두 고장으로 상정함으로써 원전의 탈락 현상을 보이고 있다. 1개 선로만 단락된 경우에는 과도적으로 안정된 모습을 보인다. 그러나 한 개 송전탑에 2개 이상의 회로를 건설하는 경우가 대부분이므로 이에 대한 대책이 강구되어야 한다고 사료된다.

사고 2,4 및 기타 예시하지 않은 대용량 원전에 대한 상정 사고에도 모든 발전기가 과도적으로 안정함을 보이고 있다. 물론 극단적인 상황을 가정하여 스위치 야드에 연결된 모든 선로의 사고를 상정하지는 않았고, 이러한 경우는 현실적으로 발생하지 않을 것으로 생각된다. 따라서 현재 예정인 대규모 원전은 대용량 송전계통의 사

고에 비교적 강인할 것으로 판단된다.

4 결 론

대용량 선로에 대한 상정 사고의 영향을 평가하여 원전의 안전성을 해석하는 과도안정도 해석 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 2010년도 예상 침투부하에 대하여 과도안정도 평가를 실시하였다. 개발된 프로그램은 PC환경에서 효율적이고 재사용이 간편하도록 객체지향 기법을 적용하여 개발하였다. 보수적 관점에서 발전기를 모델링 하고 계통을 등가 어드미턴스로 모델하여 발전기의 운동방정식에 따른 시간별 변화를 관찰할 수 있도록 하였다.

프로그램의 적용 사례연구를 통해 해석 대상인 대용량 원전 및 765KV의 대용량 조류 선로에 대해 릴레이 계측 시간과 차단기 동작시간을 포함한 0.1초 동안 사고가 발생하였을 때 극단적인 경우인 연결된 회선 전부(2회선)이 단락되는 경우를 제외하고는 고려 대상인 2010년도에 운용될 대용량 원전 계통은 과도적으로 안정함을 확인하였다.

그러나 대용량 조류가 흐르고 있는 선로에 대한 단락 사고는 사고의 규모에 따라 일부 발전기가 탈락하는 현상을 보임을 알 수 있었고 이에 대한 대비가 필요하다고 사료된다.

실제 발전소는 가정에서 제외한 각종 기타 보호설비를 이용하여 보호하므로 문제는 해결될 수 있을것이나, 이는 계통 및 발전기 전체에 대한 충분한 모델링을 필요로 하므로 추후 과제로 남겨둔다.

/참 고 문 헌/

- [1] 주운표, 오성현, 최장흥, 오성균, 김건중 "원전 소의 전력 계통 과도안정도해석 프로그램 개발", 대한 전기학회, 2000년도 추계학술대회 논문집 A, pp 26-28, 2000.11.25
- [2] 주운표, "송전망 계통 과도 안정도의 규제 해석용 프로그램 개발", 충남대학교 전기공학과 2001년도 박사학위 논문, 2001
- [3] Aurthur Bergen and Vijay Vittal, "Power System Analysis", 2nd Ed. Prentice Hall, 2000
- [4] Glenn Stagg and Ahmed El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw Hill, 1968
- [5] Edward Wilson Kimbark "Power System Stability", Reprint, IEEE Press, 1995
- [6] Kundur et al, "Simulation of non-linear dynamic reponse of interconnected synchronous machines, Part I & II", IEEE Trans., PAS, Vol. 91, p.2069-2077, 1972
- [7] C. Concordia and S. Ihara, "Load Representation in Power Stability Studies" IEEE Trans. VOL. PAS-101, p.969-977, 1982
- [8] William H Press, Saul Teukolsky, et al, "Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing," 2nd Ed, Cambridge Univ. Press, 1992