

765 kV 송전계통의 안정도 분석

오 태 규*

(*한국전기연구소 전력계통연구부장)

1. 서 론

최근 우리나라의 경제 규모의 확대와 국민소득 증대에 따른 생활수준의 향상과 정보화 사회로의 진전에 따라 전력수요는 급신장 추세에 있으며, 특히 금년과 같은 특이 기상조건이 부가되었을 때 전기에너지 수요는 예측과 전망에 따른 계통규모의 확충과 보강 계획을 앞질러 안정적 전력공급에 커다란 압박요인으로 부각되고 있다. 또한 우리나라는 인구밀도가 높고 도시화 및 산업화가 빠른 속도로 진행되면서 수도권과 산업단지를 중심으로 전력 부하가 성장하는 반면 이지역에서 전력수송 설비 확충은 여러가지 이유로 늦어지면서 건설기간 역시 점점 발전설비 건설에 소요되는 기간에 근접하거나 상회하게 될 것으로 전망되고 있다.

전원설비 역시 여러가지 이유로 단위기 규모의 증대, 대규모 단지화 등이 가속화될 것으로 전망되어 경제적이고 안정적인 전력수송을 위해 765 kV 계통도입이 결정되어 2000년대 초 운전을 목표로 격상사업이 활발히 추진되고 있다. 765 kV 송전선로는 송전용량면에서 기존의 345 kV 선로에 비해 써 어지 임피던스 레벨(SIL)을 기준으로 비교하면 약 4.7 배 그리고 열용량을 기준으로 비교하면 약 3.5배[1] 증대되어 상당히 능률적인 전력수송 수단임에 틀림없다. 따라서 수송능력이 큰 만큼 전력계의 안정운용 측면에서 높은 공급신뢰도를 절대적으로 요구한다.

그러나 765 kV 계통에 영향을 주는 사고에 의해 계통이 입계되는 충격 역시 크게되어 이에 대한 검토와 대비가 대단히 중요하게 된다. 즉 765 kV 계통의 사고에 따른 하위계통의 병목현상에 대한 대비와 안정도 확보는 전계통의 안정운용에 대단히 중요하게 된다[2]. 본 고에서는 765 kV 계통구성에 따르는 계통안정도문제에 대해 실무와 학술의 중간적인 시각에서 살펴보고자 한다.

2. 전력계통의 안정도 문제와 해석 기법

전력계통의 구성이 장거리 대전력 수송을 위한 電源線과 공급신뢰도 향상을 위한 連繫線의 유기적인 연계로 환상망 형태로 성장 발전하면서 계통의 동특성 해석이 복잡해지고 컴퓨터기술, 전력전자 및 전력통신등을 이용한 계통제어 수단이 복잡고도화 되면서 해석이론과 기법이 고도화 되고 있다.

모든 시스템은 예상가능한 운전조건에서 안정하도록 설계, 건설 및 운용된다. 현대 전력계통은 원래 의도한 바와는 다르게 가장 복잡하고 거대한 비선형 시스템으로 성장 발전하고 있으며 이러한 추세는 분산전원의 도입, 민자발전등 소위 NUG (Non-Utility Generation) 등으로 갈수록 심화될 전망이다. 즉 전력계통 해석 및 제어 문제의 핵심은 비선형 대규모 시스템 해석 및 제어 문제로 귀착된다. 최근의 전력계통 안정도 분야 연구는 전기기계적(Electromechanical)인 동특성 해석문제에서 전

압안정도 해석, 그리고 이들을 종합적으로 해석하려는 접근방법을 대상으로 발전하고있다[3,4,5]. 여기서는 전기기계적인 동특성 문제에 대해 중점적으로 살펴보기로한다.

안정도 문제는 관심의 대상이되는 사고의 크기, 해석시간영역, 수학적 정식화 방법등에 따라 구분되나 IEEE 기준[6]에 따르면 과도안정도(Transient stability)와 정태안정도(Steady state stability)로 크게 나누어 진다.

과도 안정도 해석은 평형을 이루어 정상상태에서 운전하고 있는 계통에 전기적 단락사고, 주요 송전선로의 개폐, 혹은 발전 및 부하의 급변동등과 같은 큰 규모의 외란이 발생하면 이에따른 계통응동은 필연적으로 진동형태로 나타나고, 이러한 계통 진동이 동기 탈조와 같은 사고로 진전하느냐 아니면 진동이 억제 감쇠 되어 새로운 안정 운전 평형점으로 정착되느냐 하는 문제를 대상으로한다. 즉 과도안정도는 계통의 동기화력(synchronizing power)에 관한 문제를 주로 다룬다. 과도 안정도 문제는 주로 시간 모의에 의한 컴퓨터 시뮬레이션 방법으로 해석하나 직접법에의한 안정여유도와 계통 분리성향 분석기법이 개발되어 실용화 단계에 있다.

한편 정상상태 안정도는 수시로 그러나 서서히 발생하는 발전 및 부하의 변동등 비교적 소규모의 외란과 과도 안정도문제에 부수적으로 따르는 계통동요의 감쇠에 필요한 계통의 제동 감쇄 능력(system damping capability)에 관한 문제를 주 대상으로 한다. 정상상태 안정도 해석은 계통을 관심이 되는 운전점 부근에서 선형화 하여 주로 고유치 계산에 의해 안정도와 계통제동능력(system damping)을 분석하고 효과적인 제어 수단과 이러한 제어수단의 설치지점에 대해 검토한다.

3. 실계통 분석 사례 연구

3.1. 검토 배경

765kV 송압이 결정된 후 격상사업을 효과적이고 능률적으로 추진하기 위해 765kV 송전기술에 관한 연구개발이 전기환경장해 대책 마련, 절연 설계 및 협조,보호 계전방식 검토, 급구류 및 기차재 개발등 여러 분야에서 진행되고 있다. 또한 향후 계통 특성

에 관련된 765kV 설비 규격 결정에 관한 연구가 계획검토되고 있다. 이와 같은 여건에서 안정도 검토는 765kV 계통 구성 및 운전에 대한 자료가 비교적 구체적으로 제시되고있는 2006년 계통을 대상으로 하였다.

참고문헌[1]에서는 765kV 계통 도입의 타당성 분석측면에서 다양한 전원입지 시나리오에 따라 수많은 계통구성 대안에 대한 계통 특성 해석을 실시하였고 안정도 분석은 주어진 계통여건과 상정사고에 대해 과도안정여부 판정만을 주 대상으로 하였으며 정상상태 안정도와 같은 문제는 필요시 안정화 대책과 같은 수단으로 대처하는 것을 원칙으로 하여 깊이 있게 다루지는 못하였다.

3.2 검토 대상 계통

검토 대상으로한 2006년 계통의 조건을 정리하면 표 1과 같다.

이때 신태백 - 신양평 간 765kV 선로의 조류는 회선당 2,023MW 즉 루트로 4,046MW의 전력조류가 흐르는데 이는 전체 부하의 약 8.6% 수준의 크기이다.

3.3 안정도 계산

본 고에서는 전체 계통으로서의 안정도 보다는 765kV 선로부근에 발생하는 상정사고에 대한 안정도 문제에 주안점을 두고 검토하였다. 2006년 계통에는 표1에 기술한 바와 같이 2 루트의 765kV 선로

표 1. 검토 대상 계통 조건

부 하	47,035 MW
발 전	47,653MW(총 95 기)
모선/선로 수	713/1622(154 kV 이상)
765 kV 선로	신태백-신양평 (161 KM, 1 ROUTE) 동해남부-신태백 (40 KM, 1 ROUTE) 신당진-남서울 (124 KM, 1 ROUTE) 당진 T/P-신당진 (40 KM, 1 ROUTE)
765 kV 선로 데이터	선로 : ACSR 483mm ² × 6B 0.0111 + j0.3136 [ohm/kM] 0.01392[μF/kM] 변압기 용량 : 2000 MW/unit % IMP : 15[%]

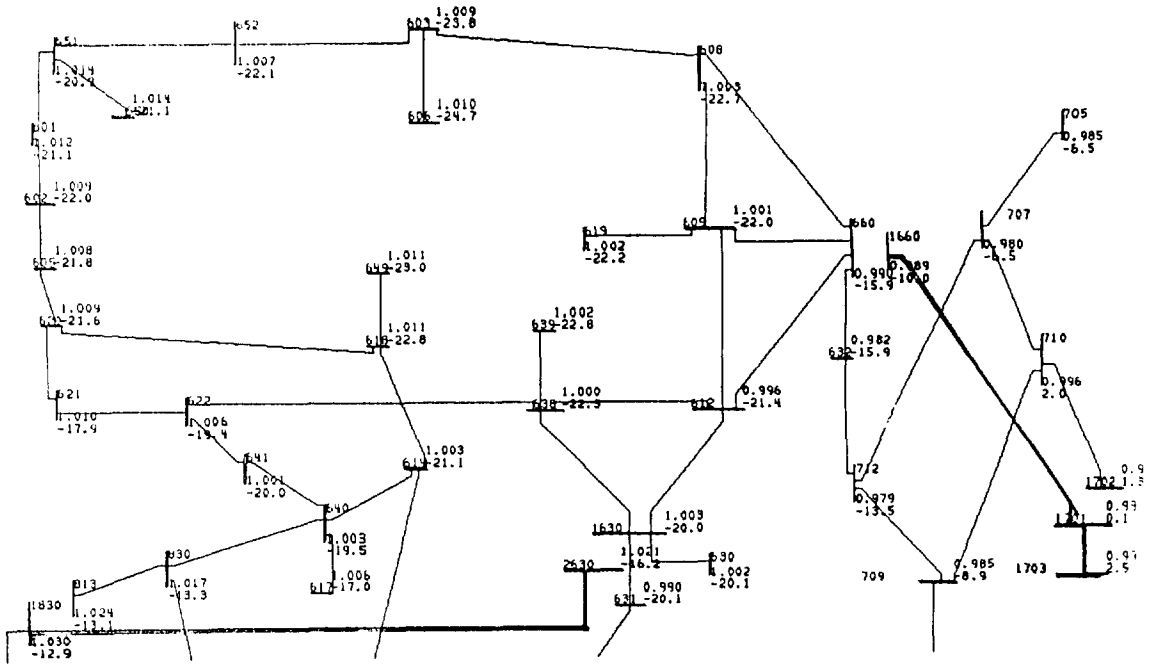


그림 1. 765kV 선로부근의 계통도 (345kV 이상)

가 있으나 계통에 주는 충격측면과 지면의 제약을 고려하여 신태백 - 신양평 간의 선로에 대한 상정 사고 해석에 대해 중점적으로 기술하고자 한다.

345kV 선로의 고장제거 시간이 6 Hz(0.1 Sec) 인데 비해 765kV 선로의 고장제거 시간은 4 Hz(0.0666 Sec) 이다. 이는 765kV 선로의 중요도를 고려하여 고장제거시간을 짧게하여 안정도를 향상 시키기위함이다.

그림 1은 신태백(모선 번호 1701) - 신양평(모선 번호 1660) 간의 765kV 선로 부근의 345kV 선로이상의 계통도이다. 모선 710은 중요한 발전 모선이며 345kV 모선 1702는 연계 변압기를 통해 765kV 모선 1701에 연계되어있다.

CASE 1 :

모선 1701부근의 3상 단락사고에 대해 루트단 사고로 0.0666초에 고장제거시 모선 1703에 접속된 발전기 군과 모선 710에 접속된 발전기 군이 계통으로부터 탈조 분리한다. 즉 765kV 선로 루트단 사고는 과도 안정도 분체가 심각하고 모선 710에 접속된 발전기와 COHERENCY현상을 보인다. 역

으로 710모선 근방에 발생하는 사고에 대해서도 모선 710발전기 군과 모선 1703발전기 군이 동일한 불안정 모드를 보인다. 다시말하면 모선 710발전기 군이 불안정하게 되면 모선 1703발전기 군 역시 불안정하게 된다. 이 경우는 부하제한과 발전차단의 계통안정화제어로 탈조 방지가 가능하나 적용 Scheme과 제어전략에 대한 검토는 별도로이루어 져야 한다.

CASE 2 :

모선 1701부근과 모선 710부근의 3상 단락사고에 대해 1회선 사고로 0.0666초에 고장 제거시 모두 탈조하지 아니하고 안정한 응답 특성을 나타내었다. 안정도 검토는 최악조건 검토(worst case study)라고는 하나 765kV 선로의 루트단 사고는 대단히 엄격한 상정사고인데 반해 1회선 사고는 비교적 발생 빈도가 높다고 여겨져 이에 대해 좀더 살펴보기로 한다.

먼저 1회선 사고시 재폐로효과와 아울러 system damping에 대해 살펴보기위해 다음 3 가지의 경우의 안정도 검토를 하였다.

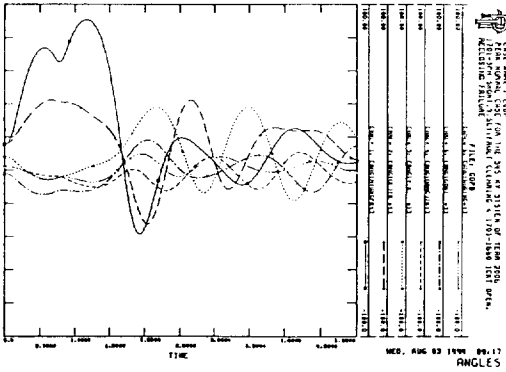


그림 2. 1회선 사고, 재폐로 실패, 9.5 Hz 제거, 임계안정

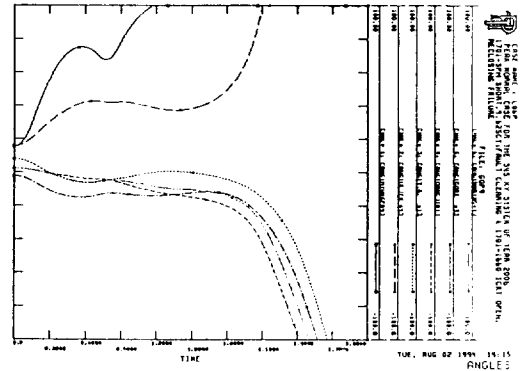


그림 3. 1회선사고, 재폐로 실패, 9.625 Hz 제거, 임계불안정

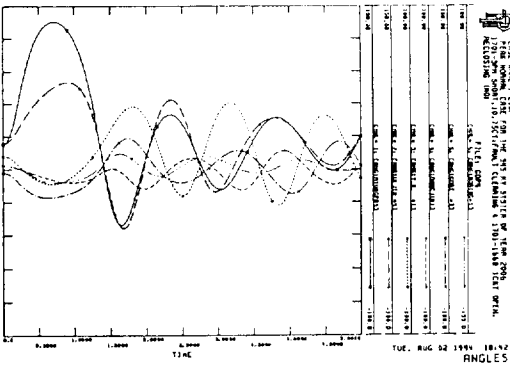


그림 4. 1회선사고, 재폐로 불고려, 10.75 Hz 제거, 임계안정

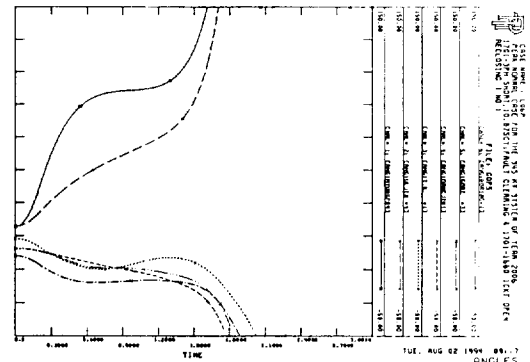


그림 5. 1회선사고, 재폐로 불고려 10.875 Hz 제거, 임계불안정

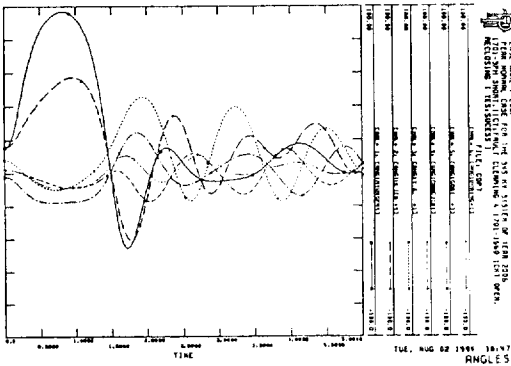


그림 6. 1회선사고, 재폐로 성공, 11 Hz 제거, 임계안정

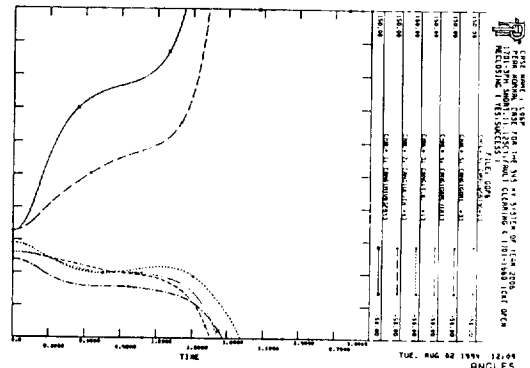


그림 7. 1회선사고, 재폐로 불고려 11.125 Hz 제거, 임계불안정

CASE 2-1 :

재폐로가 실패한 경우. 이때 재폐로는 고장제거 후 33 Hz에 적용하였다. 그림 2는 9.5Hz에 고장을 제거한 임계안정(critically stable)한 계통응답을

5초간 보여주는 것이고, 그림 3은 9.625Hz에 고장을 제거한 임계 불안정(critically unstable)한 계통응답을 3초 정도 보여주는 것이다.

CASE 2-2 :

재폐로를 고려하지 아니한 경우. 그림 4는 10.75 Hz에 고장을 제거한 임계안정(critically stable)한 계통응답을 5초간 보여 주는 것이고, 그림 5는 10.875Hz에 고장을 제거한 임계 불안정(critically unstable)한 계통응답을 3초 정도 보여주는 것이다.

CASE 2-3 :

재폐로가 성공한 경우. 그림 6은 고장을 11 Hz에 제거한 임계안정(critically stable)한 계통응답을 5초간 보여주는 것이고, 그림 7은 고장을 11.125 Hz에 제거한 임계 불안정(critically unstable)한 계통응답을 3초 정도 보여주는 것이다.

앞서 3CASE Study의 경우 재폐로 실패의 경우 임계안정 고장 제거 시간이 9.5Hz이었고 재폐로 성공시의 임계고장시간이 11Hz로 약 1.5Hz, 0.025초 정도 안정 여유도가 증가한다.

다음으로는 고장제거시간을 9.5Hz에 고정시키고

선로 조류를 증가 시켜 불안정하게 되는 최대 조류 증분을 검토하였다.

CASE 2-4 :

재폐로를 고려하지 아니한 경우. 그림 8은 240 MW증분시의 임계안정한 응답을 그림 9는 250 MW를 증분시켰을 경우의 임계불안정한 응답을 보여준다.

CASE 2-5 :

재폐로 성공한 경우. 그림 10은 270MW증분시의 임계안정한 응답을, 그림 11은 280MW증분시의 임계 불안정한 응답을 보여주는 것이다.

임계 안정한 응답과 임계 불안정한 응답을 포함한 모든 응답특성을 살펴보면 모선 1703발전기 군과 모선 710발전기 군이 동일한 불안정 모드를 나타내고 있으며, 그림 2와 3에서는 모선 1703발전기

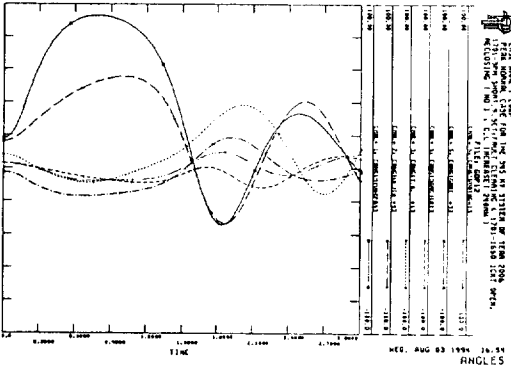


그림 8. 1회선사고, 9.5 Hz 제거, 240MW증가 임계안정, 재폐로 아니함

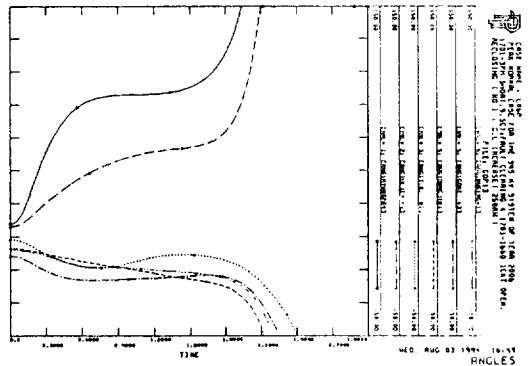


그림 9. 1회선사고, 9.5 Hz 제거, 250MW 증가 임계불안정, 재폐로 아니함

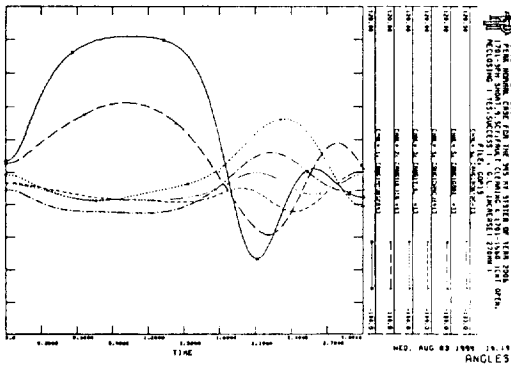


그림10. 1회선사고, 9.5 Hz제거, 270MW증가 임계안정, 재폐로 고려

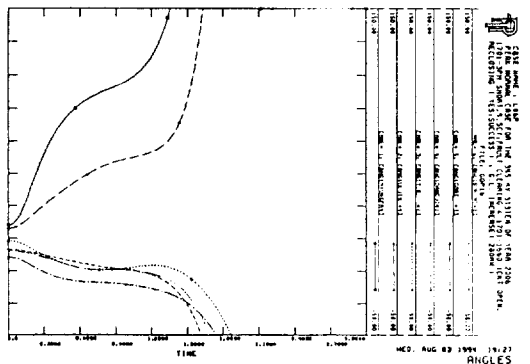


그림11. 1회선사고, 9.5 Hz 제거, 280MW증가 임계불안정, 재폐로 고려

군의 응답이 마치 소위 First Swing에서는 안정한 듯하다 불안정해지는 형태를 나타냈으며, 4,000 MW이상의 비교적 높은 조류 레벨에서 임계고장 제거 시간이 0.15초 이상으로 비교적 여유가 있었다. 또한 5초간의 비교적 긴 시간 동안의 응답에서도 상당히 큰 진동의 폭이 약 2초 정도의 주기로 동요하는 것을 보여준다.

또한 고장 제거 시간을 0.02에서 0.025초 정도 단축 시킴으로서 240MW에서 270MW이상의 송전 용량을 증대시킬 수가 있었다. 이상의 관찰로부터 우리는 다음과 같은 결론을 추론할 수가 있다.

우리 나라 계통은 그 구성상의 특징으로 즉 환상망적 연계로 비교적 충분한 동기화력(Synchronizing Power)을 보유한 과도 안정도 측면에서는 강인한 계통이나 계통 제동 감쇄(System Damping)능력이 부족하여 동요의 폭과 지속시간이 긴 특징을 갖고있다.

계통규모가 커질수록 제동감쇄가 계통의 안정운용에 더욱 중요해지고 있으므로 이에 대한 상세한 분석과 제어 전략 수립이 요구된다 하겠다.

4. 결론 및 토의

본 고에서는 765kV송전 계통의 도입에 따른 우리나라 2006년 계통에서 전력조류 크기가 큰 신태백 - 신양평 간의 765kV선로 부근에 3상 단락 사고가 발생하였을 때를 상정하여 계통의 과도 안정도를 분석하였으며, 임계고장 제거시간의 계산과 고장제거 시간 변화에 따른 송전 용량 증분 계산과 각각의 계통 응답 특성 검토로부터 정상상태 안정도를 정성적으로 추론하는 것을 시도하였다. 앞으로는 최신 해석 도구를 충분히 활용하여 구체적인 결과를 도출하도록 하겠다. 지금까지 검토한 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 모선 1703발전기 군과 모선 710발전기 군은 동일한 불안정 모드 즉 어느 한쪽이 계통으로부터 분리되려 할때 다른 한쪽을 끌고 가려하는 경향이 크다.
- 모선 1703발전기 군과 모선 710발전기 군은 검토한 상정사고에 대해 Coherency 경향이크다.
- 우리나라 계통의 동기화력(Synchronizing Power)은 비교적 충분하여 과도 안정도에서

는 비교적 큰 안정 여유도를 보여 주고있으나 계통 제동 능력(System Damping Capability)는 상당히 낮을 것으로 추론된다. 따라서 SVC 등과 같은 Damping Source 를 공급하여 제동 능력을 향상 시키는 등 제어 전략에 대한 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 한전 전원계획처 연구보고서, '향후 대전력 수송을 위한 장기계통 구상대책에 관한 연구', 1991
- [2] EPRI Red Book, Transmission Line Reference Book
- [3] Proceedings of the International Symposium on Power System Stability, May, 1985, Iowa State University.
- [4] 일본 전기협동 연구보고서, 전력계통 안정도, 제 34 권 제 5 호, 1979년
- [5] 일본 전기협동 연구보고서, 전력계통안정운용 기술, 제 47 권 제 1 호
- [6] IEEE Committee Report, 'Proposed Terms and Definitions For Power System Stability', PAS-101 (1982) : 1894-1898



오태규(吳泰圭)

1951년 4월 30일 생. 1978년 서울대학교 공과대학 공업교육과 졸업. 1984년 Iowa 주립대 대학원 졸업 (공학석사). 1986년 동 대학원 졸업 (공학박사). 1978~1982년 현대건설 근무 1991~1992년 Pennsylvania 주립대 Visiting Scholar 현재 한국전기연구소 전력계통연구부장