

연계된 계통에서 예상되는 문제점

권 세 혁 (고려대학교 전기공학과)

Operational Problems Expected in Interconnected Power Systems

Kwon, Sae-Hyuk (Korea University)

Abstract

Political situations of Korean Peninsula has been changing dramatically in recent years. Interconnected power system operation between South and North Korea should be taken into considerations. This paper discusses several expected operational problems in interconnected systems through literature study. Typical references in automatic generation control area are listed and recommended to read through.

1. 서론

근래 소련연방의 붕괴와 동구 공산주의의 몰락, 그리고 중국의 개방정책으로 서방국가들과의 활발한 수교를 하는등, 급격한 정치상황의 변화에 따라 남북한의 통일문제도 점차 구체화되어가고 있는듯하다. 기간 언론보도에도 남북한의 철도연결문제 및 전력계통 연계문제등이 다루어지고 있다.

만약 남북한의 계통이 한개의 계통으로 운용되는 경우 한 국전력공사의 급전지령실의 자동발전제어(Automatic Generation Control : AGC)의 방침은 어떻게 달라져야할지, 또한 어떤 문제점이 예상되는지 대단히 궁금한 문제이다. 실제 계통연계가 언제 될지는 아무도 정확한 예측은 할수 없겠지만, 이에 대비한 이론적인 연구는 미리부터 진행하여 결과를 축적하고 관계전문가를 양성함으로써 미래의 연계계통운전(Interconnected System Operation)에 대비해야 할 것으로 생각된다.

북미계통은 여러개의 전력회사가 연계된 인류역사상 가장 방대한 계통중의 하나이다. 따라서 연계계통으로서의 운용경험 및 자료, 연구실적 및 이론적 배경 연구등에서 관련 문헌이 풍부하다. 대전력계통의 연계운전의 제반 동작원리를 문헌조사를 통하여 제시하고, 이 분야의 참고문헌을 체계적으로 정리하여 목록을 제시함으로써, 연계운전에 관심이 있는 분들에게 도움이 되고자 한다.

2. 연계운전에 필요한 용어의 정의

연계운전을 하는 가장 큰 목적은 (1)정전없는 전력공급 및 (2)경제적인 전력생산 일 것이다. 정상적인 연계운전의 경우 연계된 지역들은 발전 및 부하를 서로 나누게된다. 인접된 전력회사들간의 용량전력을 잘 계획하여 부하특성의 차이 및 열가의 발전기등을 최대한 이용할 수 있도록 한다. 그렇게 함으로서 전체 운용비용을 줄이고, 신규 발전소에 대한 투자를 유예할 수 있는등 경제적인 전력생산이 가능토록 하자는 것이다. 비상시는 각 지역의 예비력(Spinning reserve capacity)을 나눔으로서 정전없는 전력공급이 가능하도록 하자는 것이다.

연계계통은 단일지역형(Single area type) 및 복수지역형(Multiple area type)으로 나눌 수 있는데 수용가의 부하변동을 흡수함에 관한 기본운용방침에 따라 분류된다. 연계계통은 연계된 계통전체를 말하며 회로망내에 연결된 모든 전력회사 또는 전력회사群(모든 발전기群 및 부하群)을 포함한다. 문맥상 모든것이 분명할 경우에는 계통이라고 표현한다.

지역(Area)은 자체부하변동을 흡수하도록 되어있는 연계계통의 일부를 말한다. 지역은 자체부하변동에 응답하는 단일 전력회사일 수도 있고, 단일전력회사내의 특정지역의 부하변동에 응답하는 회사계통의 일부일수도 있다. 또한 여러개 전력회사가 하나의 풀(Pool)을 이루어 이들 집합체의 경계내의 어느곳에서 일어나는 부하변동이라도 흡수하는 경우 이들 전력회사群이 지역이 된다.

단일지역 연계계통(Single area interconnected system)은 부하변동이 계통의 어느곳에서 일어나든지 계통전체가 흡수하는 계통을 말한다. 부하변동은 계통내에서 그 특정시간에 사용되고있는 급전방식에 의거 흡수된다. 계통내에서 발전기 출력을 조절하여 자체 부하변동을 흡수하는 계통의 일부는 존재하지 않는다. 그러므로 연계선전력조류는 계획치를 잡지 도 또한 계획하지도 않는다. 동의어로 단일지역계통(Single area system)이라고도 한다.

다수지역 연계계통(Multiple area interconnected system)은 여러개의 운용지역으로 구성되어 각 지역이 발전출력을 조절하되 자체내의 부하변동을 흡수하도록 되어있는 계통이다. 지역간 연계선전력조류를 계획하고 또한 유지하도록 한다. 동의어로 다수지역계통(Multiple area system)이라고도 한다.

3. 연계계통의 표현

그림 1은 연계계통내에서 몇개 회사가 서로 연계된 것을 보인다. 물론 회사간 여러개의 연계선이 있겠지만 간략화하기로 한다. 각 회사는 자체부하(L로 표현)를 갖고 있는데 이는 지역내 모든 부하의 집합체이다. 각 회사는 G 및 G'라고 표현된 발전전원이 있으며 이는 회사지역내 모든 발전전원을 표시한다. 각 회사는 두 이웃계통과 연계선으로 연결되어 있는데 이 연계선은 그 이웃과 연결된 모든 송전선을 대표한 것이다.

그림 2는 절선의 원으로 보인 것같이 전체 전력회사가 단일지역계통으로 운용되고 있는 경우이다. 회사간 연계선전력조류는 송전선의 최대전력송범위내에 있는한 전혀 문제시할 것이 없다. 계통내에서 발생한 부하변동은, 어디에서 발생했든간에, 현행 계통 전반적인 급전프로그램에 의거 책임 지게 된다. 어떤 회사라도 다른 회사의 부하변동을 흡수하도록 되게 될 것이다.

그림 3은 5개 회사가 각각 별개의 지역으로 독립적으로 운용되는 다수지역계통을 보인 것이다. 그림에서 5개의 별개의 절선의 원으로 이를 표시하였다. 특정지역에서 부하변동이 있을 경우, 바로 그 지역이 발전기 출력을 조절하여 부하변동에 대처하게 된다. 이 경우 5개 지역간 연계선(T라고 표시되어 있음)의 전력조류는 대단히 중요하고 어떤 특정값으로 계획되어야 한다.

그림 4는 다수지역계통의 다른 예를 보인 것이다. 전력회사 A, B, C, 및 E가 풀을 만들어 단일지역으로 운용되고 있다. 전력회사 D는 다른지역으로 독립적으로 운용되고 있다. 전체연계계통에는 두개의 운용지역이 있으며 이를 절선으로 표시하였다. 연계선중에서 이들 두개 인접지역의 연계선에 흐르는 전력조류 Tcd 및 Tde가 지금은 중요하며, 계획되는 동시에 조절되어야 한다.

연계계통 논의에서 가장 큰 문제는 위에서 여러개의 경우를 보였지만 "어떤 형태의 계통운용을 할 것인가?"가 될 것이다. 보다 더 미래의 일일지도 모르지만 만주 전력계통 및 독립국가연합 극동계통과의 연계문제도 고려에 넣어야 되지 않을까 생각된다.

연계에 따른 책임

연계운전의 장점을 서로 나눌 수 있는 반면에 각 참가지역은 책임도 서로 분담할 것이 요망된다. 연계운전의 정해진 방침에 맞도록 계통조절에 협조해서 원활하고, 이웃 또는 상호간에 이익을 주는 운용이 될 수 있도록 하여야 한다.

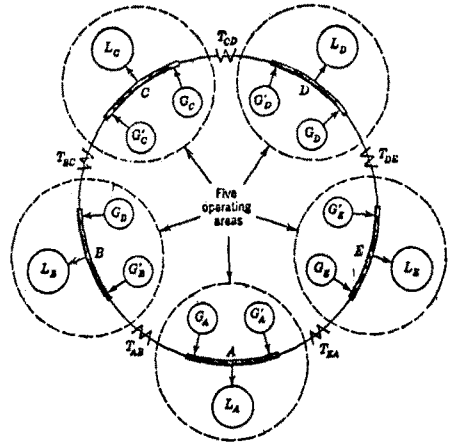


그림 3. 다수지역계통으로서의 연계계통운용(5개 지역)

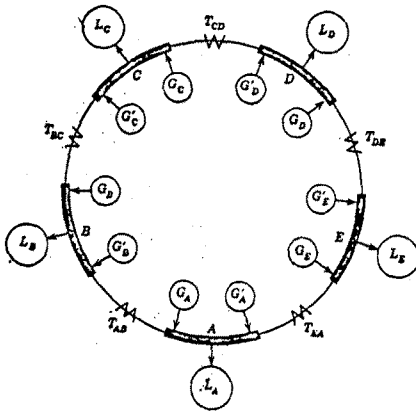


그림 1. 연계계통의 도식적 표현

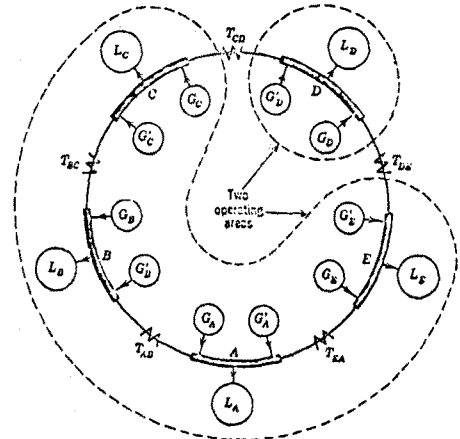


그림 4. 다수지역계통으로서의 연계계통운용(2개 지역)

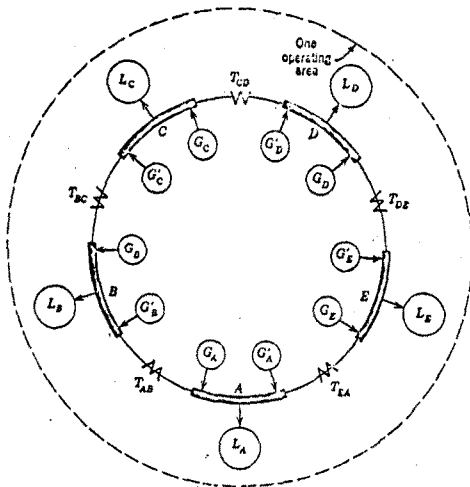


그림 2. 단일지역계통으로서의 연계계통운전

4. 연계계통의 발전제어문제

연계계통의 발전제어문제를 단일지역계통 및 다수지역 계통으로 나누어서 생각하여 그 해결책을 찾는 단계를 단일지역계통의 경우는 두개의 단계로, 다수지역계통의 경우는 세개의 단계로 나누었다. (표 1)

단일지역계통 또는 다수지역계통에 있어서 1단계 즉 계통의 총부하에 맞도록 계통의 총발전기출력을 조절함으로써 계통주파수를 변하지 않도록 할 수 있다. 주파수는 반드시 60Hz로 정한 것이 아니라, 60Hz와 다른 값이더라도 불변주파수가 되도록 하여야 한다. 즉 주파수가 증가하거나 감소하지 않아야 한다는 뜻이다.

단일지역계통내의 2단계, 또는 다수지역계통의 3단계는 최적비용으로 주어진 총발전기출력을 내도록 계통전원사이에 출력을 분배하는 소위 경제급전(Economy dispatch)을 말한다. 다수지역계통의 2단계는 단일지역계통의 경우에는 없는 것으로서 각 지역이 그 지역경계내에서 일어나는 부하변동을 책임지고 흡수한다는 것이다. 지역 총발전기출력은 지역의 총부하의 변화에 따라 변화하게 될 것이다. 이 두개의 양은 같지 않을 수도 있다. 즉 지역과 여타지역간의 현행 용동전력계획치에 해당하는 정해진 양만큼 차이가 날 수 있다. 용동전력을 계획치로 유지한다는 것이 지역발전출력을 그 지역 자체의 부하의 변동을 따라잡도록 조절할 수 있는 기준이 된다.

표1. 연계계통의 발전제어문제 [1]

단일지역계통	다수지역계통
<p>1단계</p> <p>목표: 계통의 총발전력을 총부하와 일치하도록 한다.</p> <p>정의: 계통조정(System governing)</p> <p>기준: 계통주파수는 불변 성취수단: 자연제어(Natural regulation)</p>	<p>1단계</p> <p>목표: 계통의 총발전력을 총부하와 일치하도록 한다.</p> <p>정의: 계통조정(System governing)</p> <p>기준: 계통주파수는 불변 성취수단: 자연제어(Natural regulation)</p>
<p>2단계</p> <p>목표: 지역의 총발전력을 최적경계가 되도록 지역전원간 배분함</p> <p>정의: 경제급전(Economy dispatch)</p> <p>기준: 각 전원의 발전능력 의 증분비용이 같게 되도록 함</p> <p>성취수단: 계산 및 제어계통</p>	<p>2단계</p> <p>목표: 계통의 총발전력을 지역간 분배하되 각지역이 자체부하변동을 추종함으로써 주파수 제어때 자기 몫을 할 수 있도록, 즉 각지역의 총발전력이(총지역 부하 + 계획된 지역간의 총용량전력)과 같게 되도록 배분한다.</p> <p>정의: 지역제어</p> <p>기준: 지역의 총용량전력이 계획된 전력값과 같은가? 즉 지역요구 전력이 영으로 되었는가?</p> <p>성취수단: 연계선편기제어 (Net interchange tie-line bias control)</p>
<p>3단계</p> <p>목표: 지역의 총발전력을 최적경계가 되도록 지역전원간 배분함</p> <p>정의: 경제급전(Economy dispatch)</p> <p>기준: 각 전원의 발전능력 의 증분비용이 같게 되도록 함</p> <p>성취수단: 계산 및 제어계통</p>	<p>3단계</p> <p>목표: 지역의 총발전력을 최적경계가 되도록 지역전원간 배분함</p> <p>정의: 경제급전(Economy dispatch)</p> <p>기준: 각 전원의 발전능력 의 증분비용이 같게 되도록 함</p> <p>성취수단: 계산 및 제어계통</p>

$$ACE_i = \Delta T_i - 10B_i \Delta f \quad (1)$$

여기서,

ACE_i는 지역 i의 지역제어오차(Mw)
 ΔT_i 는 $(T_i - T_{0i})$, T_i 는 실제의 연계선조류의 총화(Mw)이고 T_{0i} 는 계획된 연계선조류의 총화(Mw)
 B_i 는 지역i의 주파수편기치(Mw/1Hz)이며 항상 음수이다.
 Δf 는 $(F - F_0)$, F는 계통주파수(Hz)이고 F_0 는 계획된 계통주파수(Hz)

각 지역제어기는 자동적으로 발전량을 조절하여 ACE를 얻으로 하도록 되어있다. 계통주파수가 계획치와 같을때는 각 지역의 주파수편기전력(-10B_iΔf)은 영이다. 각 지역은 이웃 계통과의 연계선 전력조류의 합을 계획치로 유지하도록 되어 있으므로 자체지역내 부하변동을 흡수하게 된다. 그러므로 각 지역은 계통주파수를 계획치로 유지하도록 하는 동시에 자체지역 부하변동을 흡수하는 조절책임을 가지게 된다.

만약 한개 또는 여러개 지역이 각자의 책임을 다하지 못하면 계통주파수는 계획치에서 벗어나게 된다. 다른 지역의 연계선 조류의 총화의 계획치는 각각의 주파수편기전력만큼 조절된다. 다른 지역들은 그들 자체의 연계선 조류의 총화를 조정된 계획치로 유지하도록 하여야 하며 그럼으로써 사정이 어려운 지역을 돕고 계통주파수를 복구하는데 도움을 주게 된다. 이와 같은 지역간 상부상조의 개념이 연계계통의 연계선 편기제어의 계획된 장점이다. 연계계통내 각 지역이 이러한 제어를 하도록 하는 권장사항이 표 2의 NERC-OC 운용지침(Operating Guide)에 정리되어 있다. NERC는 북미전기신뢰성 위원회(North-American Electric Reliability Council)의 약자이며 OC는 운용위원회(Operation Committee)를 의미한다. 이 매뉴얼은 각 지역전기회사들의 다년간의 연계계통운용의 경험에서 우리나라의 것이므로 남북전력담당자들이 이들 내용을 숙지하고 검토되어야 될 것으로 생각한다. 즉 운용지침체 전문제도 중요한 현안중의 하나일 것이다.

각 지역은 다음 중의 하나 또는 여러개의 이유로 효과적인 제어를 할 수 없을 때가 있다. 즉 주파수가 정상일때 연계선 조류를 계획치로 유지할 수 없거나 계획된대로 주파수편기시의 도움을 주지 못하는 경우이다.

1. 주파수 및 연계선 전력조류 측정오차
2. 주파수 및 연계선 전력 설정시의 오차 또는 오프셋
3. 제어계통이 부적절하거나 원격통신채널이 부적절한 경우 그리고
4. 발전제어기능을 할 수 있는 발전기 또는 전원이 없거나 지정할 수 없는 경우

이러한 상황을 지역제어결핍(Area regulating deficiencies)이라고 한다. 원활한 연계운전이 되려면 각 지역이 대부분의 시간동안 각자의 제어책임을 완수하고 다른 지역으로부터 계획되지 않은 도움을 받는 제어상황은 아주 특별한 비상상황인 경우에 국한되어야 한다. 만약 비상상황을 맞은 경우는 다른 지역에 계획되지 않은 제어부담(regulating burden)을 주는 범위 및 기간을 최소화하도록 필요한 조치를 취하여야 한다. 만약 다른 지역에 너무 자주, 그리고 너무 오랜 기간 동안 계획되지 않은 의존을 한다는 것을 소위 "연계선을 탄다(riding the ties)" 또는 "연계선에 기댄다(leaning on the ties)"라고 한다. 만약 하나의 연계계통이 된 후 계통주파수의 질이 저하되는등 계통제어상태가 불량한 경우는 어떤 지역이 적절한 제어를 하지 못하는지, 그리고 이 경우 이를 고치도록 할 수 있도록 지역제어동작을 해석할 수 있는 방법이 강구되어야 할 것이다.

이 방법으로 주로 사용되었던 것들은 (1)제어동작기준(Control Performance Criteria), 및 (2)제어오차조사(Control Error Survey)이다. Nathan Cohn은 이 방법들 대신 주어진 시간대의 각 지역의 제어실적을 평가하기 위하여 소위 "성분 분해법(Decomposition Method)"을 제시하였다. 참고문헌[29]에서는 연계계통을 임의의 지역 대 여타계통 즉 두개의 지역으로 나누어 도식적인 방법으로 한 지역의 시간오차(Time Error) 및 수순에너지오차(Inadvertent Interchange Energy)를 (c, I_i) 평면에 나타내는 방법을 제시하셔서 주어진 시간대 각 지역의 제어실적을 평가하는 방법을 제시하였다.

5. 연계선 편기제어

미국 및 캐나다 연계계통은 다수지역계통으로 운용되고 있으며 표 1에 나타난 바와 같이 2단계목표를 연계선 편기제어(Tie-line bias control)로 해결하였다. 남북한 연계계통의 경우도 다수 지역계통으로 운용된다고 하면 연계선 편기제어 방식이 채택되리라 생각된다. 이 방법은 북미연계계통의 공인된 운용방식이며 이 계통이 현재와 같은 대형계통으로 성장하는데 가장 큰 역할을 한 방식이다. 이 방식은 주로 Nathan Cohn에 의해 연구가 주도되었다. 참고문헌 [1]에서 [12]까지는 Nathan Cohn의 저작물을 연대별로 정리한 것이다.

다수지역계통에 속한 각 지역은 지역제어오차(Area control error : ACE)라고 부르는 신호에 따르는 제어기를 가지고 있다. 각 지역의 지역제어오차는 두개의 지역신호의 합이다. 하나는 지역과 이웃을 연결하는 모든 연계선을 흐르는 전력조류의 합(Mw)과 계획된 전력조류의 합(Mw)의 차이이다. 다른 또 하나의 신호는 소위 주파수편기전력(Frequency bias power)로서 주파수편기치(Frequency bias setting, Mw/Hz)와 주파수와 계획주파수의 차를 곱한 값이다. 모든 제어지역의 제어기가 연가선 편기제어모드로 운용되고 있다고 가정할 경우 지역 i의 ACE는 식 (1)로 표현된다. 단 주파수는 모든 제어지역에서 똑같다고 가정한다.

표 2. North American Electric Reliability Council
(NERC) Operating Guide [26]

No. 1.	Automatic Generation Control
No. 2.	Frequency Bias Setting
No. 3.	Scheduled Interchange
No. 4.	Time Error
No. 5.	Inadvertent Interchange Accumulations
No. 8.	Regulating Surveys
No. 9.	Action in an Operating Capacity Emergency
No.10.	Reserve Capacity
No.11.	Load Shedding, Sectionalizing, and Restoration
No.12.	Communications
No.13.	Generation Security
No.14.	Relaying
No.15.	Transmission
No.16.	Maintenance Coordination
No.17.	Selection and Training of System Operators
No.18.	Notification of System Disturbances
No.19.	Exchange of Information
No.20.	Analysis and Reporting of System Disturbances
No.21.	Monitoring for System Security
No.22.	Action for an Energy Emergency

이 분야에서 많이 읽혀지는 문헌을 나름대로 정리하여 제시하였다. [1]번에서 [12]번까지는 Nathan Cohn의 저서 또는 논문이며, 기타는 이와 관련된 논문 및 자료의 목록들이다. 자료를 구하기 힘든 경우에는 저자에게 연락해 주시면 좋겠습니다.

참고문헌

1. Nathan Cohn. "Power Flow Control--Basic Concepts for Interconnected Power System." Proceedings of the Mid-west Power Conference (Chicago, Illinois) 12 (1950): 159-175.
2. Nathan Cohn. "Some Aspects of Tie-line Bias Control on Interconnected Power Systems." *AIEE Trans.* PAS-75 (1956): 1415-1436.
3. Nathan Cohn. "Methods of Controlling Generation on Interconnected Power Systems." *AIEE Trans.* PAS-80, Pt. III (1962): 270-282.
4. Nathan Cohn. Control of Generation and Power Flow on Interconnected Systems. New York: John Wiley and Sons Inc., 1966.
5. Nathan Cohn. "The Use of Synchronized Time and Frequency Standards to Improve Control of Interconnected Electric Power System." Presented to the North American Power Systems Interconnection Committee, Atlanta, Georgia, Feb 26, 1969
6. Nathan Cohn. "Techniques for Improving the Control of Bulk Power Transfers on Interconnected Systems." *IEEE Trans.* PAS-90[6] (1971): 2409-2419.
7. Nathan Cohn. "Energy Balancing on Interconnected Systems." Proceedings of the American Power Conference, Vol 35, (1973): 995-1024
8. Nathan Cohn. "Some New Thoughts on Energy Balancing and Time Correction on Interconnected systems." Proceedings of the IEEE Region 5 Conference on control of Power Systems, Oklahoma City, Oklahoma, March 1976: 55-61. IEEE Publication T6CH 1056-9REG5.
9. "Power System Planning and Operations: Future problems and Research Needs." Proceedings of an Engineering Foundation Conference, sponsored by the U.S. Energy Research and Development Administration and the Electric Power Research Institute, Henniker, New Hampshire, August 22-27, 1976.
10. Nathan Cohn. "Decomposition of Time Deviation and Inadvertent Interchange on Interconnected Systems, Part I: Identification, Separation and Measurement of Components." *IEEE Trans.* PAS-101[5] (1982): 1144-1151.

11. Nathan Cohn. "Decomposition of Time Deviation and Inadvertent Interchange on Interconnected Systems, Part II: Utilization of Components for Performance Evaluation and Corrective Control." *IEEE Trans.* PAS-101[5] (1982): 1152-1169.
12. Nathan Cohn. "The Evolution of Real Time Control applications to Power Systems." Presented at the International Federation of Automatic Control(IFAC) Symposium on Real Time Digital Control Applications, Guadalajara, Mexico, January 15-21, 1983.
13. O. I. Elgerd and C. E. Fosha, Jr. "Optimum Megawatt-Frequency Control of Multiarea Electric Energy Systems." *IEEE Trans.* PAS-89[4] (1970): 556-563.
14. C. E. Fosha, Jr., and O. I. Elgerd. "The Megawatt-Frequency Control Problem: A New Approach via Optimal control Theory." *IEEE Trans.* PAS-89[4] (1970): 563-577.
15. J. L. Willems. "Sensitivity Analysis of the Optimum Performance of Conventional Load Frequency Control." *IEEE Trans.* PAS-93 (1974): 1287-1291.
16. D. N. Ewart. "Automatic Generation control- Performance Under Normal Conditions" Presented at Engineering Foundation Conference, sponsored by the U.S. Energy Research and Development Administration and the Electric Power Research Institute, Henniker, New Hampshire, August 17-22, 1975.
17. C. W. Ross. "Error Adaptive Control Computer for Interconnected Power systems." *IEEE Trans.* PAS-85 (1966): 742-749.
18. C. W. Taylor and R. L. Cresap. "Real-Time Power System Simulation for Automatic Generation Control." *IEEE Trans.* PAS-95[1] (1976): 375-384.
19. J. D. Glover and F. C. Schweppe. "Advanced Load Frequency Control." *IEEE Trans.* PAS-91[5] (1972): 2095-2103.
20. M. Calovic. "Linear Regulator Design for a Load and Frequency Control." *IEEE Trans.* PAS-91[6] (1972): 2271-2285.
21. H. G. Kwatny, K. C. Kalnitsky and A. Bhatt. "An Optimal Tracking Approach to Load-Frequency Control" *IEEE Trans.* PAS-93 (1974): 1635-1643.
22. Anjan Bose and Ilyas Atiyyah. "Regulation Error in Load Frequency Control." *IEEE Trans.* PAS-99[2] (1980): 650-657.
23. L. A. Mollman and Thomas Kennedy. "Interrelationship of Time Error, Frequency Deviation and Inadvertent Flow on an Interconnected system" *IEEE Trans.* PAS-87[2] (1968): 520-526.
24. Robert O. Usry. "Inadvertent Energy Interchange --Causes, Remedies, and Balancing." *IEEE Trans.* PAS-87[2] (1968): 513-520.
25. J. Zaborsky. "Proof of Uniqueness of N. Cohn's Components." Submitted to the IEEE Control Performance Task Force, Norristown, Pennsylvania, August 1982.
26. Operating Manual North American Electric Reliability Council, Princeton, Newjersey, 1982
27. The Current Operational Problems Working Group (76-1), "Current Operating Problems Associated with Automatic Generation Control." *IEEE Trans.* PAS-98[1] (1979): 88-96
28. A. A. Fouad and S. H. Kwon. "Effect of Coordinated Correction of Tie-line Bias Control in Interconnected Power System Operation." *IEEE Trans.* PAS-101[5] (1982): 1134-1143.
29. A. A. Fouad, S. H. Kwon. "Two-area Analysis of System Time Error and Inadvertent Interchange Energy in Interconnected Power Systems." *IEEE PAS Vol.104(8)*, pp2148-pp2158, 1985.
30. A. A. Fouad, S. H. Kwon, and R. P. Schulte. "Analysis of Accumulation of Inadvertent Interchange Energy and Time Error in Interconnected Power Systems." *IEEE PWRS-1, No.2.[5]*, pp138-pp145, 1986.