

電力系統의 電壓安定度 (東京大停電을 보고)

朴 鍾 根

서울대학교 전기공학과

1. 서 론

뉴욕대정전이 일어났던 때를 기점으로 세계 각처에서는 돌연히 아무 前兆도 없고 큰 外亂도 없었음에도 불구하고, 계통의 電壓이 점차적으로 崩壞해 버리는 현상이 일어났다. 프랑스의 브르타뉴지방에서 있었던 대형 전압붕괴현상이 있기까지만해도, 전력계통의 안정도라면 有效電力의 不均衡에 由來하는 것으로만 생각했으나, 그 후의 연구결과에 의해서 電壓低下에 기인한 不安定現象은 無効電力의 不均衡에 그 原因이 있음이 확실해졌다. 또한 이런 現象은 이제까지 소홀히 다루어져 왔던 負荷의 電壓—電力特性和 크게 연관되는 것으로 밝혀졌다. 순수한 無効電力의 不均衡이 完全한 계통붕괴를 가져오기 보다는 무효전력의 불균형이 2 차적으로 유효전력의 불균형을 불러 일으켜 전압붕괴로 치닫는 것이 거의 定說처럼 되어 있으나, 靜的 또는 動的인 면에서의 電壓不安定 機構(mechanism)의 究明은 앞으로의 研究課題로 남아 있다.

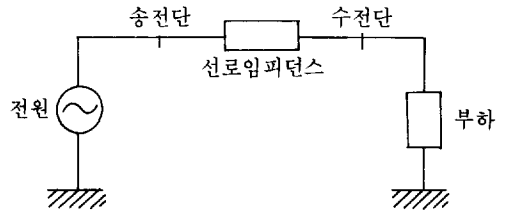
本特集에서는 전압안정성의 理解를 돕기 위하여 1 電源 1 負荷地點의 系統 및 潮流多根問題를 간단히 紹介하고, 東京電力의 事故現況 및 原因을 살펴 보겠다.

2. 전압안정성이란 ?

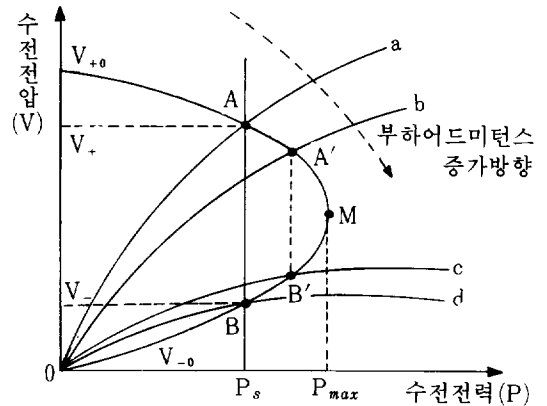
2.1 1 電源 1 負荷系統¹⁾

그림 1 a)에 1 電源, 1 負荷系의 모델을 나타냈

다. 임의의 계통에 대해서도 負荷地點에서 系統側으로 테브난의 정리를 적용하면 그림 1 a)과 같은 系統으로 等價化하여 생각할 수 있다. 그림 1 b)에서 점 V_{+0} 는 無負荷時의 受電電壓을 나타내고, 점 V_{-0} 는 극단적인 예로써 受電端短絡時의 電壓을 나타낸다. 점 V_{+0} 과 V_{-0} 의 중간에 最大電力點 M이존



a) 1 전원 1 부하 모델계통



b) 부하증가와 수전전압

그림 1. 수전단의 수요-전압특성

재하며 이 점을 사이에 두고 많은 特性들이 逆轉한다.

그 한 例를 들어보면 負荷의 增減에 대한 電壓의 움직임이 있다. 그림 b)에서 a, b, c, d 曲線은 負荷特性 曲線이고 점선으로 나타낸 化살표는 負荷어드미턴스의 增加方向을 나타낸다. 점M보다 왼쪽부분에서는 負荷의 增加가 곧 그 等價어드미턴스의 增加를 나타내어 수전전압이 低下하지만, 점M보다 아랫부분에서는 負荷의 增加는 등가어드미턴스의 減少를 뜻하여 수전전압은 오히려 上昇한다. 위에서 본 바와 같이 점M을 분기점으로 하여 潮流電壓根A, B는 서로다른 성질을 갖게 되는데 여기서는 A를 (+) 모드根, B를 (-) 모드根으로 부르기로 한다.²⁾ 보통 점M은 運轉基準電壓보다 훨씬 아랫쪽에 존재하기 때문에 運用上의 問題는 되지 않지만, 重負荷時, 계통故障時, 또는 多量의 電力用콘덴서 投入時등은 운전기준전압부근에 (+), (-) 모드根이 同時에 存在할 수 있다.³⁾

위와 같은 경우 전압안정성과 電力安定성을 종합한 安定성을 살펴볼 때, 큰 問題로 대두하는 것이 電力系統의 潮流多根問題이다. 즉 同一負荷條件(동일 負荷特性 및 潮流조건)에서 電壓安定根 및 不安定根을 전부 구하지 않으면 안된다.

2.2 潮流多根問題

조류계산에서 조류상태를 결정짓는 전력조류방정식이 전압에 관한 二次形式의 非線形方程式이기 때문에 동일 부하조건에서 多數의 潮流平衡解가 존재하는데, 예를 들면 N노드의 전력계통에서는 最多 2^{N-1} 개의 解가 존재하게 된다. 위와 같은 問題를 조류다근문제라 칭한다.

전압안정성의 문제가 생길 수 있는 계통조건에서 조류계산을 할 때 부하는 유효전력 및 무효전력을 指定하거나, 유효전력과 전압을 指定하기 때문에 定電力特性을 나타내어, 從來의 Newton-Raphson 法 등으로 구한 조류평형해의 아주 近接한 부근에 또 다른 해가 존재할 수 있는 可能性이 지적되었다.³⁾

$$P_i + jQ_i = \dot{V}_i \sum_{k=1}^N \overline{Y}_{ik} \overline{V}_k \quad (1)$$

i, k, N은 電力系統의 노드

\dot{V}_i 는 i노드의 電壓 Vector

\dot{Y}_{ik} 는 i, k노드간의 어드미턴스 Vector

P_i, Q_i 는 노드 i의 유, 무효전력량,

N개의 노드로서 구성되는 전력계통망에서 윗식과 같은 전력조류방정식은 N-1 次元의 獨立된 連立方程式으로 되고, 이 중에서 n개가 未知 電壓이라고 하면, 이 식은 2^n 次의 高次方程式으로 歸着시킬 수 있다.

$$f(V_i) = 0 \quad (2)$$

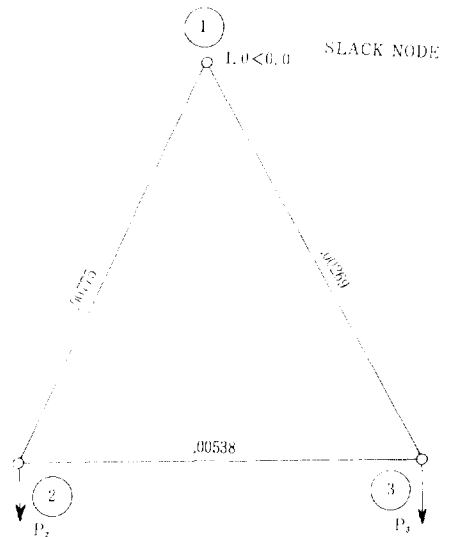


그림 2. 3-node network

그림 2와 같은 직류 3노드계통을 예로들어 V_3 에 관한 식으로 정리하면,

$$f(V_3) = d_1 V_3^4 + d_2 V_3^3 + d_3 V_3^2 + d_4 V_3 + d_5 \quad (3)$$

와 같이 되어 조류해는 그림 3과 같이 된다. 그림에서 보는 바와 같이 重負荷로 되면 해가 接近하는 것을 알 수 있다.

上述한 조류다근문제에서는 종래의 방법과 다른 조류계산법을 考案해야 함은 물론이고, 구해진 해의 性質을 明確히 하여 전압붕괴 현상과의 연관성을 究明해야 한다. 이와 같은 研究는 東유럽 및 日本에서 1970년대 중반부터 많이 연구되고 있다.⁴⁾

다근문제의 계산으로서 그림 4와 같은 5노드계

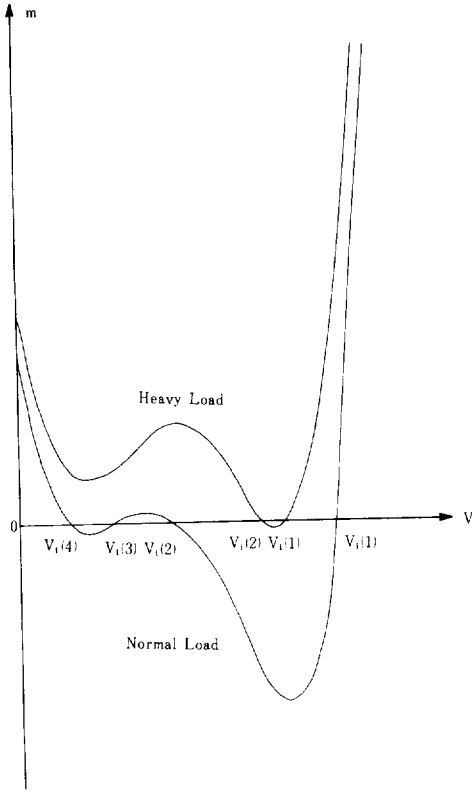
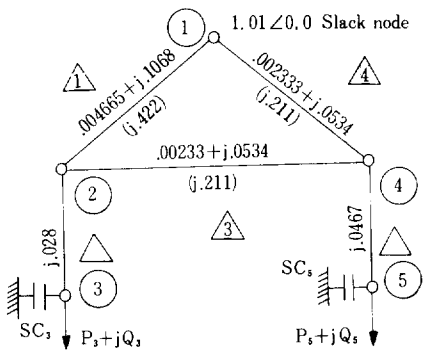


그림 3. Load flow function $f(V_i)$ for 3-node network



Branch Parameter	R, X/Y
Base Power	100MVA
Base Voltage	400KV
△ Branch number	

그림 4. 5-node model system

통에 대한 계산결과를 소개하면 표 1 과 같다.³⁾ 이 때 (+) 모드해와 (-) 모드해의 重大한 差異가 나타나는데, (+) 모드의 경우 전력용콘덴서를 增加시키면 전압이 上昇하지만, (-) 모드의 경우에는 반대로 전압이 減少하는 것을 알 수 있다. 따라서 大外亂에 의해서 (-) 모드영역으로 運轉點이 移動한다면 전력용콘덴서의 전압 維持能力은 상실된다고 볼 수 있다.

2.3 전압안정성

전압안정성의 概念은 Venikov氏가⁵⁾ 提案했는데, 처음에는 誘導電動機의 안정성문제가 出發點이었다. 유도전동기의 最大發生 torque는 定格 torque의 2 배정도로 설계하는 것이 일반적이다. 이 경우는 端子전압을 一定하다고(즉 電壓變動率이 0) 가정한 것이고, 실제로 긴 선로에 많은 콘덴서補償이 이루어져 있는 경우에는 최대발생torque가 크게 減少하여 안정성이 상실되기 쉬워진다. 이런 문제의 安定判別條件으로 다음 두 식이 제안되었다.

$$dQ/dV > 0 \tag{4}$$

$$dV/dE > 0 \tag{5}$$

(4) 식은 送電端전압을 固定시켜 놓고, 수전단에 무효전력 Q를 약간 注入시켰을 때 수전단전압V가 上昇하면 안정, 그렇지 않으면 불안정으로 판정한다. (5) 식은 需給平衡을 맞추어가면서 송전단전압E를 올렸을 때(즉 발전기의 공급무효전력을 증가) 수전단 전압V가 상승하면 안정, 그렇지 않으면 불안정으로 판정한다. 이 두 판정조건은 결국 等價이다.¹⁾ 그以後에도 實系統에서 부하의 應答特性등을 動的모델로 표현하여 판정조건등을 제시한 예도있으나, 이 경우에도 결과는 Venikov의 판정조건과 같은 것으로 판명되었다.

여기에서 중요한 것은 Venikov의 안정조건이 系統運用의 필요조건임에 불과하지 충분조건은 되지 못한다는 것이다. 일 예를 들면, Nagao氏는 Venikov의 안정조건이 만족되어도, 전력용콘덴서의 投入 및 전원전압의 상승에 비해서 수전단의 변압기 tap制御가 先行될 경우에는 전압붕괴현상이 일어날

표 1. Calculated results of 5-node model system

Case	Node	Load	Power Cond	Mode	$S_1(+, +, +, +)$	$S_2(+, +, +, -)$	$S_3(+, -, +, +)$	$S_4(+, -, +, -)$
				Conv. Step	29	29	31	44
C-1	3 5	2.0+j0.501 2.0+j0.501	0 0 0	Flow of Ref. node	4.029+j1.240	4.257+j11.63	4.358+j12.66	4.441+j15.70
				$V_2 \delta_2$	0.9560 -0.1654	0.6615 -0.2568	0.3966 -0.3358	0.3793 -0.3953
				$V_3 \delta_3$	0.9392 -0.2278	0.6334 -0.3909	0.1887 -1.181	0.2310 -1.088
				$V_4 \delta_4$	0.9605 -0.1365	0.5649 -0.2022	0.6458 -0.2107	0.4983 -0.2531
				$V_5 \delta_5$	0.9301 -0.2413	0.1997 -1.176	0.5859 -0.4602	0.2667 -1.032
				Conv. Step	42	29	31	32
C-2	3 5	2.0+j0.501 2.0+j0.501	1.0 1.0	Flow of Ref. node	4.027-j1.259	4.245+j11.10	4.350+j12.12	4.449+j15.86
				$V_2 \delta_2$	1.055 -0.1539	0.6989 -0.2475	0.3993 -0.3273	0.3747 -0.4012
				$V_3 \delta_3$	1.070 -0.2035	0.6934 -0.3623	0.1816 -1.209	0.2288 -1.113
				$V_4 \delta_4$	1.043 -0.1291	0.5734 -0.1973	0.6721 -0.2054	0.4926 -0.2559
				$V_5 \delta_5$	1.067 -0.2131	0.1922 -1.208	0.6511 -0.4205	0.2609 -1.069
				Conv. Step	59	29	29	31
C-3	3 5	2.0+j0.501 2.0+j0.501	3.0 2.0	Flow of Ref. node	4.090-j6.429	4.222+j9.681	0.4018 -0.3188	4.460+j16.06
				$V_2 \delta_2$	1.280 -0.1381	0.7944 -0.2275	0.1738 -0.250	0.3665 -0.4101
				$V_3 \delta_3$	1.366 -0.1697	0.8462 -0.3190	0.711 -0.2001	0.2235 -1.163
				$V_4 \delta_4$	1.203 -0.1185	0.5996 -0.1854	0.7246 -0.3850	0.4867 -0.2594
				$V_5 \delta_5$	1.305 -0.1787	0.1785 -1.246	4.345+j11.54	0.2572 -1.101
				Conv. Step	67	30	35th step complex (type I)	20th step complex (type II)
C-4	3 5	3.0+j0.751 3.0+j0.752	3.0 2.0	Flow of Ref. node	6.094-j4.788	6.253+j10.21	$S_1=6.307+j12.75$	$S_1=5.646+j15.04$
				$V_2 \delta_2$	1.226 -0.2087	0.7577 -0.3534	$S_2=0.0000+j0.000$	$S_2=0.017+j.0704$
				$V_3 \delta_3$	1.319 -0.2607	0.7899 -0.4942	$S_3=2.899+j0.6368$	$S_3=2.590+j.6278$
				$V_4 \delta_4$	1.156 -0.1788	0.6140 -0.2894	$S_4=0.0302-j.1599$	$S_4=.0043-j.0078$
				$V_5 \delta_5$	1.238 -0.2769	0.2932 -1.181	$S_5=2.996+j0.7521$	$S_5=2.618+j.6680$

수 있다고 주장하고 있다.¹¹⁾

(4), (5)의 판별조건의 滿足與否를 점검하는 가장 간단한 방법은 조류계산에서 dQ/dV 의 感度를 구해 보는 것이다. 엄밀한 의미에서 물리적 의미를 갖지는 못한다. 좀 더 엄밀하게 부하의 전압특성을 고려하여 dQ/dV 를 점검하는 방법등도 제안되고 있다. 그러나 Nagao氏가 주장하는 경우를 검증하기 위해서는 충분히 계통구성요소의 동특성까지 고려하여 시뮬레이션하지 않으면 안된다. 특히 전력용콘덴서의 보상특성, 변압기 tap제어특성, 부하동특성은 고려되어야 할 중요한 요소이다.

3. 東京大停電의 例

3.1 사고현장

지난 7월 23일 13시 19분경, 35.9°C라는 높은 기온에서 일본의 동경부근지역에 최소 4분에서 최고 3시간 19분간 약 820만kW(약 280만세대)의 대정전사고가 발생하여 일본은 물론 전세계 전력관계자들의 관심을 끌었다. 이사고는 1965년 뉴욕대정전 이후 규모면에서 7번째로 큰 정전사고였다.

氣象의 계속적인 修正豫報에 맞추어 최대전력을 예측해 가면서, 주변전력회사에서 融通전력을 수전해서 전력공급력을 증가시켜 예비력을 확보한 결과, 전력수요의 증가에 대해서도 수급 balance는 물론

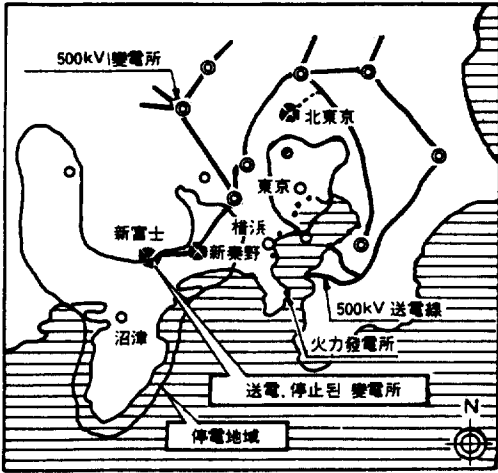


그림 5. 동경전력 송전망의 계략과 정전지역 계통전압에 대해서도 충분히 유지할 수 있다고 생각되었다.

그러나 13시 이후의 猛暑와 점심시간이후의 급증하는 수요가 중복되어 일시적으로는 과거기록의 2 배가 넘는 1분에 40만kW가 증가하는 기록을 보였다.

이에 대응하여 전압유지를 위하여 변압기의 2, 3 차측 전압을 최대한으로 상승시키고 전력용콘덴서도 全量투입, 발전기의 최대여자운전등의 가능한 모든 대책을 강구하였으나, 최대전력 3,930 만kw에도 달하는 순간 기간계통의 전압이 점차로 강하여져 3 개의 전원용 변전소가 보호거리계전기의 작동으로 정지하였다.

3.2 사고원인 및 계통시물레이션

사고원인의 究明과 대책의 확립을 위하여 동경전력측은 신속히 학제인사를 포함한 사고조사 위원회를 설치하고, 검토결과를 언론 및 국회를 통해서 발표하였다.

사고원인은 앞절에서 말한 바와 같이 점심시간후의 수요의 증가가 높은 수준에서부터 시작되었다는 점과 수요증가율이 과거적 및 경험을 훨씬 넘는 값이었다는 점으로 추정되었다.

전압붕괴현상을 實證해보기 위하여, 사고당시의 실측치를 사용한 모델계통정수를 써서 각 時點마다의 전력조류계산을 하고, 多斷面時間을 연속적으로

계산함으로써 準動的모델을 계산해 냈다.

계산결과에 의하면 同一負荷條件에서 사고시의 실측된 전압보다 높은 電壓根이 존재하는 것이 발견되었고, 이 根은 2 장에서 말한 (+)모드根에 해당하는 것이다.

사고원인은 운전전압이 사고 17분전부터 (+)모드운전 가능전압으로 부터 (-)모드운전 가능 전압으로 옮겨졌기 때문인 것으로 추정된다. 즉 부하의 증가와 더불어 전력용콘덴서를 투입해도 전압강하

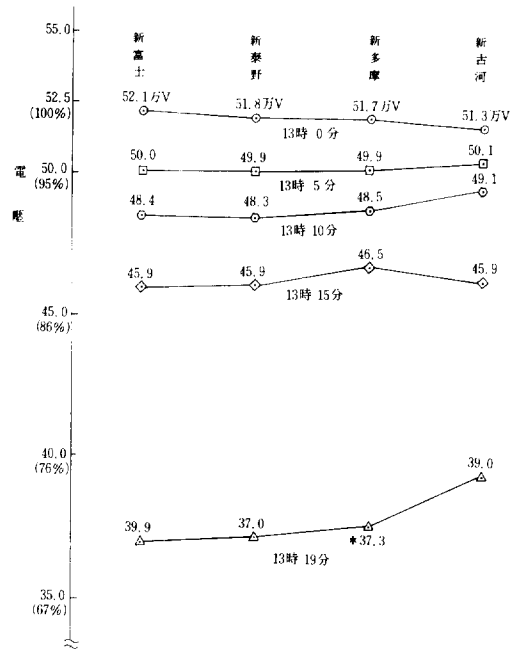


그림 6. 전압저하 현황

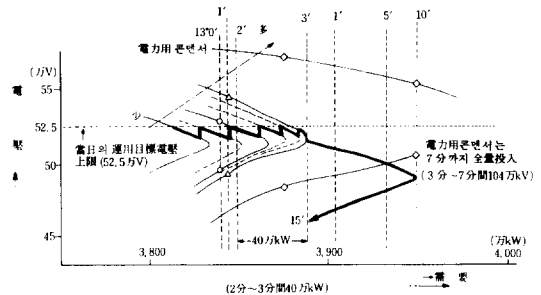


그림 7. 실상황 시물레이션 결과

를 방지할 수 없는 영역으로 이동한 것으로 생각된다. 만일 사고 17분전 이후의 수요증가율이 작았다면 실제투입콘덴서만 가지고도 (+)모드 전압으로 운용가능했겠지만, 증가율이 40만kw/분에 달했기 때문에 다음 콘덴서 투입시까지에는 이미 운용전압이 (-)모드 전압측으로 遷移한 것으로 추정된다. 종래에 경험한 바 없는 급격한 수요증가에 대해, 운용목표전압이상으로 되는 것을 피해야만 전압용 콘덴서를 투입했기 때문에 결과적으로 무효전력공급이 늦어져서 전압붕괴로 치달은 것이다.

4. 결 론

전력계통의 안정성문제를 기존의 안정성 개념과 다른 측면으로서 전압안정성문제를 제기하고, 최근 일본 동경전력에서 발생한 대정전사고의 예를 들어서 설명하였다. 유효전력의 안정성문제가 주로 설비의 결함이나 고장에 기인한다면, 전압(무효전력) 안정성은 운용의 미흡함으로서 기인하는 경우가 많을 것으로 추정되기 때문에 약간의 소홀히 다루어질 수 있는 소지가 있다. 실제적으로 전압안정성이란 아직 그 연구의 역사가 짧아서 그 완전한 이론적 究明이 이루어지지 못한 상태이다. 이번에 실제 일어난 동경전력의 경우 우리나라 전력계통과 많은 점에서 유사한(특히 수도권지역의 부하 편재현상) 점을 가지고 있어, 앞으로의 연구의 필요성을 절감

케하고 있다. 연구되어야 할 분야로서는 안정도 해석기술의 확립은 물론 정지형무효전력제어 장치등과 같은 새로운 안정화제어기술의 개발등이 있다.

끝으로 동경전력내의 사고원인 구명재료를 입수해 주신 고려대학교 권세혁박사께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 長尾待士, “電圧安定性解析”, 日本電氣學會雜誌 Vol. 100, No. 1, pp. 16~19, Jan., 1980.
- 2) 朴鍾根, “電壓多根解의 特性 및 誘導電動機負荷를 갖는 系統에 있어서의 電壓安定性”, 대한전기학회논문지 Vol. 34, No. 1, pp. 19~28, Jan., 1985.
- 3) J. Park and Y. Sekine, “A Method for Analyzing Multisolution in Power Flow Analysis”, Trans. IEE of Japan, 99-B, pp. 245, Apr., 1979.
- 4) 長崎 등, 日本電氣學會電力技術研究會資料 ET-75-5~16, May, 1975.
- 5) B. A. БелНКОВ, et al.: НЭВ. АкадНаук СССР 4, 19(1962)
- 6) A. Klos & A. Kerner: “The Nonuniqueness of Load Flow Solution”, 5th PSCC Cambridge (1975)
- 7) G. Shackshaft & P. H. Ashmole: “The Influence of Load Characteristics on Power System Performance”, CIGRE 31-02 (1978)
- 8) C. Barbier & J. P. Barret: “An Analysis of Phenomena of Voltage Collapse on a Transmission System”, RGE-Special Issue, 3 (July 1980)