

電力系統의 供給信賴度에 관한 研究

—最大Flow法을 이용한 簡略計算法開發—

論 文
29-5-3

A Study on the Reliability in Power System

—Simplified Computation by Using the Maximal Flow Method—

宋 吉 永* · 鄭 義 必**

(Kil-Yeung Song · Yee-Pil Chong)

Abstract

This paper presents the reliability calculation method in power supply for a part of the power system reliability control. This method involves assuming several systems that can meet the demands, accidents on the transmission facilities and power source and performing the load flow calculation which will lead to the demands which are not served, frequency of the not-served demands and mean value of the not-served demands.

In this study the simplified method for reliability Calculation by using the maximal flow problem was developed. The results demonstrate the remarkable advantages and more useful than any other methods for the practical applications.

1. 序 論

電力需要의 증대와 더불어 電力系統은 날로 대응량 化, 복잡화되어가고 있다. 이에 따라 系統事故시의 象 상과 과급형태도 복잡해지고 이에 대한 대책 역시 아 주 복잡하게 되어가고 있다.

한편 電力系統運用의 목표는 시시각각 변동하는 계 統상태에 대응해서 電氣의 質, 즉 규정전압, 규정주파 수를 유지하면서 전력공급을 안정하게 운용함과 동시에 經濟性확보를 기해 나가는데 있다고 하겠다.

本文은 이들 목표 가운데 특히 계통의 안정운용을 위 한 供給信賴度의 확보를 대상으로 연구 검토한 것이다 一般적으로 供給信賴度를 나타내기 위해서는 需要電力 에 대한 停電電力의 比較단가 發生電力量에 대한 供給 支障電力量의 比를 확률적으로 산정하고 있으나 系統 의 대규모화되고 복잡화됨에 따라 이들 양을 정확하게 구한다는 것은 점점 더 어려워지고 있다.

본연구에서는 이에 대신하는 보다 간단한 방법으로 시 일반 回路網에서 이용되고 있는 最大flow技法(max-

ximum flow method)를 供給信賴度 문제에 적용해서 보다 신속하고 간편하게 주어진 系統運轉條件下에서의 想定事故를 중심으로 이때의 供給支障이 어느 정도의 水準에 이르고 있는가를 쉽게 체크할 수 있는 簡略計 算法을 개발하였다.

즉 구체적인 電源이나 輸送설비의 事故를 상정하고 이때 이 想定事故에 대한 계통설비의 공급능력한계 및 이들의 停止確率(頻度)과 이에 따른 정량적인 供給支 障範圍를 신속하게 파악할 수 있는 簡略供給信賴度算 定프로그램을 개발하고 이를 實系統에 적용하므로써 이것이 계산비용면에서나 소요계산시간면에서 系統運 用을 위한 유력한 수단으로서 충분히 활용될 수 있다 는 것을 밝힐 수 있었다.

2. 最大流量問題의 定義 및 解法

통상 어떤 回路網에 流量을 흘릴 경우 流量이 들어 가는 節點(node)을 流入點(source), 나오는 節點을 流 出點(sink)이라고 한다. 일반적인 回路網에서는 이 流 入點과 流出點은 한개가 아니고 복수개로 되지만 이런 경우에도 그림 1에 보인 것처럼 따로 流入點 S와 流出 點 N를 설정하고 이것과 回路網을 容量을 갖는 枝路 로 연결해주면 각각 한개의 流入點과 流出點으로 된

* 正會員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 ** 正會員 : 韓國電力(株) 系統運用部
 接受日字 : 1980年 4月 8日

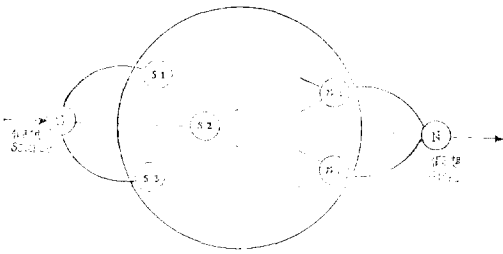


그림 1. 等價回路網(多端流入點, 多端流出點)
Fig. 1. equivalent network (multi sources and Sinks)

回路網문제에 귀착시킬 수 있게 된다.

여기서 임의의 節點 i, j 를 연결하는 枝路의 正의 容量을 U_{ij} , $i \rightarrow j$ 로 향하는 流量을 x_{ij} 라 하고 이 回路網에 流出入하는 正味(net)의 流量을 F 라고 한다면 Kirchhoff의 節點法則에 따라 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\sum_{j=a_1}^{ak} x_{ij} - \sum_{j=b_1}^{bk} x_{ji} = \begin{cases} F & (i=0) \\ 0 & (i=1, 2, \dots, n-1) \\ -F & (i=n) \end{cases} \quad (2-1)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq U_{ij} \quad \{\text{모든 } i, j\text{에 대해서}\} \quad (2-2)$$

여기서 고려해야 할 문제는 枝路가 定해진 容量을 갖는 回路網의 最大流量을 결정한다는 것이다. 즉 式(2-1)에서 $i=0$ 및 $i=n$ 에 대한 방정식의 F 를 最大化하는 것으로 생각하면

$$\sum_{j=a_1}^{ak} x_{0j} - \sum_{j=b_1}^{bk} x_{j0} = - \sum_{j=a_1}^{ak} x_{nj} + \sum_{j=b_1}^{bk} x_{jn} = \text{Max } F \quad (2-3)$$

로 쓸 수 있다.

여기서 $i=1, 2, \dots, n-1$ 에 대한 式은 拘束條件이 된다 즉

$$\sum_{j=a_1}^{ak} x_{ij} - \sum_{j=b_1}^{bk} x_{ji} = 0 \quad (2-4)$$

따라서 方向性을 가진 回路網의 最大流量문제는 (2-2) ~ (2-4) 式의 3개의 방정식으로 定義된다.

한편 流入點과 流出點을 分離시키는 枝路의 集合을 切斷(Cut)이라고 하고 切斷을 구성하는 枝路가 갖는 같은 方向의 容量의 합계(和)를 切斷容量(cut capacity)이라고 하는데 통상 이것은 다음 式처럼 표시된다(그림 2 참조).

$$F = \sum_{r \in T} x_{r,i,j} \quad (2-5)$$

이때 枝路(i, j)의 殘餘容量을 g_{ij} 라고 하면

$$g_{ij} = U_{ij} - x_{ij} \geq 0 \quad (2-6)$$

으로 된다.

따라서

$$x_{ij} = U_{ij} - g_{ij} \quad (2-7)$$

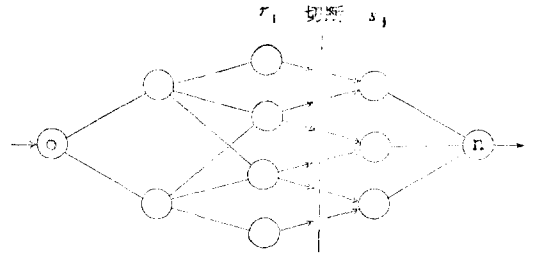


그림 2. 最小切斷과 最大流量
Fig. 2 Minimum cut and Maximum flow

이므로 이것을 (2-5) 式에 대입하면

$$F = \sum_{r \in T} (U_{r,i,j} - g_{r,i,j}) \quad (2-8)$$

을 얻는다.

回路網의 모든 가능한 經路에 대한 체인(Chain) 流量을 임의의 切斷枝路에 殘餘容量이 0으로 될때까지 흘리면

$$g_{r,i,j} = 0 \quad (2-9)$$

및

$$F = \sum_{r \in T} U_{r,i,j} \quad (2-10)$$

을 얻는다. 式(2-10)은 回路網을 통해서 흐를수 있는 流量 F 가 切斷의 값(즉 切斷된 枝路의 모든 容量의 總和)에 의해서 制限된다는 것을 나타내는 것이다.

여기서 回路網의 모든 切斷의 集合과 그 값을 찾아 낼 수 있다면 回路網의 最大許容流量(F^*)은 回路網의 切斷의 最小值에 의해서 制限된다는 결론을 내릴 수 있다. 즉 回路網의 最大許容流量 F^* 는 아래식에 보이는 같이 最小切斷容量 C^* 와 같게 된다는 것이다.

$$\text{Max } F = F^* = C^* = \text{Min } C \quad (2-11)$$

보통 이것을 最大流量-最小切斷定理라고 부르고 있다 다음 最大流量問題의 解法으로서 本研究에서는 經路 flow에 의한 방법을 채용하였다. 이 방법은 流入點으로부터 流出點에의 여유가 있는 經路를 임의로 선정하고 그 經路에 더 흘려줄 수 있는 最大流量을 차례차례로 추가해 나가는 방법이다.

그 설명예로서 그림 3과 같은 回路網에서 最大流量

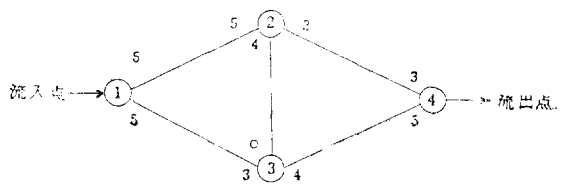


그림 3. 모델系統
Fig. 3. Model System

서 설명한다.

3. 供給信賴度計算

일반적으로는 供給信賴度를 需要電力에 대한 停電電力의 比라던가 발생電力량에 대한 供給支障電力량의 比를 確率의 으로 산정하는 방법을 쓰고 있다. 그러나 系統규모가 확대되고 복잡화됨에 따라 이 방법은 너무 복잡해서 實用的이라고 볼 수 없게 되고 있다. 따라서 여기서는 직접 電源이나 送變電설비에 사고가 발생하였을 경우를 가정하고 이때의 潮流상태를 反復계산 하므로써 供給支障與否(範圍)를 쉽게 체크할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

즉 想定事故時에 있어서의 電源分擔交替, 供給설비 네트워크, 負荷制限등의 계통상태를 最大flow技法을 써서 신속하게 찾아낼 수 있게 한 것이다. 이를 위한 信賴度算定의 前提條件과 定式化 및 計算알고리즘을 소개 하면 각각 다음과 같다.

3.1 供給信賴度算定을 위한 前提條件

먼저 供給信賴度算定을 위한 主된 前提條件을 열거 하면 아래와 같다.

(가) 系統構成은 1斷面, 負荷需要도 1時點의 것만 주어지는 것으로 한다.

(나) 想定事故에 따른 過度動探상態는 무시하고 定常狀態만 대상으로 한다(따라서 設備의 許容容量은 사고 결과후의 값을 취한다).

(다) 電源事故는 1發電所에서 1機解列, 送電설비사고는 1루우트에 1回線 및 1回線停止를 가정한다.

(라) 事故후의 出力配分 및 潮流分布는 각 설비의 容量制約조건하에서 負荷의 供給支障電力이 最小로 되겠끔 조정한다.

(레) 각 負荷가 받는 供給支障算定値는 그 기간중에 공급지장을 받게되는 回數 및 最大支障電力과 1回當의 平均支障電力으로 대표시키고 역시 각 설비가 받는 供給네트워크의 算定値로서는 각 설비가 그 기간중에 供給네트워크로 될 回數 및 最大支障電力과 1回當의 平均超過電力으로 대표시킨다.

3.2 供給信賴度에 관한 定式化

우선 供給信賴度 산정에 필요한 記號를 다음과 같이 약속한다.

- IDP_i: i負荷의 크기
- MRT_i: i變電所의 供給支障電力
- FRQ_i: i設備의 停電確率
- IDK: 넉크로 되는 設備數(供給支障數)
- AMW_i: i負荷의 平均支障電力

(가) 供給支障率(IDPF)



그림 4. 經路 Flow에 의한 解法의 順序
Fig. 4. Procedure of pathmethod

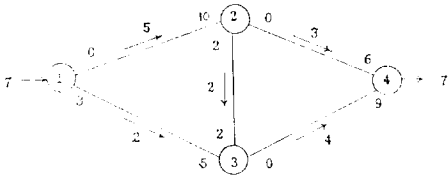


그림 5. 經路 Flow法에 의한 最大 flow
Fig. 5. The Maximum flow by path method

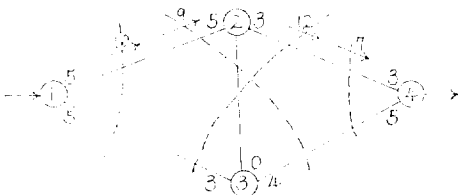


그림 6. 切斷과 切斷容量
Fig. 6. Cut and cut capacity

을 실제로 구해나가는 解析순서를 그림 4에 보인다. 그 결과 각 Step에서 흘러준 Flow를 중첩시키므로써 最大 Flow 7(=3+2+2)를 얻게 된다(그림 5참조) 참고로 그림 6은 그림 3의 모델系統에 대한 切斷 및 切斷容量을 나타낸 것이다. 破線을 횡단하는 枝路의 組가 切斷을 구성하며 이 그림에서는 4組의 切斷을 얻게된다. 流入點 1로부터 流出點 4에로 향하는 切斷容量 가운데 最小의 것은 7이며 이것은 위에서 설명한 最大Flow의 값과 같다는 것을 알 수 있다.

經路flow法의 解析순서는 流入點으로부터 流出點에 殘餘容量이 있는 經路를 더 찾을 수 없게 되었을때 終了하게 되어 있다. 실제의 計算에서는 여기에 事故想定에 관한 시뮬레이션과 感度解析 技法을 추가해서 종합적으로 다루게 되는데 구체적인 내용은 다음 節에

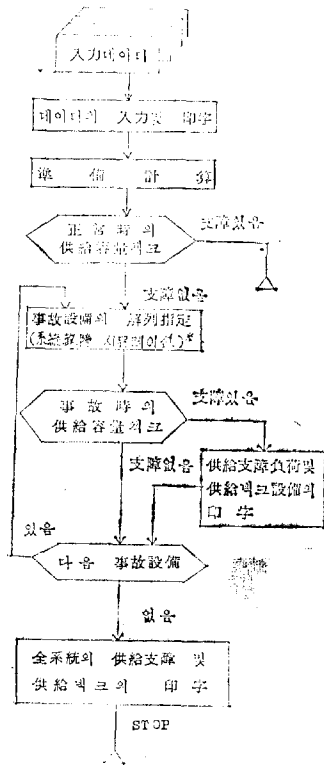


그림 7. 供給信賴度計算 flow chart

Fig. 7. flow chart for reliability Computation

$$IDPF = \frac{\sum_{IDK} MRT_i}{\sum_{IDK} IDP_i} \times 100 \quad (3-1)$$

(나) i 設備의 供給支障確率($FRQT_i$)

$$FRQT_i = \sum_{IDK} FRQ_i \quad (3-2)$$

(다) i 負荷의 平均支障電力(AMW_i)

$$AMW_i = \frac{ALW_i}{FRQT_i} \quad (3-3)$$

$$ALW_i = FRQ_i \times \frac{\sum_{IDK} MRT_i}{\sum_{IDK} IDP_i} \times IDP_i \quad (3-4)$$

3.3 엘리고리즘 및 flow chart

전술한 前提條件에 의거해서 차례차례로 電源이나 輸送설비에 지정된 사고를 상정하고 이때의 潮流分布를 계산할 경우에는 통상적인 潮流計算대신에 最大流量技法을 사용해서 보다 신속하게 이들 값을 얻도록 하였다. 즉 最大流量技法으로 過負荷개소를 체크하고 過負荷설비가 있으면 그 解消案을 강구하고 그래도 過負荷가 해소되지 않으면 負荷를 소모량만큼 제한해서 이때의 供給支障電力을 산정하도록 한다. 따라서 실제의 計算內容은

- 가) 平常시의 潮流計算
- 나) 事故시의 潮流計算

入力데이터

- ① Control data
- ② 母線데이터
- ③ 發電機데이터
- ④ 線路데이터
- ⑤ 負荷데이터
- ⑥ 出水데이터

準備計算

- ① 設備接續先 Node의 連番化
- ② 最大flow計算 Network의 구성
- ③ Node-branch接續表 作成

負荷의 供給支障

供給支障을 받는 負荷가 예시에 2개소 이상일 경우 需要比例로 配分

設備의 供給넉크

供給넉크로 될 設備가 동시에 2개소 이상일 경우 容量比例로 配分

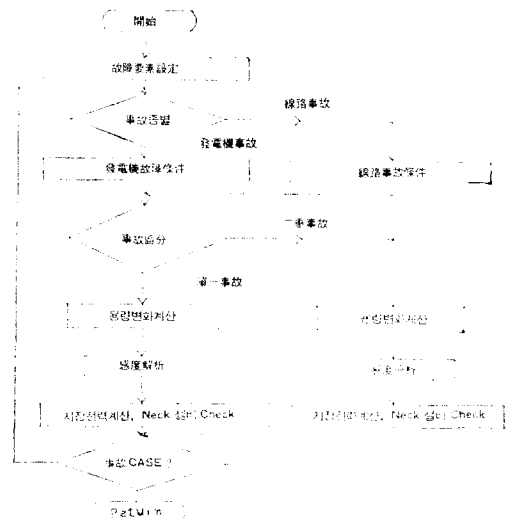


그림 8. 系統故障 SIMULATION FLOW CHART

Fig. 8. flow chart of fault simulation

다) 過負荷시의 電源分擔交替量 및 供給支障量計算
라) 系統分離時 供給支障量計算
으로 大別된다.

구체적인 이들 計算의 flow chart를 그림 7에 그리고 이 중 事故想定시뮬레이션에 관한 부분을 따로 그림 8에 보인다.

4. 實系統에의 適用例

그림 9와 같은 8機 28母線으로 구성된 嶺南地區系統을 대상으로 해서 각 電源 및 送電線路에서 차례로 想定事故가 발생하였을 때의 供給信賴도를 산정하였다. 想定事故에 관한 入力데이터로서는 일정기간에서의 事故發生건수(회/년)를 취하였는데 우선 小요계산시간은 위 系統에서 電源事故 및 線路事故 함께 37케이스의 潮流分布를 체크하는데 24초밖에 小요되지 않았으므로 앞을 이 방법을 實系統에 충분히 적용해 나갈 수 있을 것으로 밝혀졌다(사용계산기: FACOM 230/45-S) 表 1은 系統內의 각설비(발전기 및 송전선로)가 주

어진 事故發生회수에 따라 차례로 想定事故를 이르면 때 이로 인해 각지점의 負荷가 실제로 供給支障을 받게 될 회수, 1회당의 平均支障電力 및 그 기간중의 最大支障電力의 크기를 종합정리해서 보인 것이다.

마찬가지로 表 2는 이때 각설비가 이때의 想定事故로 받게되는 供給넉크(溢路, bottle neck)의 算定値를 보인 것으로서 구체적으로는 각설비가 供給넉크로 될 회수 및 1회당의 平均超過電力(즉 供給不能電力)과 그 기간중의 最大超過電力으로 나타내고 있다.

이들 결과로부터 쉽게 알수 있듯이 最大flow技法에 의한 信賴度計算은 系統規模가 커지고 복잡해지더라도 예상될 수 있는 각종 事故를 상정해서 실제로 이것을 각 설비별로 차례차례로 발생시켰을 때의 潮流分布로부터 이때의 각 負荷가 받게될 支障電力 및 공급설비가 겪게될 供給넉크의 크기를 計數的으로 신속하게 파

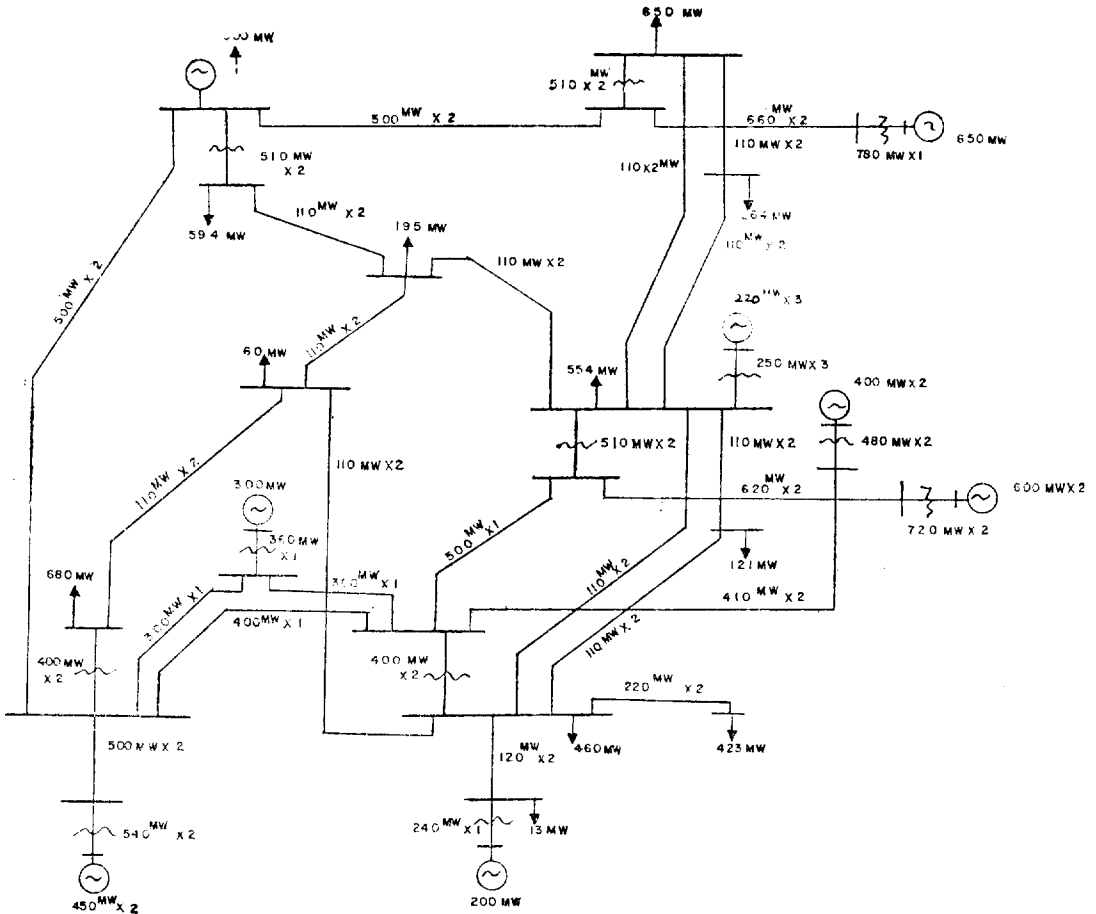


그림 9. 모델系統 및 運轉條件
Fig. 9. Model System and Operation Condition

表 1. 負荷의 供給支障範圍

Table 1. The ranges of demand not served

負點地點	供給支障發生回數(回/年)	1回當平均支障電力(MW)	期間中最大支障電力(MW)
西大邸	1.45	29	206
大邸	1.42	9	31
進永	1.42	3	9
新馬山	1.44	32	107
北釜山	0.95	12	41
釜山	1.00	6	1
釜山	0.98	23	423
鳴藏	0.95	3	11
新蔚山	0.95	15	50
北蔚山	1.53	14	92
浦項	1.47	32	226
融通電力(他地域)	1.45	24	174

表 2. 設備의 供給支障狀況

Table 2. The results of bottleneck

供給設備(MW)	供給支障發生回數	1回當平均超過電力(MW)	期間中最大超過電力(MW)
發電設備			
月城原子力(650×1)	1.43	29	196
古里原子力(600×2)	0.85	32	103
北蔚山火力(400×2)	0.87	20	69
三千浦火力(450×2)	1.39	33	133
三浪津揚水(300×1)	0.89	8	26
釜山火力(209×1)	0.95	5	17
新蔚山火力(220×3)	0.95	17	57
送變電設備			
新馬山-西大邸(345KV)	0.03	158	302
月城-浦項(")	0.01	161	161
古里-新蔚山(")	0.03	1	1
北蔚山-北釜山(")	0.05	18	18
三千浦-新馬山(")	0.03	60	60
三浪津-新馬山(")	0.47	23	44
釜山-北釜山(154KV)	0.05	7	7
大邸-西大邸(")	0.03	35	66
新蔚山-大邸(")	0.01	27	27
新馬山-進永(")	0.02	7	7
北釜山-東釜山(")	0.03	423	423
新蔚山-浦項(")	0.05	11	13
北蔚山-浦項(")	0.06	22	22
月城變電所(780MW)	0.01	111	111
三浪津變電所(360MW)	0.02	8	8
釜山變電所(240MW)	0.05	0	0

약할 수 있도록 하고 있다.

이밖에 本 研究에서 개발된 簡略計算法을 사용해서 翌日運用計劃時에 있어서의 信賴度水準책크 및 문제점 발견시의 對策수립방안에 관한 應用例를 소개해 본다.

일반적으로 각 發電所의 經濟的出力 配分(p_i)은 라그랑주(Lagrange)의 未定乘數法을 이용한 協調方程式을 풀어서 아래와 같이 결정하고 있다.

$$p_i = \frac{1 - \frac{F_{bi}}{\lambda} - 2 \sum_{i \neq m} B_{im} p_m}{\frac{2F_{oi}}{\lambda} + 2B_{ii}} \quad (4.1)$$

但 λ: Lagrange未定乘數

F_{oi}, F_{bi}: 發電費用에 관한 係數

$$(F_i = F_{oi} p_i^2 + F_{bi} p_i + F_{ci})$$

B_{ii}, B_{im}: 損失係數(B定數)

만일 이때 指定된 時間帶에 指定된 電源이나 送電線路에 사고가 일어났을 경우에는 실제로 얼마만한 供給支障이 발생하게 되는가를 사전에 알아둘 필요가 있다 이것은 더 말할것 없이 系統運用者의 입장에서 사전에 필요한 對策을 강구해 두기 위한 것인데 이번에 개발한 프로그램에서는 일부 이것을 수정하여 入力데이터로서 故障發生時間帶 및 故障發生設備를 指定하고 이때의 供給支障범위를 구체적으로 계산할 수 있게 하였다.

그림 10 및 그림 11은 計算結果의 일례로서 前者는 事故發生時間帶(3시, 10시 및 20시)別로 본 支障率을,

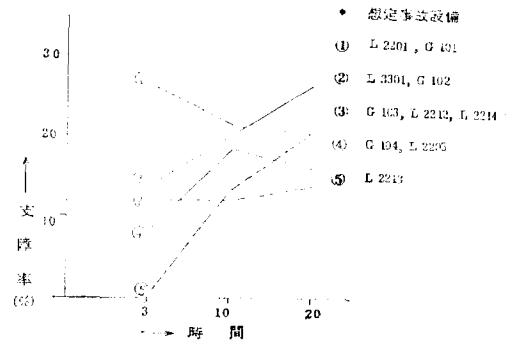


그림 10. 時間帶別로 본 供給支障率
Fig. 10. the rate of demand not served (by hour-bands)

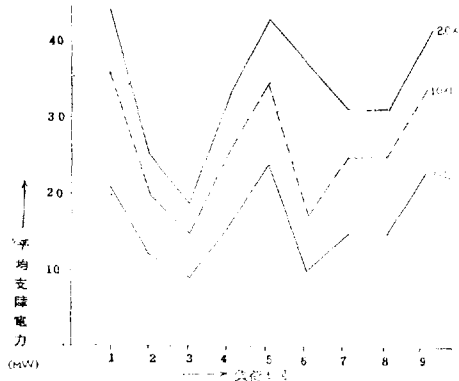


그림 11. 負荷地點別로 본 平均支障電力
Fig. 11. mean value of demand not served (by load points)

後者は 각 負荷地點別로 이러한 사고에 의해서 실제로 받게된 支障電力의 크기를 보인 것이다.

물론 이들은 主要設備의 想定事故에 따른 豫想值이지만 가령 補修計劃이라던가 停電作業計劃을 실시하기 위해서는 이러한 信賴度水準에 관한 事前체크가 실제의 系統運用面에서 實질히 요구되고 있는 것이며 이러한 측면에서도 本節略計算法의 用途를 확대해 나갈 수 있을 것이다.

5. 結 論

이상 本研究에서는 最大flow技法을 이용해서 電力系統의 供給信賴度체크를 신속하게 수행할 수 있는 새로운 供給信賴度算定 알고리즘을 개발하고 다시 이것을 實系統에 適用시키므로써 이것이 小系統간시간면이나 계산내용면에서 系統運用에서의 信賴度制御를 위한 유력한 手段으로서 活用해 나갈 수 있다는 것을 밝힐 수가 있었다.

따라서 本研究結果를 사용해서 系統運用面에 있어서는 信賴度監視시스템의 일부로서 체크를 필요로 하는 時點에서의 信賴度水準을 산정하고 사전에 系統變更이라던가 負荷制限에 관한 예비적인 조치를 강구할수 있는 指針을 제시할 수 있게 되었다. 이밖에 현재 韓電에서 실시중인 自動給電시스템과 관련지워서 보다 종합적인 信賴度制御體系의 구성을 위한 여러가지 문제점을 검토할 수 있었다. 이러한 信賴度制御시스템의 實現은 中央의 電子計算機에 의한 綜合制御라는 형태로 이루어져야 한다는 것은 더 말할 것 없다.

따라서 이 분야의 計算機制御에 필요한 Soft ware 開發擴充은 더욱더 많이 필요할 것이며 특히 이들은

앞으로 보다 종합적이고 효율적인 활용을 기하기 위하여 데이터베이스構成의 기반위에 이루어져야만 할 것이다. 앞으로 하루빨리 系統의 綜合인 自動制御가 실현될 것을 기대하면서 本研究의 成果가 이 분야에 종사하는 關係諸位에게 조금이라도 도움을 줄 수 있다면 더없는 기쁨으로 생각하는 바이다.

끝으로 本研究을 수행하는데 유익한 助言을 많이 하여 주신 韓電系統運用部 黃濯次長, 尹甲求 課長에게 깊이 감사로 드리는 바이다.

參 考 文 獻

1. L.R. Ford, D.R. Fulkerson; "Flows in Networks" Princeton University press. 1962
2. R. Billinton; "Power System Reliability Evaluation" Gordon & Breach science pub. 1970
3. 梅津久保木外; "系統信賴度算定手法에 관한 研究" 日本電力中央研究所 研究報告 No. 67031 1967
4. 電氣事業連合會; "電力輸送部門에서의 綜合電力系統의 供給信賴度" 日本通商省公益事業局 1968
5. 高橋, 福留外; "電力系統의 設備計劃을 위한 信賴度체크프로그램開發" 日本電力中央研究所 研究報告 71085 1972
6. T. MINAKAWA; "Practical Assessment and strategy for Improvement of Dynamic performance of power system" CIGRE Report 32-03 1976
7. 宋吉永; "電力系統計劃의 綜合機械化에 관한 研究" 大韓電氣學會誌 vol. 27, No. 1 1978