

# 線路過負荷 解消를 위한 發電機出力 再配分에 관한 연구

(A Study on Generation Rescheduling for Line Over Load Alleviation)

朴圭弘\*  
(Kyu-Hong Park)

## 요 약

본 논문은 想定事故에 기인한 선로의 過負荷 解消 대책을 수립함에 있어서 가능한 한 負荷遮斷없이 發電力再配分만으로 過負荷解消를 시도하는 새로운 알고리즘을 제시한다.

신속한 發電力 變化分을 계산하기 위하여 선로 過負荷量과 狀態變數( $\theta$ ) 및 狀態變數( $\theta$ )와 發電力 사이의 線形的인 관계를 이용하여 우선 과부하선로 兩端母線 전압의 位相角 變化分을 계산하고 이에 대한 發電力 變化分을 계산하였다. 이 때 모든 Jacobian요소를 계산하지 아니하고 過負荷線路 兩端 母線番號에 해당하는 2列의 요소중 發電機 母線(slack 모선 제외)번호에 해당하는 行의 要素만 구함으로써 최소한의 要素를 이용하여 신속하게 계산토록 하였다.

## Abstract

This paper presents a new algorithm of alleviating line over load in a power system by generation rescheduling alone. This method for relieving the line overloads is based on linearized relationships between line currents and phase angle of bus voltage, and bus injected power and phase angle of bus voltage.

In this paper, a fast algorithm is presented for obtaining only the required Jacobian elements of columns which correspond to two terminal buses of the overloaded line, and of rows which correspond to generation buses.

## 1. 서 론

전력수요의 급격한 증가와 더불어 電力系統에서 事故를 일으킬 수 있는 부분은 대단히 많으며 어느 부분에서 돌발적인 事故가 발생하더라도 이

\*正會員: 大林專門大學 電氣科 副教授·工博, 技術士  
接受日字: 1994年 7月 8日

들 事故가 다른 건전한 부분에 과급되지 않도록 사고 대책이 필요하다. 想定事故중 대표적인 것으로는 線路脫落 사고로서 이 경우 다른 선로의潮流가 변하여 過負荷가 될 수 있다.

線路脫落 想定事故시 선로 過負荷 解消對策으로는 우선 가능한 한 負荷를 차단하지 않고 解消할 수 있는 對策이 요구되며 그 對策으로는 다음과 같은 방법이 있다.

- (1) 發電力 調整에 의한 線路潮流 재배분 방법
- (2) 移相器의 모션전압 位相角制御에 의한 線路潮流 재배분 방법
- (3) 線路切換에 의한 線路 潮流 재배분 방법
- (4) 負荷遮斷 및 母線注入電力 調整에 의한 선로 조류 재배분 방법 등이 있다. 이 중 (1), (2)에 의한 방법이 이상적이나 (1)에 의한 방법은 계산 시간이 문제가 되며 (2)의 방법은 별도의 移相器를 설치해야하는 문제점이 있다.

(3)의 방법은 과부하 선로 이외의 線路 切換에 의하여 과부하선로의 潮流를 감소시켜 解消하는 방법이다.

(4)의 방법은 (1)~(3)의 방법에 의하여 過負荷 解消가 불가능할 경우에 負荷遮斷을 포함하여 母線注入電力을 조정하여 과부하를 解消하는 방법이다. 따라서 본 논문에서는 (1)의 방법에 의한 過負荷 解消對策에 관하여 중점을 두고 계산 속도 향상 및 기억용량을 절감할 수 있는 간단한 알고리즘을 제시코자 한다.

전력계통에서의 선로 과부하는 대개 發電力 再配分을 통하여 解消될 수 있으므로 선로 過負荷 解消문제는 線路潮流와 發電電力 사이의 관계로서 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 P-Q분할법을 사용하여 기본적인 線路過負荷 解消모델을 제시한다.

선로조류 변화는 모션전압의 크기와 位相角의 변화(狀態變數)를 수반하므로 선로과부하 문제는 線路潮流와 狀態變數 사이의 선형적인 관계와 狀態變數와 發電電力 사이의 관계로서 나타낼 수 있다. 또한 有效電力은 모션전압의 크기가 微少量 변동하였을 때 거의 영향을 받지 않으나 모션전압의 位相角의 微少量 변화에는 영향을 받는다는 사실을 이용하여 모션전압의 位相角 변화만을 狀

態變數로 이용하므로써 알고리즘의 간략화를 도모하였다.

따라서 본 논문은 선로 과부하 해소 대책이 過負荷量과 狀態變數 및 狀態變數와 發電電力(모션전력)사이의 선형적인 관계를 이용하여 過負荷를 解消할 수 있는 發電電力 변화분을 계산함에 있어서 모든 Jacobian要素를 구하지 아니 하고 과부하선로의 양단 모션번호에 해당하는 2列의 要素중 發電機 모션번호에 해당하는 行의 要素만 구함으로서 최소한의 要素를 이용하여 發電電力을 계산할 수 있는 알고리즘을 제시한다. <sup>1) 2) 3)</sup>

## 2. 線路潮流와 狀態變數 사이의 관계

線路潮流를 수식적으로 나타내기 위하여 그림 1과 같이 임피던스 Z를 중앙에 집중 시키고 어드미턴스 Y는 2등분해서 선로의 양단에 나누어 준 π형 회로를 이용한다.

이 경우 각 부분의 전압, 전류 및 각 정수를 그림 1과 같이 나타내면 p, q사이의 전류  $I_{pq}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I_{pq} &= (V_p - V_q)Y_{pq} + jB_c V_p \\
 &= [(V_p \cos \theta_p - V_q \cos \theta_q)G_{pq} - (V_p \sin \theta_p - V_q \sin \theta_q)B_{pq} \\
 &\quad - B_c V_p \sin \theta_p] + j[(V_p \sin \theta_p - V_q \sin \theta_q)G_{pq} + (V_p \cos \theta_p \\
 &\quad - V_q \cos \theta_q)B_{pq}] \quad [1]
 \end{aligned}$$

위식과 같이 전류  $I_{pq}$ 는 모션 p, q전압의 크기  $V_p, V_q$  및 위상각  $\theta_p, \theta_q$ 의 함수임을 알 수 있다. 線路過負荷에 직접적인 영향을 미치는 有效分전류  $IR_{pq}$ 는 식(1)에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 IR_{pq} &= (V_p \cos \theta_p - V_q \cos \theta_q)G_{pq} - (V_p \sin \theta_p - V_q \sin \theta_q) \\
 &\quad B_{pq} - B_c V_p \sin \theta_p \quad [2]
 \end{aligned}$$

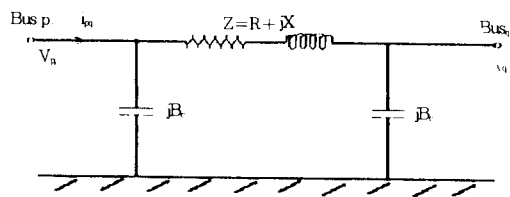


그림 1. π형 회로  
Fig. 1. π Type Circuit

단,  $IR_{pq}$ : 모선 p, q사이에 흐르는 전류의 유효 성분

$G_{pq} + jB_{pq}$ : 모선 p, q사이의 선로 admittance

$B_c$ : 선로 충전 admittance의 1/2

일반적으로 有效電力은 모선전압의 크기가 少量 변동하였을 때 거의 영향을 받지 않으나 모선전압의 位相角의 微小量변화에는 영향을 받는다는 사실을 이용하여 선로過負荷 전류의 有效成分만을 고려하고 이 유효성분에 영향을 주로 미치는 것은 과부하 선로의 양단모선 전압의 相差角이므로 이를 상태변수로 두고 Taylor급수의 전개식에서 2차항 이상을 무시하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta IR_{pq} = \frac{\partial IR_{pq}}{\partial \theta_p} \Delta \theta_p + \frac{\partial IR_{pq}}{\partial \theta_q} \Delta \theta_q \quad (3)$$

$$\Delta IR_{pq} = IR_{pq}^{\max} - IR_{pq}^0 \quad (4)$$

단,  $IR_{pq}^{\max}$ : 모선 p, q사이의 線路容量

$IR_{pq}^0$ : 想定事故시 모선 p, q사이에 흐르는 過負荷線路의 有效電流分

위식을 行列형태로 표시하고 行列[A]의 계수를 나타내면 다음과 같다.,

$$[\Delta IR] = [A][\Delta \theta] \quad (5)$$

$$[\Delta IR] = \begin{bmatrix} \frac{\partial IR_{pq}}{\partial \theta_p} & \frac{\partial IR_{pq}}{\partial \theta_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_p \\ \Delta \theta_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\frac{\partial IR_{pq}}{\partial \theta_p} = -G_{pq}V_p \sin \theta_p - B_c V_p \cos \theta_p - B_c V_q \cos \theta_p \quad (7)$$

$$\frac{\partial IR_{pq}}{\partial \theta_q} = G_{pq}V_q \sin \theta_q + B_c V_q \cos \theta_q \quad (8)$$

行列 [A]는 過負荷線路 갯수와 같은 行을 가지며, 狀態變數와 같은 수의 列(슬랙 모선제외)을 가지는 行列로서 직사각형 모양의 형태로서 일반적인 해법으로는 逆行列이 계산되지 않으므로 다음에 설명하는 pseudo inverse법을 이용한다.<sup>4) 5)</sup>

### 3. Pseudo Inverse법

위 식을  $[F]=[A][S]$ 라고 하면 [A]行列이 직사각형 行列이므로 이의 역행렬  $[A]^{-1}$ 는 존재하지 않는다. 따라서 假想的 逆行列개념을 도입한다. 일반적으로 미지수의 갯수가 m이고 방정식

의 갯수가 n인 수식에서  $m > n$ 일 경우 해를 가지고 있다. 이러한 종류의 식에서 해를 얻을 수 있는 기법이 假想的 逆行列 개념이다.<sup>5)</sup>

$$[F]=[A][S] \quad (9)$$

$$[S]=[A]^{-1}[F] \quad (10)$$

$$[S]=[[A]^T[A]]^{-1}[A]^T[F] \quad (11)$$

$$[S]=[A]^+ [F] \quad (12)$$

여기서  $[A]^+$ 는 [A]의 假想的 逆行列이다.

상기 假想的 逆行列식은 계산하는데 부적합하므로 아래와 같은 방식에 따라 적합하게 변형할 필요가 있다.

$$[A]^+ = [[A]^T[A]]^{-1}[A]^T \quad (13)$$

$$[A]^+ = [A]^+ [[A]^+ ]^T [A]^T \quad (14)$$

또한 상기식은 Penrose condition과 Moore-Penrose pseudo inverse의  $[A]^+ [[A]^+ ]^T = [[A]^+ ]^T [A]^+$ 라는 조건에 의해 다음 식과 같이 변형된다.

$$[A]^+ = [A]^T [[A][A]^T]^{-1} \quad (15)$$

따라서 다음과 같이 계산에 적합한 식으로 변형된다.

$$[S]=[A]^T [[A][A]^T]^{-1} [F] \quad (16)$$

### 4. 發電機出力과 狀態變數와의 관계

線路過負荷를 解消하기 위하여 이로 인한 過負荷線路의 兩端 모선전압의 位相角 變化分을 구한 다음 線路過負荷를 解消하기 위한 發電機出力 變化分  $\Delta P$ 는  $\Delta \theta$ 와의 선형적인 관계를 이용하여 식 (3)과 같이 구할 수 있다. p모선의 發電機出力 變化分  $\Delta P_p$ 는

$$\Delta P_p = \frac{\partial P_p}{\partial \theta_p} \Delta \theta_p + \frac{\partial P_p}{\partial \theta_q} \Delta \theta_q \quad (17)$$

		p	q		
$G_1$			*	*	
$G_2$			*	*	
	*				

그림 2. 발전력 출력변화분  $\Delta P$  계산에 필요한 H행렬의 요소  
Fig. 2. [H]Matrix Terms Required for the Change in Generation

위 식을 일반적인 行列形態로 표시하고 Jacobian [H]의 계수를 나타내면 다음과 같다.

$$[\Delta P] = [H] [\Delta \theta] \quad [18]$$

$$[\Delta P_p] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_p}{\partial \theta_p} & \frac{\partial P_p}{\partial \theta_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_p \\ \Delta \theta_q \end{bmatrix} \quad [19]$$

$$H_{pp} = \frac{\partial P_p}{\partial \theta_p} = -B_{pp} V_p^2 - Q_p \quad [20]$$

$$H_{pq} = \frac{\partial P_p}{\partial \theta_q} = V_p V_q (G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq}) \quad [21]$$

단,  $\Delta P$ : 선로과부하를 해소하기 위한 發電機 출력 變化分

[H]:  $\Delta \theta$ 에 대한 jacobian계수

$B_{pq}$ : 모선에 연결되어 있는 송전선로의 어드미턴스의 허수부의 함

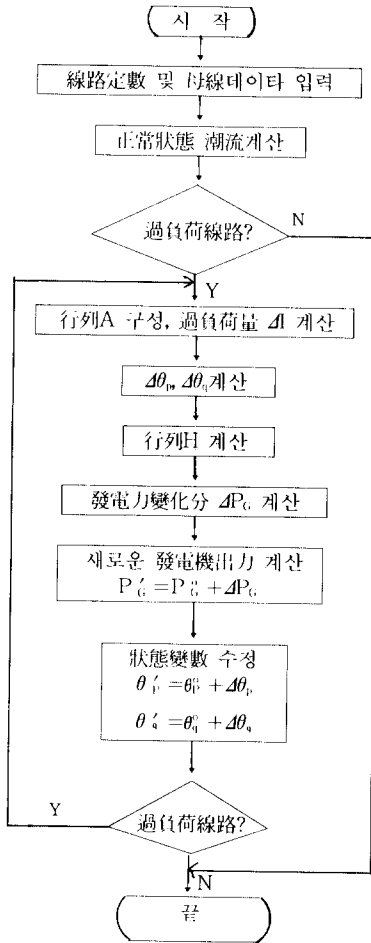


그림 3. 주프로그램 흐름도

Fig. 3. Flow chart of Main Program

$\Delta P$ 를 구하기 위한 H行列의 계수는 모든 要素를 다 구하지 아니하고 그림2와 같이 過負荷 線路 兩端 모선번호에 해당하는 두 列(p, q)의 要素 중 發電機가 접속되어 있는 모선번호( $G_1, G_2$ )에 해당하는 行의 要素만 구함으로써 最小한의 要素를 이용하여 간단히 구할 수 있다.

선로과부하를 해소하기 위한 發電機 出力 變化分  $\Delta P_G$ 를 이용, 發電機 出力制限 조건을 고려하여 發電機 出力을 계산하면 식(22)와 같이 되며, 식(5)에서 계산된 과부하선로의 양단모선전압의 位相角 變化分  $\Delta \theta_p, \Delta \theta_q$ 을 이용하여 모선전압의 位相角을 수정하면 식(23), 식(24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P'_G = P_G + \Delta P_G, \quad 0 \leq P'_G \leq P_G^{\max} \quad [22]$$

$$\theta'_p = \theta_p + \Delta \theta_p \quad [23]$$

$$\theta'_q = \theta_q + \Delta \theta_q \quad [24]$$

단,  $P'_G$ : 線路過負荷를 解消하기 위하여 再配分된 發電機 出力

$P_G$ : 線路過負荷 解消前 發電機 出力

$\theta'_p, \theta'_q$ : 線路過負荷를 解消하기 위해 수정된 모선전압의 位相角

$\theta_p, \theta_q$ : 線路過負荷 解消前 모선전압의 位相角

$P'_G$ 가 發電機 出力의 상한조건을 초과하면  $P'_G$ 를 발전기 출력 상한치에 두고 과부하 해소를 시도하며 완전한 해소가 되지 아니하면 과부하선로 兩端모선전압을 過負荷量 만큼 조정하는 母線注入 電力調整法을 통하여 해소토록 한다.<sup>2)</sup>

發電機 出力 再配分에 의한 선로 過負荷 解消 對策에 관한 흐름도는 그림3과 같다.

### 5. 사례연구

본 논문에서 제시한 알고리즘의 효용성을 입증

하기 위하여 모델계통으로 그림4와 같은 6모선 11선로 시스템을 선정하여 적용하였다. 線路 및 母線데이터는 표1과 같으며 이에 대한 想定事故 對策結果는 표2와 같다.<sup>6) 7)</sup>

표 2에서 알 수 있는 바와 같이 1번 선로 개방 시 4번선로가 122%의 過負荷로 되었으나 發電機 出力 變化分  $\Delta P_{G1}$ ,  $\Delta P_{G2}$ 를 각각 0.123, 0.619만 큼 감소시키면 99%로 해소되었으나 8번 및 10번선로에 새로운 過負荷가 나타났다.

3번, 4번, 7번선로 개방시 모두 6번 선로가 過負荷로 되었으나 본 알고리즘에 의하여 해소되었다. 6번, 10번 11번선로 개방시에는 10번, 6번, 8번선로가 過負荷로 되어 본 알고리즘에 의한 過

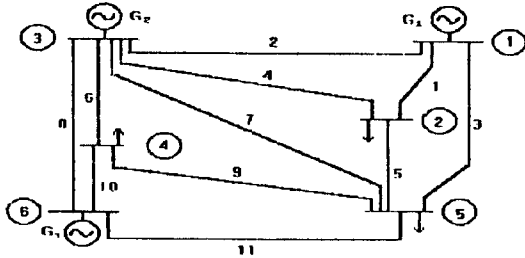


그림 4. 모델 계통도  
Fig. 4. Model System

표 1. 線路 및 母線데이터

Table 1. Line and Bus Input Data (100MVA 기준)

線路番號	母線番號		線路原始임피던스		靜電容量 Y/2(P.U)	線路容量 (P.U)
	부 터	까 지	R(P.U)	X(P.U)		
1	1	2	0.02	0.10	0.01	1.063
2	1	3	0.05	0.25	0.03	1.063
3	1	5	0.12	0.26	0.025	0.647
4	2	3	0.07	0.20	0.025	0.697
5	2	5	0.10	0.30	0.03	0.697
6	3	4	0.05	0.10	0.01	0.647
7	3	5	0.10	0.30	0.02	0.697
8	3	6	0.10	0.20	0.02	0.647
9	4	5	0.20	0.10	0.04	0.647
10	4	6	0.05	0.20	0.02	0.838
11	5	6	0.08	0.30	0.03	0.914

(100MVA 기준)

母線番號	發電出力	母線電壓	負荷電力(P.U)	
	PG(P.U)	V(P.U)	PL	QL
1	0.939	1.07	0.0	0.0
2	0.0	1.0	1.2	0.581
3	1.238	1.05	0.0	0.0
4	0.0	1.0	1.2	0.581
5	0.0	1.0	1.2	0.581
6	0.0	1.05	0.0	0.0

표 2. 想定事故解析結果

Table 2. Result of Contingency Countermeasures

事故線路	過負荷線路番號	過負荷線路潮流 (過負荷量)	兩端母線上位角變化分		發電機 出力 變化分		發電力再分配後 線路潮流 (過負荷量)	비 고
			$\Delta\theta_p$	$\Delta\theta_q$	$\Delta P_{G1}$	$\Delta P_{G2}$		
1	4	.855 (122%)	-.412	-.572	-.123	-.619	.647 (99%)	1번선로 開放에 따른 想定事故 對策결과 새로운 過負荷 발생(8번, 10번선로) 過負荷線路番號8번, 10번은 G3(슬랙모선)에 연결
3	6	.679 (105%)	.204	-.185	-.057	-.382	.542 (84%)	
4	6	.687 (106%)	.246	-.224	-.070	.378	.553 (85%)	
6	10	.969 (116%)	解消不可					2번, 5번, 8번, 9번 선로開放事故시 過負荷線路 발생하지 않음
7	6	.704 (109%)	.357	-.324	-.101	-.549	.498 (77%)	
10	6	1.142 (176%)	解消不可					
	8	.733 (113%)						
11	10	.880 (105%)	解消不可					

負荷 解消를 시도한바 過負荷量은 경감되나 완전한 解消는 되지 않았다.

그 이유는 過負荷 線路가 發電機 出力 調整對象이 아닌 G3(슬랙모션)에 연결되어 있거나(8번, 10선로) 過負荷量이 큰 경우(6번선로)인 것으로 생각된다.

2번, 5번, 8번, 9번선로의 開放事故시에는 過負荷 線路가 발생하지 않았다.

따라서 본 알고리즘의 적용으로 過負荷가 解消되지 아니하면 過負荷線路 兩端母線電力을 過負荷量만큼 조정하는 母線注入電力調整法을 이용토록 하였다.

## 6. 결 론

본 논문은 想定事故에 기인한 선로의 過負荷 解消 대책을 수립함에 있어서 가능한 한 부하차단 없이 發電力 再配分만으로 過負荷 解消를 시도토록 하고있다.

신속한 發電力 變化分을 계산하기 위하여 선로 過負荷量과 狀態變數( $\Delta\theta$ ) 및 狀態變數( $\Delta B$ )와 發電力 사이의 線形的인 관계를 이용하여 우선 過負荷線路 兩端母線 전압의 位相角 變化分  $\Delta\theta_p$ ,  $\Delta\theta_g$ 를 계산하고 이에 대한 發電力 變化分을 계산하였다. 이 때 모든 Jacobian요소를 계산하지 아니하고 과부하선로 양단 모션번호에 해당하는 2열의 要素중 發電機 母線(slack모션 제외)번호에 해당하는 行의 要素만 구함으로서 최소한의 要素를 이용하여 신속하게 계산토록 하였다.

## 참 고 문 헌

- 1) 朴圭弘, 鄭在吉, 安敏玉, "母線注入電力 調整에 의한 過負荷 解消 알고리즘", 大韓전기학회지, Vol.39, No.2, pp. 111-1184, 1990
- 2) 朴圭弘, 鄭在吉, "線路 切換에 의한 過負荷 解消 알고리즘", 大韓전기학회지, Vol.41, No.5, pp.459-467, 1992
- 3) T.K.P Medicherla, R. Billinton, M.S Sachdev, "Generation Rescheduling and Load Shedding to Alleviation Overload-Analysis" IEEE Vol.Pas-98, No.6, pp.1876-1884, Nov./Dec. 1979
- 4) T.K.P Medicherla, R. Billinton, M. S Sachdev, "Generation Rescheduling and Load Shedding to Alleviation Overload-System Study" IEEE Vol.Pas-100, No.1, pp.36-42, January. 1981
- 5) Petkov, Christov and Kostantinov, "Computaional Methods for Linear Control Systems", Prentice Hall, pp.64-65, 1991
- 6) A.J.Wood, "Power Generation, Operation and Control", John Wiley, pp.368-373, 1984
- 7) 朴圭弘, 白泳駿, 鄭在吉, "發電力再配分에 의한 過負荷 解消 알고리즘", 大韓전기학회 하계학술대회, 1974, 7

## ◇ 著 者 紹 介 ◇



박 규 흥(朴圭弘)

1952年 2月 2日生. 1974年 嶺南大學 校 電氣工學科 卒. 1978年 同 大學 院 電氣工學科 卒 (碩士). 1987年 中央大 大學院 電氣工學科 卒 (博士). 現在 大林專門大學 電氣科 教授 發送配電技術士