

系統事故時 障害輕減을 위한 緊急制御 알고리즘에 관한 研究

A Study on the Emergency Control Algorithm for Viability Crisis of Power System

宋 吉 永* · 李 禧 永**
(Kil-Yeong Song · Hee-Yeong Lee)

요 약

중대사고에 기인한 초기의 과도기가 종료된 이후 전력 계통은 과급사고의 가능성이 있는 위기잔존 (viability crisis) 상태하에 놓이게 된다. 본 논문에서는 이러한 위기잔존 상태에서 발생하는 계통주파수와 모선전압 장애를 경감시키기 위한 긴급제어 알고리즘을 제시하였다. 본 알고리즘에서는 장애 경감을 위한 수단으로 부하차단이나 발전력 재분배를 실시할 경우 부효전력 조정설비의 제어효과를 고려하도록 하였다. 여기에서는 문제를 주파수제어와 전압제어 두가지로 나누고 먼저 계통주파수가 정격치로 부터 벗어난 편차를 최소화 시키는 副問題I 과 부하모선의 전압 위반치를 최소화하는 副問題II 로 나누어 처리하였다.

최적화기법으로는 많은 제약조건을 용이하게 처리할 수 있는 reduced gradient 법을 이용하였다.

제시한 알고리즘을 IEEE 14모선 계통에 적용하여 본 결과 위기잔존 상태하의 계통장애를 효과적으로 경감시킬 수 있음이 입증되었다.

Abstract-After the short-term dynamics due to the major disturbance are over, the power system may lead to viability crisis state wherein there is possibility of cascading damage. This paper presents an emergency control algorithm to alleviate the obstacles of system frequency or bus voltage during the viability crisis state. The algorithm considers the effects of controlling reactive power sources for load shedding and generation reallocation in order to alleviate the obstacles. The problem is decomposed into a subproblem I and a subproblem II. The former minimizes system frequency deviation from nominal value and the latter voltage violation of load buses. The optimization problem is solved by a reduced gradient technique which can handle a great number of inequality constraints more easily. It has been verified that the use of the proposed algorithm for IEEE 14 bus system alleviates the obstacles efficiently during the viability crisis.

1. 序 論

* 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
** 正 會 員 : 全州工業專門大 電算科 專任講師
接受日字 : 1988年 1月 27日
1次修正 : 1988年 7月 11日

발전기 脱落이나 線路事故등의 중대한 系統事故 발생시 계통의 保護계전기가 신속하게 동작하여 事故系統의 초기 安定化를 도모한다. 이와같은 초기

의 安定度 危機 경과후 비교적 事故波及 속도가 완만한 危機殘存 狀態(viability crisis)⁶⁾가 지속될 경우 부하의 강제차단 또는 발전력 재분배등의 緊急 制御를 실시하므로써 계통의 障害(주파수 異常, 선로의 過負荷, 부하모선의 電壓異常)를 경감시키고 저하는 여러 방안이^{3),5),6),7)} 연구되어 왔다.

종래의 연구에서는 유효전력의 需給平衡에 의한 계통 주파수 회복을 制御의 우선적인 목표로 설정하고 부하모선의 電壓安定을 위한 電壓障害 輕減 制御時 無効電力源을 직접 제어 하는 대신 負荷遮斷에 전적으로 의존하는 방식을 이용하였다.^{3),5),6),7)} 이러한 방식에서는 系統事故이후 전압장애와 관련되어 실시하는 無効電力源의 制御效果가 포함되지 않은 상태에서 負荷遮斷量을 결정하기 때문에 解의 實用性이 문제시 된다.

본 연구에서는 상기의 문제점을 해결하기 위하여 無効電力 調整設備를 制御變數에 추가로 도입하고 주파수 장애와 함께 전압장애와 관련된 有効電力및 無効電力 制御를 종합적으로 처리 할 수 있는 系統 障害輕減 制御 알고리즘을 개발하였다.

또한 부하의 電壓·周波數 特性和 발전기의 調速機 靜的應動 特性을 반영시킨 조류계산법²⁾을 이용하여 系統動搖이후 準動的(Semi-dynamic) 要素¹⁾가 系統解折에 미치는 영향도 고려할 수 있도록 하였다. 본문제의 최적화기법으로는 reduced gradient 法^{4),9)}을 사용하였으며 또한 이 방법에서 중요문제가 되고 있는 適正 step 決定에 대해서는 종래의 潮流法⁴⁾ 대신 感度行列을 이용하여 計算所要時間을 단축하도록 하였다. 사례연구로는 IEEE 14모선 20선로 모델계통에 본 알고리즘을 적용하여 그 有用性을 검증 하였다.

2. 系統의 障害輕減문제

2.1 문제의 定式化

系統事故에 기인하여 발생한 系統障害를 경감시키는 문제는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

목적함수 $G(\mathbf{X}_{P,r}, \mathbf{X}_{Q,v})$

$$= \left(\frac{f_s - f}{B_r} \right)^2 + \sum_i^n \left(\frac{V_{B_i} - V_i}{B_i} \right)^2 \quad (1)$$

제약조건 $\mathbf{g}_p(V, \theta, \Delta f) = 0$

$$\mathbf{g}_q(Q, \theta, \Delta f) = 0$$

$$\mathbf{X}_{P,\phi} \leq \mathbf{X}_{P,\phi} \leq \bar{\mathbf{X}}_{P,\phi} \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_{Q,\phi} \leq \mathbf{X}_{Q,\phi} \leq \bar{\mathbf{X}}_{Q,\phi}$$

$$\mathbf{U}_P \leq \mathbf{U}_P \leq \bar{\mathbf{U}}_P$$

$$\underline{U}_Q \leq U_Q \leq \bar{U}_Q$$

단, f_s : 계통의 정격 주파수(p.u.Hz)

f : 계통의 주파수(p.u.Hz)

V_{B_i} : 부하모선 i 의 기준운전전압크기¹⁰⁾

V_i : 부하모선 i 의 전압크기

B_r, B_v : 基準値로 부터 주파수와 전압의 허용폭

V, θ : 모선 전압과 위상각의 벡터

Δf : 계통의 주파수 편차

$\mathbf{g}_p(\cdot), \mathbf{g}_q(\cdot)$: 각 모선의 유효전력과 무효전력 수급평형 방정식²⁾

앞서의 식 (2)에서 벡터 $\mathbf{U}_P, \mathbf{U}_Q, \mathbf{X}_P, \mathbf{X}_Q$ 를 정의하면 다음과 같다.

$$\mathbf{U}_P = [P_{L1} \cdots P_{Ln} \ P_{G1} \cdots P_{Gm}]^T$$

$$\mathbf{U}_Q = [V_{G1} \cdots V_{Gm} \ Q_{C1} \cdots Q_{Cnc} \ n_1 \cdots n_{nt}]^T$$

$$\mathbf{X}_P = [\Delta f \ ; \ \phi_1 \cdots \phi_l]^T = [\mathbf{X}_{P,r} \ ; \ \mathbf{X}_{P,\phi}]^T$$

$$\mathbf{X}_Q = [Q_{G1} \cdots Q_{Gm} \ ; \ V_1 \cdots V_n]^T = [\mathbf{X}_{Q,G} \ ; \ \mathbf{X}_{Q,v}]^T$$

단, P_{G_i} : 조속기 靜的應動특성을 고려한 i 발전기 유효전력 출력²⁾

P_{L_i} : 전압·주파수 특성을 고려한 i 모선 부하의 유효전력²⁾

$n_i; Q_{C_i}, V_{G_i}$: i 번째 LRC(부하시 탭조정장치) 비공칭탭, SC, SR (shunt capacitor 및 reactor), 발전기 전압크기

ϕ_i : i 선로의 최대허용전류에 대응한 선로양단 모선의 전압위상각차³⁾

Q_{G_i} : i 발전기모선의 발전기 무효전력 출력

첨자 n, m, l, nt, nc : 부하모선수, 발전기모선수, 선로수, LRC의 수, SC, SR의 수

$(\cdot), (\cdot)$: 상한치, 하한치

여기서 V_{B_i} 는 계통손실을 최소화 한다는 전제하에 결정된 각 부하모선 전압¹⁰⁾으로서 미리 구해 놓은 값을 그대로 이용하는 것으로 한다. 또한 P_{G_i} 와 P_{L_i} 는 調速機의 靜的應動特性, 負荷의 電壓·周波數特性에 종속되는 표현식²⁾을 이용 하는데 이는 동요발생 이후의 계통해석에 중요시 되는 準動的(semi-dynamic) 要素의 영향을 고려하기 위함이다.

이상과 같이 설정된 문제는 (2)식의 제약조건 하에서 (1)식의 목적함수를 최소화하는 제어변수 $\mathbf{U}_P, \mathbf{U}_Q$ 를 구하는 문제로 볼 수 있다.

2.2 문제의 分割

본연구에서는 앞서의 문제를 효율적으로 해석하기 위해 주파수 전압장애와 관련된 副問題 I 과 副問題 II로 분리하여 2레벨 反復收斂型의 문제로서 解를 구하도록 기본방침을 정하였다.

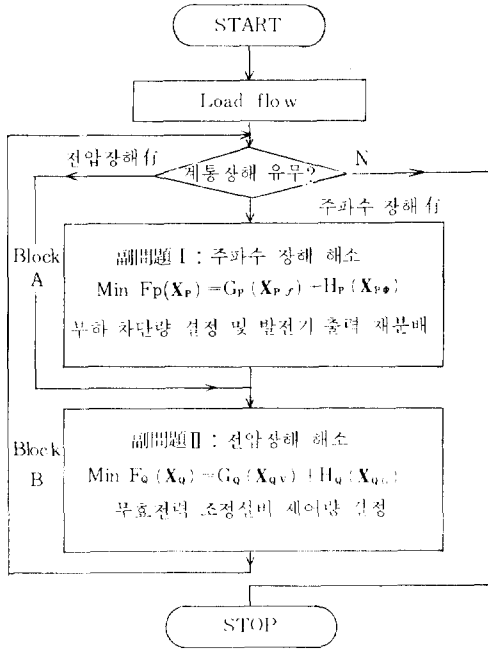


그림1 알고리즘의 흐름도
Fig.1 Flow chart of algorithm.

그림 1은 제시한 알고리즘의 흐름도를 표시하며 첫번째 레벨인 副問題 I에서는 주파수 장애를 해소 시키도록 하는 부하차단량의 결정 및 발전력의 재분배를 행하고 두번째 레벨인 副問題 II에서는 부하모선의 전압장애를 해소시키는 무효전력 조정설비의 제어량을 결정한다.

2.2.1 副問題 I

副問題 I에서는 系統電壓의 변화가 없는 것으로 가정하고 아래와 같이 계통의 주파수 偏差를 최소화 시키는 문제로 정식화 한다.

$$\text{목적함수 } G_p(\mathbf{X}_{p,f}) = \left(\frac{f_s - f}{B_f} \right)^2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건 } & \mathbf{g}_p(V, \theta, \Delta f) = \mathbf{0} \quad (V \text{는 일정}) \\ & \underline{U}_p \leq U_p \leq \bar{U}_p \\ & \underline{X}_{p,\phi} \leq X_{p,\phi} \leq \bar{X}_{p,\phi} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 $X_{p,\phi}$ 에 관한 제약조건은 SUMT⁹⁾의 방법에 의해서 식 (5)와 같은 penalty function으로 표현 가능하며,

$$\begin{aligned} H_p(\mathbf{X}_{p,\phi}) &= \sum h_{p,j}(X_{p,\phi_j}) \quad j=1, 2, \dots, l \\ h_{p,j}(X_{p,\phi_j}) &= \begin{cases} W_{p,j}(X_{p,\phi_j} - \bar{X}_{p,\phi_j})^2 & \text{if } X_{p,\phi_j} > \bar{X}_{p,\phi_j} \\ W_{p,j}(X_{p,\phi_j} - \underline{X}_{p,\phi_j})^2 & \text{if } X_{p,\phi_j} < \underline{X}_{p,\phi_j} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

단, $W_{p,j}$: weighting factor
식(5)를 식(3)에 결합하므로써 확대목적함수를 (6)식과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{목적함수 } F_p(\mathbf{X}_p) = G_p(\mathbf{X}_{p,f}) + H_p(\mathbf{X}_{p,\phi}) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건 } & \mathbf{g}_p(V, \theta, \Delta f) = \mathbf{0} \quad (V \text{는 일정}) \\ & \underline{U}_p \leq U_p \leq \bar{U}_p \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 副問題 I은 $X_{p,\phi}$ 의 제약조건이 소거된 식 (7)의 제약조건 하에서 식(6)을 최소화시키는 U_p 를 구하는 문제로 요약된다.

2.2.2 副問題 II

副問題 II에서는 계통주파수와 모선의 電壓 位相角의 변화가 없다는 가정하에 다음과 같이 부하모선의 基準電壓으로부터의 電壓偏差의 승을 최소화시키는 제어변수 벡터 U_q 를 구하는 문제로 정식화 한다.

$$\text{목적함수 } G_q(\mathbf{X}_{q,v}) = \sum_j^n \left(\frac{V_{q,j} - V_j}{B_v} \right)^2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건 } & \mathbf{g}_q(V, \theta, \Delta f) = \mathbf{0} \quad (\theta, \Delta f \text{는 일정}) \\ & \underline{U}_q \leq U_q \leq \bar{U}_q \end{aligned} \quad (9)$$

$$\underline{X}_{q,c} \leq X_{q,c} \leq \bar{X}_{q,c}$$

(9)식에서 상태변수 벡터 $X_{q,c}$ 에 관한 제약조건식은 앞서의 副問題 I에서와 같은 방법으로 (10)식과 같이 표현할 수 있으며

$$\begin{aligned} H_q(\mathbf{X}_{q,c}) &= \sum h_{q,j}(X_{q,c_j}) \quad j=1, 2, \dots, m \\ h_{q,j} &= \begin{cases} W_{q,j}(X_{q,c_j} - X_{q,c_j})^2 & \text{if } X_{q,c_j} < \underline{X}_{q,c_j} \\ W_{q,j}(X_{q,c_j} - \bar{X}_{q,c_j})^2 & \text{if } X_{q,c_j} > \bar{X}_{q,c_j} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

단, $W_{q,j}$: weighting factor

위 (10)식을 (8)식에 결합시킨 확대목적함수는 (11)식과 같이 정의된다.

$$\text{목적함수 } F_q(\mathbf{X}_q) = G_q(\mathbf{X}_{q,v}) + H_q(\mathbf{X}_{q,c}) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건 } & \mathbf{g}_q(V, \theta, \Delta f) = \mathbf{0} \quad (\theta, \Delta f \text{는 일정}) \\ & \underline{U}_q \leq U_q \leq \bar{U}_q \end{aligned} \quad (12)$$

실국 副問題 II는 식(12)의 제약조건하에서 (11)식을 최소화시키는 U_q 를 구하는 문제로 요약할 수 있다.

2.3 Reduced Gradient法⁴⁾에 의한 最適化

앞서의 副問題 I · II의 해법으로 制約條件의 처리가 용이한 Reduced Gradient法을 이용한다. 앞서의 (6), (11)식에서 제어변수 U_p, U_q 에 대한 $F_p(\mathbf{X}_p), F_q(\mathbf{X}_q)$ 의 Gradient는 $X_{p,\phi}, X_{q,c}$ 의 상하한 한계에 관

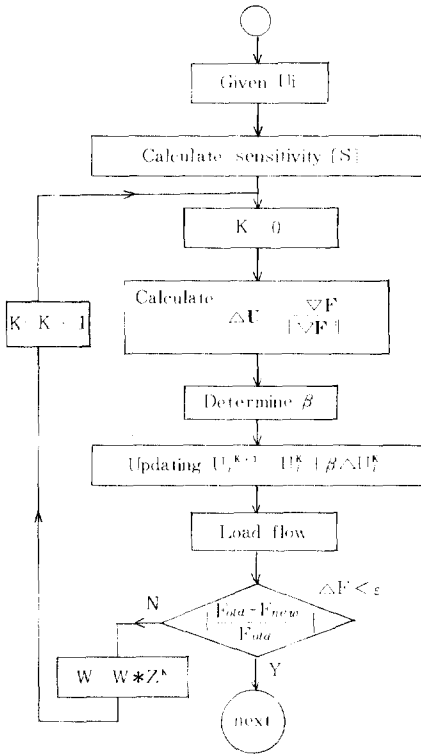


그림2 그림1의 Block A, B 흐름도
Fig.2 Flow chart of block A, B for Fig.1

과정에서 解의 수렴이 늦거나 최악의 경우 발산, 진동하는 경우가 있게 된다. 이것은 그림 2의 Block B에서 계산초기에 구해 놓은 感度行列을 Step Size β 계산시에 계속 사용하는데 기인하는 경우와 (24)식의 w와 z의 선정이 부적당한 경우를 생각할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 경우에 대비하여 제어

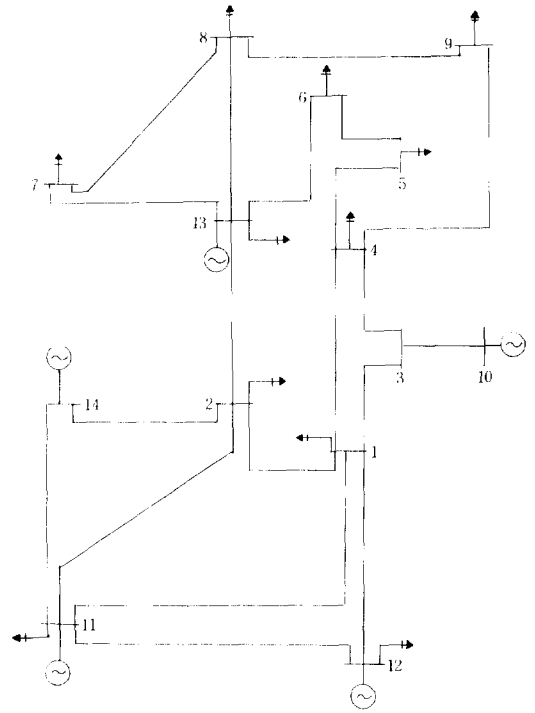


그림3 IEEE - 14 모선계통
Fig.3 IEEE 14 bus system

변수 U의 수정값이 비교적 커지면 β 계산시 感度行列을 재계산하도록 하였으며 w, z는 계통상태에 종속되는 점을 감안하여 시행착오적 방법으로 구하였다. 또한 解의 진동을 방지하는 방법으로는 계산 Step이 바뀔 때 부호가 변하는 reduced-gradient vector의 해당요소를 작게 하는 인위적인 방법⁴⁾도 고려하였다.

표 1 모델 시스템의 發電機 運轉條件과 負荷特性

Table 1 Operating condition of generator and Load characteristics for model system.

발전기 모선	출력지정치 $P_{set} [p.u]$	유효전력출력		무효전력출력		조속기 속도조정율	부하특성
		상한 P_c	하한 P_c	상한 Q_c	하한 Q_c		
Bus 10	0.28	0.4	0.1	0.24	-0.06	0.05	$k_f=0.04$
Bus 11	0.41	0.55	0.15	0.5	-0.4	0.05	$P_r=0.8$
Bus 12	0.14	0.2	0.06	0.4	0.0	0.05	$P_p=0.2$
Bus 13	0.2	0.3	0.1	0.24	-0.06	0.05	$P_z=0.0$
Bus 14	1.67	2.5	0.8	1.0	-2.0	0.05	

100MVA 기준

k_f : 부하의 주파수 특성

P_c : 일정 전력 부하 비율

P_p, P_z : 각각 부하의 1, 2승에 비례하는 부하 비율

표 2 無効電力 調整設備 運用條件

Table 2 Operating condition of reactive power sources.

구분 \ 변수	부효 전력 조정 설비									
	$n_{1,3}$	$n_{1,4}$	$n_{2,13}$	Q_{c5}	Q_{c9}	V_{G10}	V_{G11}	V_{G12}	V_{G13}	V_{G14}
초기치	1.095	1.046	1.033	0.0027	0.0018	1.057	1.027	1.025	1.052	1.024
상한치	1.1	1.1	1.1	1.1	0.05	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
하한치	0.9	0.9	0.9	0.0	0.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

표 3 발전기 脫落사고 cases에 대한 제어 결과

Table 3 Result after control for cases of generators outage.

case No	case 내용	중 발전력의 (%)	주파수 (Hz)		전압강해 $\sum(\Delta V)^2$	
			제어 이전	제어 이후	제어 이전	제어 이후
1	전원 탈락 이전 상태	0	60.0			
2	모선 12 전원 탈락	5	59.92	60.00	0.0	0.0
3	모선 10 전원 탈락	10	59.76	59.97	2.5×10^{-5}	0.0
4	모선 11 전원 탈락	15	59.63	60.01	0.09	0.0
5	모선 14 전원 탈락	20	59.08	60.01	1.1083	0.0

표 4 각 case 별 제어 실시 이후의 母線電壓

Table 4 Bus voltages after control for each case.

모선번호	모선 전압 (p.u)				
	기준전압	case 2	case 3	case 4	case 5
1	1.003	1.0022	0.9942	0.9983	1.0034
2	1.002	1.0087	0.9949	0.9991	1.0038
3	1.038	1.0189	1.0100	1.0340	1.0345
4	1.020	1.0047	0.9981	1.0185	1.0185
5	1.018	1.0045	0.9998	1.0194	1.0185
6	1.031	1.0193	1.0215	1.0354	1.0327
7	1.036	1.0251	1.0341	1.0422	1.0379
8	1.030	1.0183	1.0261	1.0351	1.0310
9	1.006	0.9935	0.9920	1.0097	1.0077
10	1.057	1.0268	1.0100	1.0594	1.0540
11	1.027	1.0440	1.0269	1.0117	1.0171
12	1.025	0.9991	1.0242	1.0030	1.0152
13	1.052	1.0400	1.0510	1.0561	1.0514
14	1.024	1.0683	1.0237	1.0371	1.0447

2.4 事例研究 및 檢討

본 연구에서 제시한 알고리즘을 그림3과 같은 IEEE14모선 20선로 모델 계통에 적용하였다.

모델계통의 發電機 出力, 調速機 調整率 및 負荷의 周波數 · 電壓特性은 표 1에, 無効電力 調整設備 運用條件은 표 2에 나타낸 값으로 각각 지정하였다.

한편 본 연구에서는 總系統電力의 5~20(%)에 해당하는 電源脫落 事故를 상징하고 이때 系統에서 발생하는 障害를 경감시키기 위한 制御 이후의 결과를 표 3에 나타내었다. 이때 基準運轉 電壓 V_{Bt} 로 부터의 전압 허용폭 B_v 는 $\pm 3(\%)$, 周波數 許容 偏差 B_f 는 $\pm 0.1(\%)$ 로 지정하고 w 와 z 는 각각 10

과 1.5로 주었다.

표 3에서 보면 각각의 電源脫落 사고시 周波數 障害가 발생하였지만 制御 結果 허용값인 60 ± 0.06 (Hz) 이내로 회복되어지며 負荷母線 電壓 역시 표 4에 보인바와 같이 基準電壓을 중심으로 하여 미리 지정한 허용폭 $\pm 3(\%)$ 이내로 유지됨을 알 수 있다. 표 5는 解의 수렴과정을 나타낸 것으로서 각각의 사고 case에 대해서 안정된 수렴성을 보여주고 있다.

앞서의 여러가지 제어 case에 대한 한 사례로서 case5의 경우 負荷遮斷量 및 發電力 再分配값을 표 6에 보였다.

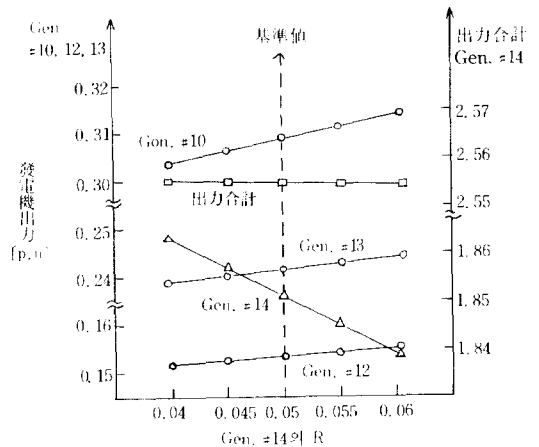


그림4 發電機 #14의 R變化에 따른 發電力 再分配 (outage CASE #4의 경우)

Fig.4 Generations redistribution for different R of Gen. #14 (outage CASE #4)

표 5 각 case 별 收斂過程에 따른 F_p, F_q 값과 X_p, X_q 의 制約狀態

Table 5 The value of F_p, F_q and constraint condition of X_p, X_q by convergent process for each case.

case	구분	반복 step 횟수						** 중요요시간(분)
		1	2	3	4	5	6	
case2	F_p	1.47768	0.3195×10^{-4}	0.6676×10^{-3}				1.35
	F_q	8.9547	7.4956	1.3069	2.2321	0.9496	0.6964	
	X_p	(×)	(○)	(○)				
	X_q	(×)	(○)	(○)	(×)	(○)	(○)	
case3	F_p	0.1294×10^2	0.2337×10	0.3865×10^{-4}	0.6226×10^{-3}			1.4
	F_q	0.12514×10^2	1.4468	1.0965	0.3991	0.3441		
	X_p	(×)	(×)	(○)	(○)			
	X_q	(×)	(×)	(×)	(○)	(○)		
case4	F_p	0.3204×10^2	0.9808×10	0.8721×10^{-1}	0.6827×10^{-6}	0.3169×10^{-3}	0.1902×10^{-4}	1.65
	F_q	8.2421	1.4420	1.1732	0.61949	0.40908		
	X_p	(×)	(×)	(○)	(○)	(○)	(○)	
	X_q	(×)	(×)	(×)	(○)	(○)		
case5	F_p	0.4955×10^2	1.3306×10^2	0.2702×10	0.7938×10^{-1}	0.1556×10^{-3}	0.2223×10^{-3}	1.5
	F_q	7.1734	7.7615	0.1890	0.1357			
	X_p	(×)	(×)	(×)	(○)	(○)	(○)	
	X_q	(×)	(×)	(○)	(○)			

* (○) : 제약조건을 만족한 상태 **PDP 11/24 기준
(×) : 제약조건이 위배된 상태

표 6 負荷遮斷量과 發電力 再分配의 일례 (case5)
Table 6 A case of load curtailed and redistribution of generation (case5).

모선 번호	사고 이전 상태 (유효전력)		제어후 결과		부하 차단량	발전력 증감
	부하	발전력	부하	발전력		
1	0.4778		0.4003		7.75×10^{-2}	
2	0.0759		0.0323		4.36×10^{-2}	
3	0.0		0.0		0.0	
4	0.2950		0.2962		0.0	
5	0.090		0.0457		4.43×10^{-2}	
6	0.0350		0.0052		2.98×10^{-2}	
7	0.0610		0.0313		2.97×10^{-2}	
8	0.1350		0.0684		6.66×10^{-2}	
9	0.1490		0.0749		7.41×10^{-2}	
10	0.0	0.2801	0.0	0.32372		4.36×10^{-2}
11	0.2169	0.4040	0.2175	0.45134		4.73×10^{-2}
12	0.9420	0.1379	0.9416	0.15282		1.49×10^{-2}
13	0.119	0.2168	0.1120	0.24861		3.18×10^{-2}
14	0.0	0.6850	0.0	1.09617		
합계	2.59	2.6786	2.2267	2.2727	0.3636	0.1376

한편 適正 optimum factor λ^* 결정시 潮流計算法과 感度法을 비교하기 위해서 Ward-Hale6 모선 계통과 IEEE14 모선 계통에 대해 각각 초기의 계

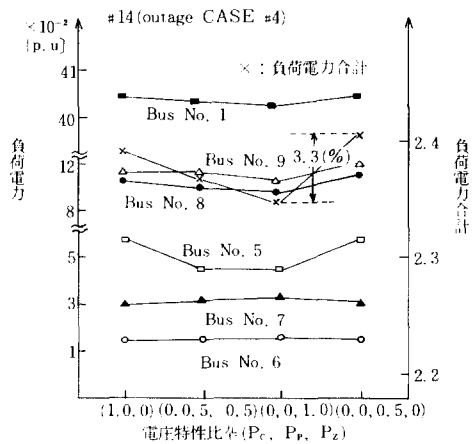


그림5 負荷의 상이한 電壓特性에 대한 負荷電力變化 (outage Case #3)

Fig.5 Load power change to different voltage characteristic of load (outage Case #3)

통조건을 적용하여 계산한 결과를 표 7에 나타내었다. 총계산소요 시간면에서 양방법을 비교해보면 感度法이 우수함을 알 수 있으며 解의 精度面에서도 感度法에 의한 값이 潮流計算에 의한 값을 크게 벗어나지 않아 瞬時運用의 측면에서 볼 때 感度法을

표 7 λ^* 결정방법의 비교 (초기 계통 조건 적용)
 Table 7 The comparison of λ^* determination methods (initial system condition is used).

적용계통	λ^* 결정 방법	반복횟수	총 계산 소요시간(분)
Ward-Hale	감도행렬법	5	0.33
6모선 계통	조류계산법	5	0.67
IEEE-14	감도행렬법	6	0.90
모선 계통	조류계산법	5	2.08

*PDP 11/24 사용시

** 여기서는 부분제1의 step은 解를 위해 필요하지 않았음.

이용하여 λ 값을 구하는 것이 보다 유리함을 알 수 있다.

그밖에 본 연구에서는 發電機의 調速機 應動特性과 負荷의 電壓·周波數 特性등의 Semidynamic 要素가 障害系統의 制御에 미치는 영향을 파악하기 위해서 調速機의 調整率 R과 負荷의 電壓特性에 각각 변화를 주어 여러가지 경우에 대해 검토하고 그 일례를 그림4와 그림5에 도시하였다. 그림4에서는 調整率 R이 감소됨에 따라 出力分擔率이 커지게 되는 것으로 나타나 viability crisis 상태에서 調整率 R이 發電力 再分配를 좌우하는 변수중의 하나임을 알 수 있다. 또한 그림5에서 負荷의 電壓特性 비율이 變함에 따라 負荷電力이 약간씩 변동하고 있는데, 그 변동의 최대폭이 基準 負荷電力의 3.3(%)에 이르러 系統制御時 負荷의 電壓特性을 반영시키므로서 더욱 실제에 가까운 制御를 실현시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3. 結 論

본 연구의 성과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 事故波及의 위험이 잔존하는 系統障害 발생시 無効電力 調整設備의 制御動作를 감안한 負荷遮斷量 결정과 發電力 再分配를 실시할 수 있도록 하였다. 이에따라 負荷遮斷과 發電力 再分配 이후 별도의 電壓·無効電力 制御를 하지 않더라도 周波數 障害解消와 병행하여 電壓障害가 해소되도록 하였다.

(2) gradient法에서 主要因子가 되는 適正 λ^* 값 계산시 종래의 潮流計算에 의하여 λ^* 를 계산하는 대신 感度行列을 이용하므로서 계산시간을 단축시킬 수 있었다.

(3) 負荷의 周波數 特性과 發電機 調速機 特性을 고려한 潮流計算을 이용하여 系統動搖 이후 系統

解析에 중요한 Semi-dynamic 要素의 영향을 반영시키므로서 系統解析을 더욱 실제에 가깝도록 하였다.

(4) 電壓障害 解消와 관련하여 손실을 最小로 하는 基準運轉電壓을 制御 目標值로 채택하므로서 緊急制御時에 경제적인 系統運用을 꾀할 수 있도록 하였다.

(5) 본 연구는 系統 安全狀態의 先行決定과 非常時의 事故波及 防止에 유용할 것으로 기대되며 앞으로 電壓의 不安定 特性까지 고려한 無効電力源의 制御와 관련시켜 연구를 진행시킬 계획이다.

참 고 문 헌

- 1) 송길영 "最適負荷制限方式의 適用에 關한 研究" 대한 전기학회지. vol.24, No.2, 1975.
- 2) M. Okamura et al., "A New Power Flow Model and Solution Method," IEEE Trans. on Power Apparatus and System, vol PAS-94, no.3, pp 1042-1052, 1975.
- 3) S.M. Chan et al., "A Solution of the transmission limited dispath problem by sparse linear programming", IEEE TPAS, vol. PAS-98, no.3, pp 1044-1053, 1979.
- 4) Raymond R.Shoult et al., "Optimal power flow based upon P Q decomposition", IEEE TPAS, vol. PAS-101, no.2, Feb., 1982.
- 5) Ueda et al., "Optmal load Shedding as Emergency contol of power System," CRIEPI Rep. no. 183009, 1983.
- 6) A Kuppurajula, "An Emergency control algorithm for realtime application", IEEE TPAS, vol. PAS-104, no.6, 1985.
- 7) K.A.Palanisway et al, "Optimal Load Shedding taking into account of voltage and frequency characteristic of load," IEEE TPAS, vol PAS-104, no.6, 1985.
- 8) C.H. Jolissaint et al., "Decomposition of Real and Reactive Power Flow," IEEE TPAS, vol PAS-91, no.2, pp 661-670, 1972.
- 9) Fiacco, Mc Cormick, Nonlinear Programming Sequential Unconstrained Minimization Techniques", Wiley and Sons, New York, 1968.
- 10) 給電常設專門委員會 "電力系統의 電壓安定維持對策", 電氣學會技術報告(II部), 第73號 日本電氣學會, 1979.
- 11) Y. Tamura et al., "Relationship Between voltage instability and multiple Load flow Solutions in Electric Power Systems" IEEE TPAS, vol. PAS-102, no.5, May, 1983.

부록 1

감도행렬 \$S_f, S_\theta, S_v, S_q\$의 계산

(15)식에서 \$\Delta Q\$와 \$\Delta \theta, \Delta(\Delta f)\$간의 관련성과 \$\Delta P\$와 \$\Delta V, \Delta n\$의 관련성이 작다는 가정하에서 (15)식을 (A-1)식과 (A-2)식으로 분할한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_L \\ \Delta P_C \\ \Delta P_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_L \\ \Delta \theta_C \\ \Delta \theta(\Delta f) \end{bmatrix} \quad (A-1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_C \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{24} & J_{25} & J_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_C \\ \Delta V_L \\ \Delta n \end{bmatrix} \quad (A-2)$$

식(A-1)을 우측항에 대해 정리하면 (A-3)식

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_L \\ \Delta \theta_C \\ \Delta(\Delta f) \end{bmatrix} = [J_{11} \quad J_{12}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_L \\ \Delta P_C \\ \Delta P_S \end{bmatrix} \quad (A-3)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_L \\ \Delta \theta_C \\ \Delta X_{p,r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_\theta \\ S_r \end{bmatrix} \Delta U_p \quad (A-4)$$

으로 표현된다. 여기서 기준모선의 전압위상각의 변화분 \$\Delta \theta_s = 0\$이므로 (A-5)식으로 \$\Delta U_p\$와 \$[\Delta \theta_L, \Delta \theta_C, \Delta \theta_s]^T\$의 관계를 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_L \\ \Delta \theta_C \\ \Delta \theta_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_\theta' \\ 0 \end{bmatrix} \Delta U_p = [S_\theta] \Delta U_p \quad (A-5)$$

또한 신로양단모선의 전압위상각차 \$\Phi\$의 변화분벡터 \$\Delta X_{v,s}\$와 \$\Delta U_p\$의 관계는 식(A-6)과 같이나

$$\Delta X_{v,s} = \left[\frac{\partial X_{v,s}}{\partial \theta} \right] [S_\theta] \Delta U_p \quad (A-6)$$

단, \$\left[\frac{\partial X_{v,s}}{\partial \theta} \right]\$: \$X_{v,s}\$와 \$\theta\$간의 감도행렬 나타낼 수 있다. 따라서 \$X_{v,s}\$와 \$U_p\$간의 감도는 (A-7)식으로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} \partial X_{v,r} \\ \partial U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_r \\ S_\theta \end{bmatrix} \quad (A-7)$$

단, \$S_\theta = \left[\frac{\partial X_{v,r}}{\partial \theta} \right] \cdot S_\theta\$

다음에 \$X_q\$와 \$U_q\$간의 감도는 (A-2)식으로부터 아래와 같이 구한다. 식(A-2)로부터

$$\Delta Q_C = J_{21} \cdot \Delta V_C + J_{22} \cdot \Delta V_L + J_{23} \cdot \Delta n \quad (A-8)$$

$$\Delta Q_L = J_{24} \cdot \Delta V_C + J_{25} \cdot \Delta V_L + J_{26} \cdot \Delta n \quad (A-9)$$

식(A-9)로부터 \$\Delta V_L\$에 대해서 (A-10)식으로 정리하고

$$\Delta V_L = J_{25}^{-1} (\Delta Q_L - J_{24} \cdot \Delta V_C - J_{26} \cdot \Delta n) \quad (A-10)$$

식(A-10)을 (A-8)식에 대입, (A-11)식을 얻는다. 한편

$$\Delta Q_C = J_{21} \cdot \Delta V_C + J_{22} \cdot J_{25}^{-1} (\Delta Q_L - J_{24} \cdot \Delta V_C - J_{26} \cdot \Delta n) + J_{23} \cdot \Delta n \quad (A-11)$$

$$= (J_{21} - J_{22} \cdot J_{25}^{-1} \cdot J_{24}) \Delta V_C + (J_{23} + J_{25}^{-1}) \Delta Q_L + (J_{23} - J_{22} \cdot J_{25}^{-1} \cdot J_{26}) \Delta n$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_C \\ \Delta V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{21} - J_{22} \cdot J_{25}^{-1} \cdot J_{24} & J_{22} \cdot J_{25}^{-1} & J_{23} - J_{22} \cdot J_{25}^{-1} \cdot J_{26} \\ J_{25}^{-1} & -J_{24} & J_{25}^{-1} \cdot J_{26} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_C \\ \Delta Q_L \\ \Delta n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_A & J_B & J_C \\ J_D & J_E & J_F \end{bmatrix} [\Delta V_C \quad \Delta Q_L \quad \Delta n]^T \quad (A-12)$$

(A-10)식과 (A-11)식을 (A-12)식으로 표현하고 \$\Delta Q_L\$과 \$J_B, J_E\$ 가운데서 부효전력원 \$Q_C\$가 설치된 모선에 관련된 항만을 고려하면

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_C \\ \Delta V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_q \\ S_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_C \\ \Delta Q_C \\ \Delta n \end{bmatrix} \quad (A-12)$$

단, \$\Delta Q_C\$: \$Q_C\$의 변화분벡터

(A-12)식이 된다. 따라서 \$\Delta X_{q_0}\$와 \$\Delta U_q\$의 관계는 (A-13)식으로 표현되며 \$\left[\frac{\partial X_{q_0}}{\partial U_q} \right] = \begin{bmatrix} S_q \\ S_v \end{bmatrix}\$이 된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{q_0} \\ \Delta X_{q_v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_q \\ S_v \end{bmatrix} [\Delta U_q] \quad (A-13)$$

부록 2

감도행렬에 의한 \$F(X)\$ 평가

본문의 (19)식에서 \$\lambda\$가 0, 1/2, 1일 경우 (17)식의 제어변수 수정량 \$\beta \cdot \Delta U\$는 각각

$$\Delta U_0 = 0$$

$$\Delta U_{1/2} = \frac{1}{2} \alpha \cdot \Delta U \quad (A-14)$$

$$\Delta U_1 = \alpha \cdot \Delta U$$

단, \$\Delta U_0, \Delta U_{1/2}, \Delta U_1\$: \$\lambda\$가 0, 1/2, 1일 경우의 \$\Delta U\$ (A-14)과 같이 되며 제어변수 수정에 대응한 목적함수 (6), (11)식의 변화는 다음의 (A-15)으로 표현할 수 있다.

$$F(X)_{\lambda=0} = F(X^0 + \left[\frac{\partial X}{\partial U} \right] \Delta U_0)$$

$$F(X)_{\lambda=1/2} = F(X^0 + \left[\frac{\partial X}{\partial U} \right] \Delta U_{1/2}) \quad (A-15)$$

$$F(X)_{\lambda=1} = F(X^0 + \left[\frac{\partial X}{\partial U} \right] \Delta U_1)$$

단, \$X^0\$: \$U\$가 변하기 이전의 \$X\$