

송 길 영
고 려 덕 학 교

이 의 영*
고 려 덕 학 교

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

Kil-Yeong Song
Korea University

Hee-Yeong Lee
Korea University

Abstracts

This paper presents an emergency control algorithms for viability crisis following abnormal condition as well as a sudden major supply outage and line outage. The algorithm considers the effect of voltage-reactive power control for determining the load shedding quantities and generation reallocation. The problem is decomposed into a P-problem and a Q-problem. The former minimizes system frequency deviation from nominal value and the latter minimizes voltages violation of load buses. The optimization problem is solved by a reduced gradient technique which can handle a great number of inequality constraints very efficiently. It has been found that the use of the proposed algorithm for 6-Bus system restore the abnormal system during the viability crisis to the normal state.

1. 서 론

발전기 탈락이나 선로 탈락등의 중대한 계통사고에 기인하여 발생하는 수초간의 과도현상(short term dynamics)은 안정도를 좌우하는 기간으로 이때에는 계통의 보호 계전기가 신속하게 동작하여 사고계통의 초기 안정화를 도모한다. 초기의 안정도 위기 경과후 비교적 사고파급 속도가 완만한 위기잔존상태(viability crisis)⁶⁾가 지속될 경우 부하의 강제 차단 및 발전력 재분배등의 긴급제어를 실시하므로써 계통의 장애(주파수 이상, 선로의 과부하, 부하모선 전압이상)를 경감시키고자 하는 방안이 연구되어 있다.^{3), 5), 6), 7)} 이러한 제어방식에서는 모선전압의 제약조건을 안전도 제약에 포함시켜 모선전압 안정을 도모하였으며 유효전력의 수급평형에 의한 계통주파수 회복을 우선적인 제어목표를 설정하고 있다. 따라서 각 부하 모선의 차단량만이 부하모선의 전압 안정에 영향을 미치는 제어변수로 작용할 뿐 긴급시 전압제어와 관련된 무효전력원의 제어효과를 고려할 수 없기 때문에 부정확한 제어변수 값이 최적치로 결정되며 부하차단량 결정후 전압-무효전력제어를 별도로 실시해야 하는 문제점을 갖고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 전압 무효전력제어를 포함하는 계통장애 경감제어 알고리즘의 개발을 시도하였으며 유효전력과 무효전력 제어를 분할하여 이를 교대로 동시에 수정하는 방법을 채택하여 정격치로 부하의 주파수 편차

와 모선전압 편차를 각각의 목적함수로 정하고 이를 최소로 하는 최적부하차단량과 발전기 출력의 재분배, 무효전력 조정설비의 제어량을 구하였다. 또한 부하의 전압 주파수 특성과 발전기 조속기의 정적응동 특성을 반영시킨 조류계산법²⁾을 이용하여 계통 동요 이후에 semi-dynamic factor가 계통혁신에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 하였다. 최적화 기법으로는 비선형 문제에서 제약조건을 효과적으로 처리할 수 있는 reduced gradient 법을 이용하였다.

2. 본 론

2.1 문제의 정식화

계통사고에 기인하여 발생한 계통장애를 경감시키는 문제는 전력 수급 평형조건, 발전기 출력, 부하차단량, 선로전류, 무효전력 조정장치 제어량의 상한한 제약조건하에서 정격치로부터의 계통 주파수 편차, 부하모선 전압 편차를 최소화 시키는 발전기의 출력분배와 부하차단량 무효전력 조정설비 제어량을 결정하는 문제로 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\text{Min } G = \left(\frac{1-f}{B_f}\right)^2 + \sum_i \left(\frac{1-V_i}{B_v}\right)^2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건 } & g(x, u) = 0 \\ & u \leq u \leq \bar{u} \\ & x \leq x \leq \bar{x} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$\text{제어변수 } u = \begin{cases} P_G, P_L, Q_L: \text{ 발전기유효전력, 부하전력} \\ n, Q_C, V_G: \text{ LRC tapratio, SC., 발전기 전압} \end{cases}$$

$$\text{상태변수 } x = \begin{cases} \phi_{km}: k, m \text{ 모선간 과부하용량을 고려한 상차기} \\ Q_G: \text{ 발전기 무효전력} \end{cases}$$

발전기 유효전력 P_G 와 부하전력 P_L, Q_L 은 계통 동요 이후의 계통 혁신에 중요한 semi-dynamic 요소의 영향을 반영시키기 위해서 발전기의 조속기 정적응동 특성과 부하의 전압 주파수 특성을 고려한 것이다.²⁾

2.2 문제의 분할과 최적화

효율적으로 문제를 해석하기 위해서 문제를 두 단계로 분할하고⁴⁾ 최적화 기법으로는 많은 제약조건을 효과적으로 처리할 수

있는 reduced gradient 법을 이용하였다.

2.2.1 Subproblem I

Subproblem I에서는 계통전압을 일정하게 유지한 상태에서 식(4)의 제약조건하에서 (3)식의 목적함수를 최소화 시키는 제어변수를 구한다.

$$\text{Min } G_1 = \left(\frac{1-f(P_G, P_L)}{Bf} \right)^2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건 } & g_p(P_G, P_L) = 0 \\ & \underline{U}_p \leq U_p \leq \bar{U}_p \end{aligned} \quad (4)$$

$$\underline{\Phi}_{km} \leq \Phi_{km} \leq \bar{\Phi}_{km}$$

여기서 U_p : 제어변수 P_G, P_L

이 경우 식(3)의 목적함수 G_1 에서 계통주파수 f 는 제어변수 P_G, P_L 의 함수이며 상태변수 Φ_{km} 의 부동호 제약식은 SUNT의 방법에 의해서 다음과 같이 penalty function으로 변환시킬 수 있다.

$$P_p = \sum_j U_j \quad j = 1, 2, \dots, NL \quad (5)$$

$$U_j = \begin{cases} W_1 (\bar{\Phi}_{km} - \Phi_{km})^2 & \text{if } |\theta_k - \theta_{ml}| > \bar{\Phi}_{km} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 W_1 : weighting factor
 NL : 선로 수

식(5)은 식(3)에 선형결합 하므로써 상태변수의 제약이 소거된 식(7)의 제약조건하에서 식(6)의 최대 목적함수를 최소화 시키는 문제로 간략화된다.

$$\text{Min } F_p(X_p, U_p) = G_1(U_p) + P_p(X_p) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건 } & g_p(X_p, U_p) = 0 \\ & \underline{U}_p \leq U_p \leq \bar{U}_p \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 X_p : 상태변수 (Φ_{km})
 U_p : 제어변수 (P_G, P_L)

2.2.2 Subproblem II

Subproblem II에서는 계통의 주파수와 모션의 전압 위상각을 일정하게 유지한 상태에서 각 부하모션의 정격 전압으로 부하의 편차를 최소화 시키는 무효전력 제어변수 U_Q 를 구하는 문제로 요약된다.

$$\text{Min } G_2 = \sum_i \left(\frac{1-V_i}{B_v} \right)^2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건 } & g_Q(X_Q, U_Q) = 0 \\ & \underline{U}_Q \leq U_Q \leq \bar{U}_Q \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 U_Q : n, Qc, Vg

(9)식에서 Q_G 에 관한 제약조건은 penalty function으로 변환할 수 있다.

$$P_Q = \sum_j Y_j \quad (10)$$

$j = 1, 2, \dots, NG$ (발전기 수)

$$Y_j = \begin{cases} W_2 (Q_{Gj} - \bar{Q}_{Gj})^2 & \text{if } Q_{Gj} > \bar{Q}_{Gj} \\ W_2 (\underline{Q}_{Gj} - Q_{Gj})^2 & \text{if } Q_{Gj} < \underline{Q}_{Gj} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

여기서 W_2 : weighting factor

다음과 같은 (13)식의 제약조건하에서 (12)식의 최대 목적함수를 최소화 시키는 문제로 정의된다.

$$\text{Min } G_Q(X_Q, U_Q) = G_2(U_Q) + P_Q(X_Q) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건 } & g_Q(X_Q, U_Q) = 0 \\ & \underline{U}_Q \leq U_Q \leq \bar{U}_Q \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 X_Q : 상태변수 (Q_G)
 U_Q : 제어변수 (n, Qc, Vg)

2.2.3 Reduced gradient 법

Subproblem I 과 II에서 상태변수 x 는 동호부 제약조건 $G(\cdot)$ 를 통하여 제어변수 u 의 함수로 된다. 따라서 목적함수 F 는 u 만의 함수가 된다.

$$F(u) = G(u) + P(x(u)) \quad (14)$$

또한 제어변수 u 에 대한 목적함수 $F(u)$ 의 gradient는 상태변수 x 의 상하한 제약에 관계없이 (15)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla F = \left[\frac{dF}{du} \right] = \left[\frac{\partial G}{\partial u} \right] + \left[\frac{\partial P}{\partial x} \right] \left[\frac{\partial x}{\partial u} \right] \quad (15)$$

(15)식에서 $\left[\frac{\partial x}{\partial u} \right]$ 는 x 와 u 사이의 sensitivity matrix $\left[\frac{\partial x_f}{\partial u_f} \right]$ 와 $\left[\frac{\partial x_s}{\partial u_s} \right]$ 로서 주파수를 변수로 도입한 조류계산의 전력 방정식에 LRC의 tap ratio를 추가시킨 전력방정식을 N-R 법으로 풀 경우 식(16)과 같은 Jacobian matrix로 부피 구한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{G,L} \\ \Delta P_S \\ \Delta Q_G \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & & & & \\ & & & & & \\ & & & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & J_{24} & J_{25} & J_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{G,L} \\ \Delta f \\ \Delta V_G \\ \Delta V_L \\ \Delta n \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 첨자 G,L,S는 각각 발전기 모션, 부하모션 기준모션을 표시한다.

(16)식으로 부터 분할조류 계산의 Decoupl 조건을 이용하여 감도행렬 $\left[\frac{\partial x_f}{\partial u_f} \right]$ 와 $\left[\frac{\partial x_s}{\partial u_s} \right]$ 를 각각 구하면 (17), (18)식과 같이 구해진다.

$$\left[\frac{\partial x_f}{\partial u_f} \right] = \begin{bmatrix} J_{11} & & \\ & & \\ & & J_{12} \end{bmatrix}^{-1} \quad (17)$$

$$\left[\frac{\partial x_s}{\partial u_s} \right] = \begin{bmatrix} J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.2.4 제어변수의 Update

Problem I 과 II의 제어변수 수정과정은 동일한 방식이다. 우선 식(15)의 ∇F 를 normalize시켜 목적함수를 최소화 시키는 경사 방향을 구한다.

$$\Delta U = \frac{-\Delta F}{\|\Delta F\|} \quad (19)$$

제어변수 u 는 식(6)과 식(12)의 목적함수가 정해진 값 이내로 수렴할 때 까지 식(20)에 의해서 Problem I 과 II에서 교대

로 반복 수정된다.

$$u^{new} = u^{old} + \beta \cdot \Delta u \quad (20)$$

식(20)에서 적정 step size 는 (21)식에 의해서 결정된다.

$$\beta = \alpha \cdot \lambda \quad (21)$$

식(21)에서 feasible factor α 와 optimum factor λ 값은 문헌(4)의 방법을 이용하였으며 특히 Quadratic curve fitting에 의한 λ 값 결정시 step 당 계산시간을 줄이기 위해 조류계산방법에 의존하지 않고 식(17), (18)에서 구해진 감도행렬을 이용하였다.

2.3 사례 연구

본 연구에서 제안한 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해서 Ward-Hale 6모선 모델 계통에 적용하고 그 결과를 검토하였다. 계통조건은 표1에 나타낸 바와 같으며 B_V 와 B_F 는 각각 0.05[F.u V] 0.05[p.u H₂] 로 설정하였다.

표1. 6모선 모델 계통의 발전기 모선의 출력 제한 조건

Bus No.	P_G	\bar{P}_G	Q_G	\bar{Q}_G	Reg.
5	0.3	0.5	0.13	0.2	0.05
6	0.4	1.1	0.3	0.6	0.05

여기서 부하의 전압 및 주파수 특성 정수는 모든 모선에서 동일한 값으로 다음과 같이 가정하였다.

$$P_p, Q_p = 1.0 \quad P_c, Q_c = 0.0 \quad P_z, Q_z = 0.0 \\ K_p, K_Q = 0.05 \quad N_1, N_2 = 1.0$$

표2. 6모선 계통의 초기 조건에 의한 조류 계산 결과

모선	전압	전압 위상각(Deg)	유효전력	무효전력
1	0.9893	-12.15498	-0.5500	-0.1300
2	0.9205	-9.28506	0.0000	0.0000
3	0.9113	-11.24431	-0.3000	-0.1800
4	0.9088	-11.60355	-0.5000	-0.0500
5	1.1000	-1.25875	0.5517	0.1911
6	1.0500	0.00000	0.9092	0.5107

표3은 모선6의 발전기 고장으로 출력이 총 계통전력의 10%가 감소하였을 경우 본 알고리즘에 의한 제어 결과로써 발전기 5의 출력 조정 및 부하의 적정 차단과 표4에 나타낸 바와 같이 무효전력 조정장치의 제어로 모선전압과 주파수가 안전도 제약 이내로 유지됨을 알 수 있다.

표3. 모선 6에서 10% 발전력 탈락시 본 알고리즘에 의한 제어 결과

모선	전압	전압 위상각(Deg)	유효전력	무효전력
1	1.0448	-9.89818	-0.5098	-0.1205
2	0.9741	-7.49607	0.0000	0.0090
3	0.9650	-8.48998	-0.2603	-0.1562
4	0.9653	-9.14367	-0.4597	-0.0337
5	1.1000	1.05334	0.5018	0.0678
6	1.0954	0.00000	0.8134	0.4906

표4. 모선 6의 발전력 감소시 무효전력 조정장치의 제어량

제어변수	Q_2	Q_4	V_5	V_6	\bar{n}_5	\bar{n}_7
초기치	0	0	1.1	1.05	1.1	1.025
제어후	0.008	0.012	1.1	1.95	1.098	1.034

그 밖의 본 연구에서는 총 계통전력의 10%~20%에 해당하는 전원 탈락 사고와 송전선 탈락사고등의 여러 case 의 상정사고에 대해서 본 알고리즘에 의해 계산한 결과 계통의 주파수, 부하모선 전압, 선로 과부하등의 계통 장애를 안전도 제약에 맞춰 해소시킬 수 있음을 밝혔다.

3. 결 론

본 연구에서는 발전기 탈락사고나 선로탈락등의 가혹한 계통 사고시 사고파급의 위험이 잔존하는 계통장애를 대상으로 그 장애를 경감시키기 위한 새로운 알고리즘을 개발하고 이 알고리즘을 모델 계통에 적용하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 제어 체계를 주파수 장애와 관련된 유효전력 제어와 각 모선의 전압장애와 관련된 무효전력 제어로 분할하여 동시에 처리함으로써 계통장애 발생시 무효전력 조정장치의 제어효과를 감안한 부하 차단량과 발전력 재분배 값을 결정할 수 있도록 하였다.
- (2) 무효전력-전압제어 loop를 포함시키므로써 계통의 장애경감을 위해서 부하차단과 발전력 재분배후 별도의 전압-무효전력 제어를 필요로 하지 않게 하였다.
- (3) gradient 법에서 주요 인자가 되는 적정 step λ 값의 결정시 조류계산 대신 감도행렬을 이용하므로써 step당 계산시간을 크게 감소시켰다.
- (4) 부하의 주파수 및 전압 특성과 발전기의 조속기 특성을 고려한 조류계산법을 이용하므로써 계통동요 이후의 계통분석에 중요한 semi-dynamic 요소의 영향을 반영시켜 계통분석을 더욱 실제에 가깝도록 하였다.
- (5) 본 연구는 계통의 안전상태의 선행결과와 비상시의 사고파급방지에 유용할 것으로 기대되며 앞으로 전압장애의 불안정 특성을 고려한 무효전력원의 합리적 제어와 관련시켜 연구를 진행시킬 계획이다.

참 고 문 헌

- 1) 송길영 씨적 부하 제한 방식의 적용에 관한 연구"
대한전기 학회지, vol. 24, No. 2, 1975.
- 2) M. Okamura 씨 "A New Power Flow Model and
Solution Method" IEEE Transaction on Power
Apparatus and System, vol. PAS-94, No. 3,
pp 1042-1050, May/June, 1975.
- 3) S.M. Chan 씨 "A Solution of the transmission
limited dispatch problem by sparse linear
programming" IEEE Transaction on Power Ap-
paratus and System, vol. PAS-98, No. 3,
pp 1044-1053, 1979.
- 4) Raymond R. Shoult 씨 "Optimal power flow
based upon P-Q decomposition" IEEE Transact-
ion on Power Apparatus and System, vol. PAS-
101, No. 2, Feb., 1982.
- 5) Ueda 씨 "Optimal load shedding as emergency
control of power system" CRIEPI Rep. No.
183009, 1983.
- 6) A Kuppurajula, "An emergency control algori-
thm for realtime application" IEEE Transaction
on Power Apparatus and System, vol. PAS-104,
No. 8, August 1985.
- 7) K.A. Palanisway 씨 "Optimal load shedding
taking into account of voltage and frequency
characteristic of load" IEEE Transaction on
Power Apparatus and System, vol. PAS-104,
No. 6, June, 1985.