

## Optimal Governor Response Power Flow with Nonlinear Interior Point Method

金泰均<sup>†</sup> · 李炳峻<sup>\*</sup> · 宋和昌<sup>\*\*</sup> · 車濬敏<sup>\*\*\*</sup>

(Tae-Gyun Kim · Byong-Joon Lee · Hwa-Chang Song · Jun-Min Cha)

**Abstract** - This paper proposes a new concept of optimal governor-response power flow (OGPF) to obtain an optimal set of control parameters when the systems are in mid-term conditions after disturbances, ignoring the system dynamics. The idea of GOPF simply comes from the attempt to find an optimal solution of the governor-response power flow (GPF), which is a pre-existing tool that is used to get power flow solutions that would exist several seconds after an event is applied. GPF incorporates the simplified model of governors in the systems into the power flow equations. This paper explains the concept of OGPF and depicts the OGPF formulation and application of a nonlinear interior point method as the solution technique. Also, this paper includes an example with New England 39-bus test system to illustrate the effectiveness of GOPF

**Key Words** : Optimal Governor Response Power Flow, Nonlinear Interior Point Method, GPF, Mid-Term Conditions Optimization

### 1. 서 론

최적조류계산은 1960년대 처음 제안된 이후 지금까지 연구되고 있어 비교적 긴 역사를 가진다. 최초 최적조류계산은 경제급전을 위하여 제안 되었으나 이후 많은 연구가 진행되어 다양한 응용분야에 적용되고 있으며 상정사고 상태에서 계통의 안전도를 유지하기 위한 수정제어의 목적으로도 유용하게 사용된다. 이러한 최적조류계산은 일반적으로 정상상태에 대한 최적해를 탐색하여 계통이 안정화된 이후의 적절한 제어방안을 제시한다.

실제 전력계통은 동적 모델로 표현되는 다양한 설비들을 포함하고 있으며 이 설비들은 계통의 외란에 대하여 동적으로 응답하여 계통의 안전도에 영향을 미친다. 따라서 시모의 해석에서는 전력계통을 미분 대수 방정식으로 표현한 모델을 적용하고 있다. 따라서 계통의 외란에 대하여 빠른 제어동작을 제시하기 위해서는 동적 모델을 포함한 최적화 방안이 필요하다. 하지만 이러한 동적 파라미터를 포함한 모델링은 많은 변수를 포함하게 되고 대규모 계통에의 적용에 한계점을 가진다.

계통에 외란이 발생하면 계통은 새로운 운전점으로 수렴한다. 이때 발전기의 기계적 입력이 변화하지 않는 단계, 즉

AGC의 동작 이전 상태에서는 각 발전기는 조속기의 응답에 따라 전기적 출력을 조절한다. 기계적 입력과 전기적 출력에 따른 차이는 계통의 주파수 변화를 가져오고 AGC의 동작에 따라 각 발전기는 기계적 입력을 변화시켜 주파수를 안정화 시킨다. 계통의 심각한 외란에 따른 계통 불안정 현상에 대하여 보다 효율적인 계통 제어를 위해서는 정상상태보다 한 단계 빠른 제어동작의 제시가 필요하다. 이를 위해서는 AGC 동작 이전의 주파수 변화를 고려한 최적조류계산의 개념이 필요하며 이러한 최적조류계산 해법은 아직까지 제시된 바 없다. [3],[5]에서는 발전기 고장에 따른 상정사고에 대하여 준동적 상태에서의 계통 안전도를 판별하기 위하여 조속기 응답 조류계산을 수행한다. 조속기 응답 조류계산을 이용한 최적 조속기 응답 조류계산은 주파수 제약을 포함하여 계통의 주파수 변화를 고려하므로 정상상태보다 한 단계 빠른 계통 상태에서의 제어방안을 제시할 수 있다. 본 논문에서는 한 예로 부하차단 최소화 모의를 수행하였다.

계통의 외란 이후 각 발전기의 유효전력 출력량은 조속기의 응답에 따라 재분배 된다[3~6]. 본 논문에서는 조속기 응답에 따른 계통 상태를 표현하기 위한 최적화 방안을 제안하였다. 조속기 응답 조류계산의 개념은 이미 정립되어 있는 개념으로 조속기 응답을 고려하여 외란 이후의 준동적 계통상태에 대한 모의에 사용된다. 여기에 최적화 개념을 적용하여 최적 조속기 응답 조류계산을 수행한다. 최적조류계산을 수행하기 위한 알고리즘으로 대규모 계통에 적용이 용이하며 계산속도 및 수렴성 등에서 실용적 결과를 보이고 비선형 문제를 잘 다룰 수 있는 주·쌍대 비선형 내점법을 이용한 최적조류계산을 수행하였다[1~2].

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 고려대학교 전기공학과 박사과정  
E-mail : harlang@korea.ac.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 고려대학교 전기공학과 교수

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 군산대학교 전기공학과 조교수

<sup>\*\*\*</sup> 正會員 : 대전대학교 전기정보시스템공학과 교수

接受日字 : 2007年 3月 8日

最終完了 : 2007年 6月 26日

## 2. 조속기 응동 조류계산

전력조류계산은 계통의 외란에 따른 수급 불균형에 대하여 스윙모션의 발전력 조절을 통하여 수급을 유지하는 해를 제시한다. 하지만 외란 직후 수초 이내에서의 계통은 계통의 주파수가 변화하고 조속기 응동에 따라 발전기가 발전력을 재조정하여 유효전력 수급을 유지한다. 따라서 스윙모션이 계통의 수급 불균형을 유지시키는 전력조류계산으로는 외란 직후의 준동적 상태에서의 계통 모의에 한계점을 가진다. 이러한 한계점을 보완하는 방안으로 조속기 응동 조류계산이 외란 이후 준동적 계통상태를 보다 정확하게 표현하기 위하여 사용된다. 다음은 조속기 응동 조류계산의 개념 및 정식화, 해법[3]~[6]을 보인다.

### 2.1 조속기 응동 조류계산의 개념

조속기 응동 조류계산은 inertial 조류계산 이후의 상태를 표현하며 AGC의 동작 이전 상태를 나타낸다. 계통에 외란이 발생하면 계통 주파수가 변화하게 되며 일정 시간이 지나면 조속기 응동에 따라 계통의 주파수는 일정한 값으로 수렴한다. 이렇게 주파수가 수렴하여 일정한 상수 값으로 표현되는 상태를 조속기 응동 조류계산을 통해 모의할 수 있다.

다음은 droop을 포함하는 조속기에 대한 간략한 블록 다이어그램을 보인다.

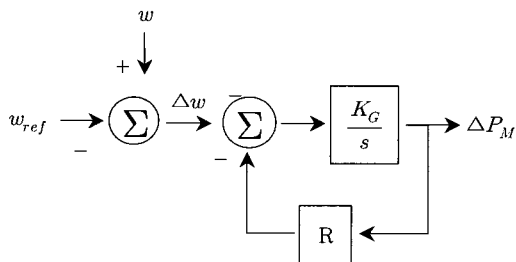


그림 1. droop을 포함한 조속기 블록 다이어그램  
Fig. 1 Governor block diagram with droop characteristic

- 여기서,  $w_{ref}$  : 기준 각속도(주파수)
- $w$  : 계통 각속도(주파수)
- $K_G$  : gain
- $R$  : 조속기 droop
- $\Delta P_M$  : 유효전력 기계적 출력 변화량

그림1은 그림2와 같이 등가화 된다.

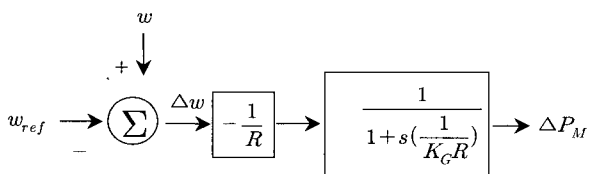


그림 2. 등가화 된 조속기 블록 다이어그램  
Fig. 2 Equivalent block diagram of governor

그림2를 통하여 다음과 같은 정적인 상태에서의 대수 방정식을 얻는다.

$$-\frac{1}{R}(w - w_{ref}) = \Delta P_M \quad (1)$$

계통의 외란에 따른 각 발전기의 전기적 출력은 발전기의 기계적 출력과 기계적 출력의 변화량의 합과 같다. 즉, 다음과 같은 대수 방정식을 얻는다.

$$P_e = P_M - \frac{1}{R}(w - w_{ref}) \quad (2)$$

각 발전기의 출력 변화량은 droop 특성에 따라 달라지며 droop 특성이 다른 두 발전기는 그림3과 같은 출력 변화량을 보인다.

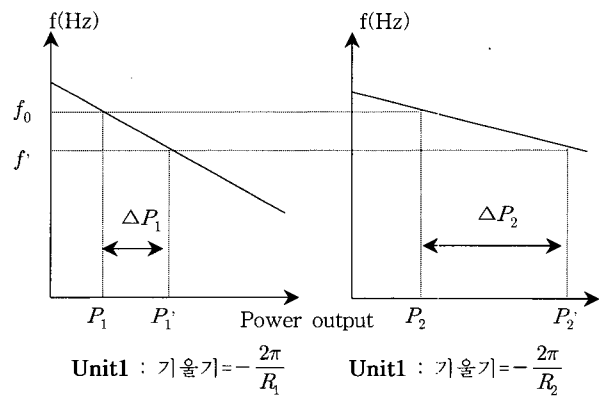


그림 3. droop 특성에 따른 출력 변화

Fig. 3 Active power generation according to droop characteristic

- 여기서,  $f_0$  : 기준 주파수
- $f$  : 외란 이후 계통 주파수
- $P_i$  : 외란 이전 유효전력 전기적 출력량(i발전기)
- $P_i'$  : 외란 이후 유효전력 전기적 출력량(i발전기)
- $R_i$  : i 발전기 droop 특성

계통에 외란이 발생하면 외란 직후 수 초안에 조속기 응동에 따라 주파수가 새로운 값으로 수렴한다. 이때 응동하는 발전기 그룹은 발전기의 참여인수 및 조속기 deadband에 따라 달라진다.

계통의 외란은 계통 주파수의 변화를 야기하고 각 발전기의 조속기 특성에 따라 발전력을 재분배한다. 이때 주파수의 변화량 및 각 발전기의 전기적 출력 변화량과의 관계는 다음과 같다.

$$\Delta w_0 = \frac{\sum_{i=1}^M (P_{mi} - P_{gi})}{\sum_{i=1}^M \beta_i} \quad (3)$$

- 여기서,  $M$  : 주파수 변화에 응동하는 발전기 총 수
- $\Delta w_0$  : 계통의 주파수 변화량
- $P_{mi}$  : 발전기의 기계적 입력
- $P_{gi}$  : 발전기의 전기적 출력
- $\beta_i$  : 발전기의 주파수 응동 특성

## 2.2 조속기 모델의 선형화

조속기의 응답은 발전기 및 터빈 damping 과 주파수에 대한 부하의 응답성 등을 고려해야 한다. 하지만 조속기 응답 조류계산에서 사용되는 조속기 모델은 이러한 고려되어야 할 특성 및 조속기의 동특성은 반영하지 않으며 다음 그림과 같이 간략하게 선형화된 모델을 취한다.

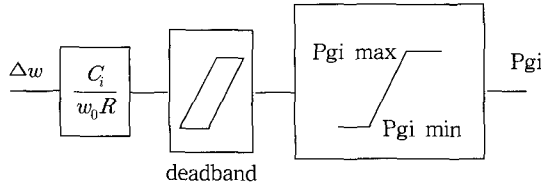


그림 4. 선형화된 조속기 모델  
Fig. 4 Linearized governor model

그림4 에서 언급되는 조속기 응답 모델은 주파수 변화량에 대한 발전력 변화량이 이상적으로 선형화된 모델이다. 즉, 주파수 변화량과 발전력 변화량은 선형관계식을 따르게 됨을 의미한다. 조속기 deadband 는 발전기가 계통의 주파수 변화에 반응하지 않도록 하는 현상을 야기한다. deadband 한계점은 일반적으로 0.036 Hz 를 갖는 경우가 많으며 이러한 경우 계통 주파수의 변화량이 0.036Hz 를 넘지 않으면 조속기는 민감하게 응답하지 않게 된다. 또한 일반적으로 원자력과 같은 발전기는 주파수 변화에 응답하지 않도록 참여인수를 조절하여 조속기가 응답하지 않으며 용량이 작은 발전기 역시 주파수 변화에 응답하지 않도록 하는 경우가 많다. 만약 이러한 특성을 모두 고려하여 주파수 변화에 응답하는 발전기군을 선정하면 각 발전기의 유효전력 출력 변화량은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta P_{Gi} = \frac{C_i}{R_i} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (4)$$

- 여기서,  $C_i$  : 발전기의 유효전력 출력 용량
- $R_i$  : 조속기의 droop (p.u.)
- $\Delta P_{Gi}$  : 유효전력 출력 변화량
- $f_0$  : 계통의 정격 주파수 (60Hz)
- $\Delta f$  : 계통의 주파수 변화량

$P_k$ 를 계통의 외란에 의하여 변화된 유효전력 수급 불균형 양이라 할 때, 모든 발전기에 대하여 수식(4)를 만족하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\sum_{i \in J_k} \Delta P_{Gi} = \sum_{i \in J_k} \frac{C_i}{R_i} \frac{\Delta f}{f_0} = P_k \quad (5)$$

여기서  $J_k$  는 조속기 응답에 따라 출력을 변화시키는 발전기군을 나타낸다. 수식(5)와 같이 표현되는 방정식을 만족할 때 각 발전기의 발전 재분배가 끝나며 계통은 새로운 운전점을 찾아 수렴하게 된다.

## 2.3 조속기 응답 조류계산의 정식화 및 해법

조속기 응답 조류계산은 계통의 외란 이후 조속기 응답이 끝난 준동적 계통 상태에서의 모의를 수행한다. 즉, 준동적 상태에 대한 시모의가 아니므로 시간에 대한 성분은 고려되지 않는다. 또한 외란에 따라 계통의 주파수가 변화된 상태를 나타내므로 계통 주파수 성분이 변수로 추가된다. 그림4, 수식(4), 수식(5)으로부터 조속기 응답 조류계산에서 사용되는 조속기 모델은 조속기의 동특성을 고려하지 않고 간략하게 선형화된 표현식으로 나타내고 있음을 볼 수 있다. 수식(4)에서와 같이 표현되는 각 발전기의 유효전력 출력 변화량을 이용하여 전력조류방정식을 재구성하면 다음과 같다.

$$P_{Ti} + P_{Li} - [P_{mi} - (w_{sys} - w_0) \frac{C_i}{R_i}] = 0 \quad (6)$$

$$Q_{Ti} + Q_{Li} - Q_{Gi} = 0 \quad (7)$$

$$P_{Ti} = V_i \sum_j V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$$Q_{Ti} = V_i \sum_j V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

- $P_{Li}, Q_{Li}$  : i 모선의 유효전력 및 무효전력 부하량
- $P_{mi}$  : 발전기의 유효전력 기계적 입력 (p.u.)
- $w_{sys}$  : 현재 계통의 주파수 (p.u.)
- $w_0$  : 계통의 정격 주파수 (1 p.u.)

수식(6), 수식(7)에서 보이는 조속기 응답 조류계산식은 전력조류방정식과 유사하지만 발전기의 기계적 입력과 계통 주파수에 대한 변수가 추가되어 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 구성된 전력조류 방정식은 뉴턴법을 통해 조속기 응답 조류계산의 해를 제시할 수 있다. 해의 탐색 과정에서 앞서 언급되었던 조속기 deadband 및 유효전력 출력 상·하한 제약, 조속기의 주파수 응답 특성 등을 고려하여 주파수에 응답하는 발전기군의 선택 및 관계식의 수립 과정이 수행되어야 하며 무효전력 출력 제약이 고려되어야 한다.

## 3. 최적 조속기 응답 조류계산

계통에 외란이 발생하면 계통 주파수의 변화를 가져오고, 주파수가 새로운 값으로 수렴하여 상수값으로 표현되면 조속기 응답에 따라 각 발전기는 유효전력 출력량을 재분배한다. 이때 재분배되는 유효전력 출력량은 조속기 특성에 따른 것으로 임의로 조절이 불가능하다. 일반적인 최적화 알고리즘은 유효전력 제약에 따라 목적함수를 최소화 하는 값으로 유효전력 출력을 재분배하기 때문에 상정사고 발생시 유효전력의 기계적 입력을 임의로 조절할 수 없는 준동적 계통상태에 대해서는 최적해를 제시할 수 없다. 상정사고 발생시 준동적 상태에서의 계통은 유효전력 출력이 조속기 응답에 따라 분배되며 주파수 변화를 가져온다는 점을 고려해야 한다. 따라서 이러한 특성을 반영하여 최적화를 수행하여야 준동적 상태에서의 계통에 대한 정확한 표현이 가능하게 된다. 조속기 응답 조류계산이 이러한 특성을 반영한 조류계산이라는 점에 착안하여 여기에 최적화 개념을 도입한 최적 조속기 응답 조류계산이 필요하게 된다. 본 논문은

서는 조속기 응동 조류계산에서 사용되는 전력조류방정식을 등호제약으로 구성하였으며 부등호 제약으로 선로조류제약 및 무효전력 특성곡선을 반영하였고 기타 제어변수 및 상태 변수의 상·하한값을 부등호 제약으로 하였다. 목적함수는 심각한 상정사고에 대한 부하차단을 고려하여 부하차단 최소화를 선정하였다.

### 3.1 최적 조속기 응동 조류계산의 정식화

다음은 최적 조속기 응동 조류계산의 기본 정식을 보인다.

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.t. } g(x) = 0 \\ h^{\min} \leq h(x) \leq h^{\max} \\ x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $x$  : 상태 변수의 집합으로 발전량( $P_g$ ),

모선전압( $V, \delta$ ), 변압기 tap ratio ( $t, \phi$ ),  $w_{sys}$  등

$f(x)$  : 전력계통의 목적함수 (스칼라 함수)

$g(x)$  : 전력조류 방정식

$h(x)$  : 전력계통의 부등식 제약(line flow 제약 및 무효전력 출력 제약)

$h^{\max}, h^{\min}$  : 부등식 제약의 상하한

$x^{\max}, x^{\min}$  : 변수  $x$ 의 상하한

목적함수는 다음과 같이 부하차단 최소화를 수행한다.

$$\min f(x) = \sum_i (P_{Li} - \alpha_i P_{Li}) \quad (9)$$

여기서  $\alpha_i$  는 각 모선의 부하에 대한 계수를 나타낸다. 즉,  $\alpha_i$  가 1이면 부하차단이 없었음을 의미하며, 0이면 그 모선의 부하가 100% 차단되었음을 의미한다. 따라서  $\alpha_i$  에 대한 부등호 제약이 추가되며 수식(6), (7)의 전력조류방정식은  $\alpha_i$  텀을 포함한 형태로 수정된다.

$$0 \leq \alpha_i \leq 1 \quad (10)$$

$$P_{Ti} + \alpha_i P_{Li} - [P_{mi} - (w_{sys} - w_0) \frac{C_i}{R_i}] = 0 \quad (11)$$

$$Q_{Ti} + \alpha_i Q_{Li} - Q_{Ci} = 0 \quad (12)$$

유효전력 부하와 무효전력 부하에 같은 계수를 사용함으로써 부하의 역률을 일정하게 유지하였다.

부등식 제약  $h(x)$ 는 비선형 방정식으로 표현되는 선로조류방정식과 무효전력 특성곡선이 포함되며 선로조류제약의 모델링은 다음과 같다.

$$P_{ij} = V_i^2 G_k - V_i V_j G_k \cos(\delta_i - \delta_j) - V_i V_j B_k \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (13)$$

$$Q_{ij} = V_i^2 G_k - V_i V_j G_k \sin(\delta_i - \delta_j) - V_i V_j B_k \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (14)$$

무효전력 특성곡선의 모델링은 다음과 같다.

$$Q_f = \sqrt{\frac{X_{ad}^2}{X_s^2} I_{fdmax}^2 V_i^2 - P^2} - \frac{V_i^2}{X_s} \quad (15)$$

$$Q_a = \sqrt{I_{tmax}^2 V_i^2 - P^2} \quad (16)$$

수식(15)과 수식(16)에서 보이는 무효전력 특성곡선은 P, Q 평면에 다음과 같이 도식화 된다.

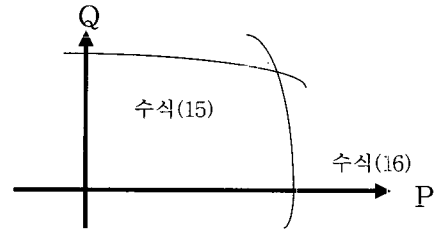


그림 5. 무효전력 특성곡선

Fig. 5 Reactive power characteristic curve

기타 최적조류계산에서 사용되는 각종 운전제약이 포함되며 발전기의 기계적 입력  $P_{mi}$  는 기본적으로 조속기 응동 조류계산의 개념상 상수항으로 고정되어야 하나 필요에 따라서는 제약을 추가할 수 있다.

### 3.2 비선형 내점법 적용

정식화를 통하여 구성된 최적화 문제는 주·쌍대 비선형 내점법[1],[2]에 의하여 해를 탐색한다. 비선형 내점법은 슬랙 변수를 도입해서 부등식 제약을 등식 제약으로 변환하고 대수 barrier 법을 사용해서 슬랙 변수가 음의 값을 갖지 않도록 정식화함으로써 뉴턴법에서 문제가 되었던 부등식 제약을 효율적으로 다룰 수 있다는 특징이 있다. 비선형 내점법은 크게 세 부분으로 구성되어 있는데 먼저 부등호 제약을 가진 최적화 문제를 위한 barrier 방법, 등호제약을 가진 최적화문제를 위한 라그랑지 방법, 비선형 방정식을 풀기 위한 뉴턴 방법으로 구성된다. 먼저 수식(8)을 barrier 법을 통해 최적화 문제를 재구성 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.t. } g(x) = 0 \\ h(x) - h^{\min} - l = 0 \\ h(x) - h^{\max} + u = 0 \\ (l, u) \geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

다음으로 수식(17)를 통하여 라그랑지 함수를 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L(x, l, u, \lambda, z, w) = f(x) - \mu \sum \ln l - \mu \sum \ln u - \lambda^T G(x) \\ - z^T (H(x) - h^{\min} - l) - w^T (H(x) - h^{\max} + u) \end{aligned} \quad (18)$$

이와 같이 구성된 라그랑지 함수에 대하여 KKT 조건으로 표현되는 수식을 축약 방정식으로 수정한다. 수정된 수정방정식[1]은 상태변수 및 제어변수와 등호제약에 대한 라그랑지 승수로 표현된다. 수정방정식에 대하여 뉴턴법을 통해 해를 탐색한다. 주·쌍대 비선형 내점법의 알고리즘은 다음과 같다.

**Step1** : 초기치 설정 : 주·쌍대변수와 라그랑지 승수가 실행가능영역에서 시작되도록 초기치를 결정한다. 또한, 중심 파라미터  $\sigma \in (0, 1)$  를 결정한다.

**Step2** : 상보값 계산 : 다음 식(19)과 같이 모든 부등식 제약으로부터 유도된 상보 값을 계산한다.

$$C_{gap} = \sum_{i=1}^r (l_i z_i - u_i w_i) \quad (19)$$

**Step3** : 수렴판정 : 수렴판정은 조류방정식의 최대오차와 상보값이 수렴 한계치 내로 들어오면 종료하고 그렇지 않으면 다음 단계로 진행한다.

**Step4** : 배리어 파라미터( $\mu$ )의 계산 : 부등식제약을 효과적으로 다루기 위해 도입되는 배리어 파라미터  $\mu$  를 다음과 같은 방법으로 계산한다.

$$\mu = \sigma \frac{C_{gap}}{2r} \quad (20)$$

**Step5** : 수정방정식의 해를 계산 : 축약된 수정방정식을 계산해서 주변수와 등식제약의 라그랑지 승수의 수정량을 구하고 이것을 통하여 쌍대변수와 부등식제약에 관한 라그랑지 승수의 수정량을 구한다.

**Step6** : 최대스텝 길이의 계산 : 단계5에서 구한 각 변수의 수정량에 적용될 최대스텝 길이를 구하기 위한 다음과 같은 방법으로 ratio test를 수행한다.

$$step_P = 0.9995 \min[\min(\frac{-l}{\Delta l} : \Delta l < 0, \frac{-u}{\Delta u} : \Delta u < 0), 1] \quad (21)$$

$$step_D = 0.9995 \min[\min(\frac{-z}{\Delta z} : \Delta z < 0, \frac{-w}{\Delta w} : \Delta w > 0), 1] \quad (22)$$

**Step7** : 변수의 수정 : 주·쌍대변수의 수정량을 다음과 같이 계산한다.

$$(x, l, u)_{k+1}^T = (x, l, u)_k^T + step_P (\Delta x, \Delta l, \Delta u)^T \quad (23)$$

$$(\lambda, z, w)_{k+1}^T = (\lambda, z, w)_k^T + step_D (\Delta \lambda, \Delta z, \Delta w)^T \quad (24)$$

수정 후 단계2로 돌아가서 수렴할 때까지 과정을 반복한다.

### 3.3 헤시안 행렬의 구성

비선형 내점법 알고리즘을 적용하는 과정에서 헤시안 행렬을 구성하게 된다. 이때 구성되는 헤시안 행렬은 상태변수 및 제어변수와 등호제약에 대한 라그랑지 승수로 구성되는 축약행렬이 된다. 축약행렬의 구성은 그림3에서 보이는 바와 같이 기본적으로 각 모선의 전압, 위상각, 등식제약의 라그랑지 승수에 따른 4x4 블록으로 구성된 행렬에 기타 각 변수들에 따른 행·열이 추가된다.

	$\alpha_i$	$P_{Gi}$	$Q_{Gi}$	$w_{sys}$	$\delta_i$	$V_i$	$y_{pi}$	$y_{qi}$	...	$\delta_j$	$V_j$	$y_{pj}$	$y_{qj}$	RHS
$\alpha_i$	H						J	J	...					r
$P_{Gi}$		H				H	-1	...						r
$Q_{Gi}$			H				J	...						r
$w_{sys}$				H			J	...				J		r
$\delta_i$					H	H	J	J	...	H	H	J	J	r
$V_i$					H	H	J	J	...	H	H	J	J	r
$y_{pi}$		J	-1	J	J	J	0	0	...	J	J	0	0	r
$y_{qi}$		J		J	J	J	0	0	...	J	J	0	0	r
:	:	:	:	:	:	:	:	:	...	:	:	:	:	:
$\delta_j$					H	H	J	J	...	H	H	J	J	r
$V_j$					H	H	J	J	...	H	H	J	J	r
$y_{pj}$					J	J	0	0	...	J	J	0	0	r
$y_{qj}$					J	J	0	0	...	J	J	0	0	r

그림 6. 헤시안 행렬의 기본 구성  
Fig. 6 Basic construction of hessian matrix

그림6에서 보이는 행렬은 유효전력 및 무효전력 제약, 부하차단 후보지 수 만큼 행렬의 크기를 증가시키게 된다. 계산속도를 향상시키기 위하여 그림3의 행렬에서 유효전력에 해당하는 성분과 무효전력에 해당하는 성분 및  $\alpha_i$  에 해당하는 성분을 축약할 수 있다. 계통 주파수에 대한 성분은 조속기가 응동하는 모든 발전기에 대하여 값이 존재하는 성분으로 축약에 어려움이 있다. 계통 주파수 성분을 제외한 나머지 성분을 축약한 축약 행렬은 그림7과 같다.

	$w_{sys}$	$\delta_i$	$V_i$	$y_{pi}$	$y_{qi}$	...	$\delta_j$	$V_j$	$y_{pj}$	$y_{qj}$	RHS	
$w_{sys}$	H					...				J		r
$\delta_i$		H	H	J	J	...		H	H	J	J	r
$V_i$			H	H	J	J	...	H	H	J	J	r'
$y_{pi}$		J	J	J	*	*	...	J	J	0	0	r'
$y_{qi}$			J	J	*	*	...	J	J	0	0	r'
:	:	:	:	:	:	:	...	:	:	:	:	:
$\delta_j$						...	H	H	J	J		r
$V_j$						...	H	H	J	J		r
$y_{pj}$						...	J	J	0	0		r
$y_{qj}$						...	J	J	0	0		r

그림 7. 축약된 헤시안 행렬의 구성  
Fig. 7 Construction of reduced hessian matrix

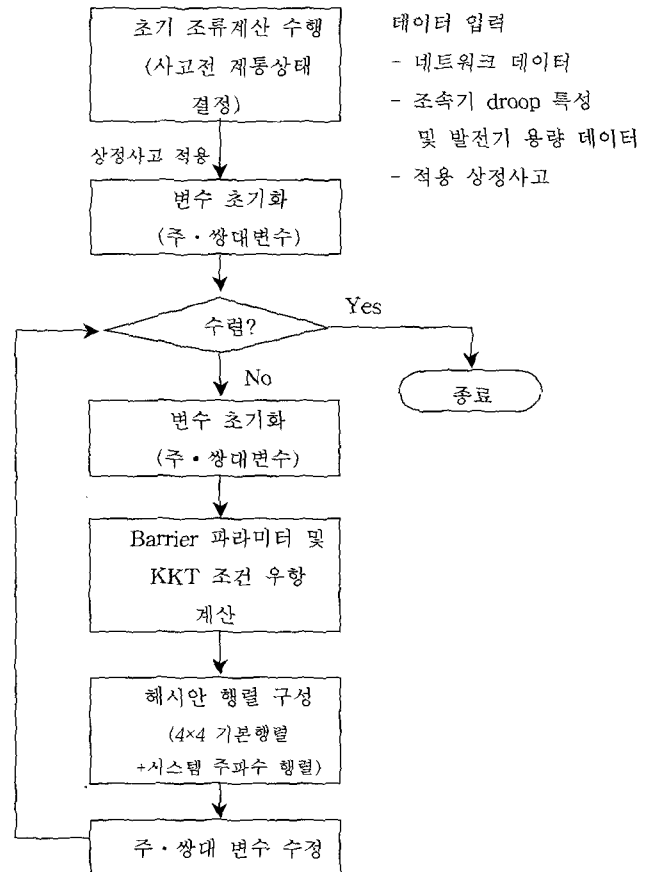


그림 8. OGPf의 해 결정 절차  
Fig. 8 Flow chart of OGPf

그림7과 같이 헤시안 행렬이 구성되면 비선형 내점법의 알고리즘에 따라 LU 분해법을 통해 해를 탐색한다.

4. 사례연구

최적 조속기 응답 조류계산을 뉴잉글랜드 39모선 계통에 적용한다. 시험계통에 대하여 각 상정사고에 따른 유효전력 여유의 계산 및 계통 주파수를 관찰하고 여기서 각 상정사고에 대하여 심각한 상정사고를 선정한다. 또한 발전기 탈락 상정사고를 고려하여 각 상정사고에 대한 최적 조류계산 및 최적 조속기 응답 조류계산을 통하여 계통상태의 변화를 비교 분석한다.

먼저 위에서 언급된 시뮬레이션을 통하여 선정된 심각한 선로사고 및 발전기 고장에 대한 상정사고 시뮬레이션을 수행한다. 각 시뮬레이션에 대하여 각 모선의 전압 제약은 0.95에서 1.05까지로 하였다. 계통의 주파수 제약은 WECC 기준에 따라 0.99p.u에서 1.01p.u으로 하였으며 발생한 사고가 주파수 제약 범위 내에서 해를 찾지 못하면 주어진 사고에 대해서는 부하차단의 제어동작이 필요한 것으로 간주할 수 있다. 각 상정사고에 대하여 허용 가능한 주파수 변화량을 제약으로 추가하여 최적 조속기 응답 조류계산을 수행하였을 경우와 전력조류방정식을 등호제약으로 하는 최적조류계산을 수행하였을 경우 부하 차단량을 비교 분석하였다.

다음은 뉴잉글랜드 39모선 시험계통의 계통도 이다.

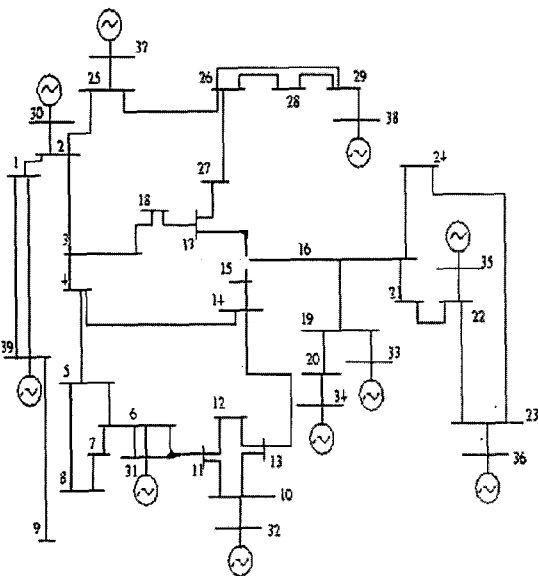


그림 9. 뉴잉글랜드 39모선 시험계통 계통도  
Fig. 9 New-England 39 bus system

계통의 가장 심각한 상정사고를 선정하기 위한 방안으로 많이 사용되는 방법은 유효전력 여유해석을 통한 안정도 검토이다. 유효전력 여유해석을 통한 계통해석 결과는 다음과 같다.

표 1. 유효전력 여유 해석 결과

Table 1 Result of P-V margin

case	유효전력 여유량	case	유효전력 여유량
28-29	1788	8-9	2491
21-22	1804	9-39	2565
15-16	2268	25-26	2599
26-29	2295	26-28	2677
2-3	2458	16-21	2731

다음은 심각한 상정사고를 고려하기 위하여 고려될 수 있는 모든 선로사고에 대한 주파수 변화량을 계산한다. 일반적으로 선로사고를 고려할 경우 주파수 변화는 미비하기 때문에 심각한 상정사고를 선정하는 과정에서 모의하지 않는다. 하지만 본 사례연구에서는 계통 주파수를 고려한 사고를 모의하고 있으며 주파수 변화가 크다는 것은 유효전력 손실이 커지는 사고임을 나타내기 때문에 그만큼 많은 부하차단을 요구하게 되고, 따라서 부하차단 측면에서 심각한 상정사고로 고려될 수 있다. 상정사고에 따른 주파수 변화량은 다음과 같다.

표 2. 각 상정사고에 따른 계통 주파수 변화

Table 2 Frequency variation according to contingency

case	주파수	case	주파수
2-3	59.896	28-29	59.975
21-22	59.906	16-21	59.976
25-26	59.970	2-31	59.977
13-14	59.970	6-7	59.977
5-6	59.974	31-39	59.977

표1과 표2를 통하여 심각한 상정사고로 21-22 선로사고를 선정했다. 또한 31번 모선의 발전기 고장을 상정사고로 고려하여 각 경우에 대한 결과를 비교 분석하였다. 다음 표와 그림은 각 상정사고에 따른 최소 부하차단 용량 선정에 대한 결과비교를 나타낸다. 각 상정사고에 대하여 주파수 제약을 가지는 OGPf의 결과가 더 적은 부하차단 용량을 제시하고 있다. 정상상태보다 빠른 시간대에서, 즉 AGC가 동작하기 이전 시간대에서 적절한 부하차단 용량을 선정하고자 할 때 주파수를 고려하지 않는 최적조류계산을 통한 모의보다 최적 조속기 응답 조류계산을 통한 모의를 통하여 보다 효율적인 해를 제시할 수 있음을 보인다.

표 3. 각 상정사고별 부하차단 최소화 결과 비교

Table 3 Result of load shedding simulation

		차단용량(MW)				합계	주파수 (Hz)
		4번모선	7번모선	8번모선	12번모선		
21-22 선로사고	OPF	0.00	0.00	10.48	8.26	18.75	
	OGPF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	59.93
31번 발전기 고장	OPF	109.12	52.39	398.29	7.29	570.19	
	OGPF	0.00	21.74	345.87	7.88	375.49	59.40
모두 고려	OPF	145.03	46.84	390.16	8.25	590.27	
	OGPF	19.97	24.45	344.57	8.50	397.49	59.40

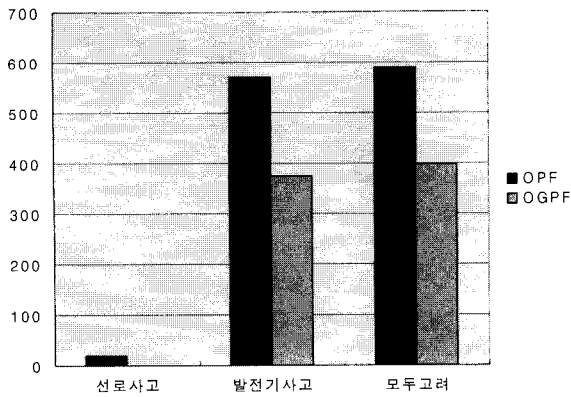


그림 10. 각 상정사고별 부하차단 최소화 결과  
 Fig. 10 Result of load shedding simulation

본 사례연구에서는 상정사고에 대한 부하차단 최소화 시뮬레이션을 수행하였다. 사고 발생시 계통의 주파수가 떨어지는 현상이 발생하고 발전기의 기계적 입력을 조절할 수 없는 단계에서 빠른 동작특성을 보이는 제어동작을 통하여 유효전력 손실을 최소화 시키면 떨어지는 계통의 주파수를 최소화시킬 수 있다. 하지만 계통의 허용 가능한 주파수 범위를 넘어서게 되면 주파수 회복을 위해서는 부하차단을 고려하게 된다. 상정사고 이후 준 동적 상태는 AGC 동작 이전 상태를 고려하므로 발전기의 기계적 입력을 변화시킬 수 없으며 따라서 부하차단은 주파수 회복 및 각 모션전압을 유지시키기 위한 중요한 수단이 된다. 계통의 허용 가능한 주파수 제약을 가지는 최적 조속기 응답 조류계산은 조속기 응답을 통하여 유효전력 출력을 조절하고 부하차단을 보다 효율적으로 수행할 수 있음을 보였다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 조속기 응답 조류계산의 개념을 통하여 상정사고 발생에 따른 준동적 상태에서의 최적해를 찾는 기법을 제시하였다. 최적 조속기 응답 조류계산은 조속기 응답이 끝나고 주파수 변화율이 0이 되는 시점에서의 계통상태에 대하여 최적화를 수행할 수 있다. 따라서 AGC 동작 이전의 한 단계 빠른 시점에서의 최적해를 제시하며 이러한 시점에서 주파수를 고려하지 않는 최적 조류계산보다 효율적으로 최적해를 제시할 수 있음을 보였다. 최적 조속기 응

동 조류계산은 외란의 발생에 따른 계통 주파수의 변화량을 제시해 주고 있으며 허용 주파수 범위 안에서 해가 존재하도록 하기 위한 모의를 가능하게 한다. 사례연구에서 제시한 부하차단 최소화는 최적 조속기 응답 조류계산을 활용한 하나의 예시였으며 이를 활용하면 계통보호를 위한 다양한 시뮬레이션이 가능할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa, and R. Yokoyama, "An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.3, August 1998
- [2] Torres, Geraldo Leite, "Interior-point method for nonlinear optimal power flow using voltage rectangular coordinates", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.4, Nov, 1998
- [3] D. Idizior, P.Rusche, S.Tedeschi, L.shu, A. Yazdankhah, "Inertial, Governor, and AGC/Economic Dispatch Load Flow Simulations of Loss of Generation Contingencies", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.PAS-104, No.11, November 1985
- [4] C.W. Taylor, K.Y.Lee, and D.P.Dave, "Automatic Generation Control with Governor Deadband Effects", IEEE Trans. on Power App.and Syst., Vol. PAS-98, Nov./Dec. 1979
- [5] R.A.Schlueter, J.C.Lo, T.Lie, T.Y.Guo, I.Hu, "A fast accurate method for midterm transient stability simulation of voltage collapse in power systems", Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. , Vol.1, 1989
- [6] PSS/E 30, "Pss/e Model Manual", Shaw Power Technologies, Inc, August, 2004
- [7] "Voltage Stability / Security Assessment and On-Line Control", EPRI TR-101931 Volume 1, Project 3040-01 Final Report, April, 1993
- [8] H.Song, "Equilibrium optimization (EOPT) with a nonlinear interior point method", IEEE PES 2006 Meeting

저 자 소 개



**김 태 균 (金 泰 均)**

1978년 5월 6일생. 2005년 고려대 공대 전기전자전파공학부 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정.

Tel : 02-3290-3803

E-mail : harlang@korea.ac.kr



**송 화 창 (宋 和 昌)**

1973년 1월 24일생. 1997년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 박사 졸업. 현재 군산대 전기공학과 조교수

Tel : 063-469-4747

E-mail : hawchang@gmail.com



**이 병 준 (李 炳 峻)**

1961년 7월 16일생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 아이오와 주립대 전력계통 석사 졸업. 1994년 동 대학원 전력계통 박사 졸업. 현재 고려대 전기공학과 정교수.

Tel : 02-3290-3242

E-mail : leeb@korea.ac.kr



**차 준 민 (車 濬 敏)**

1964년 5월 9일생. 1989년 고려대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 박사 졸업. 현재 대전대 전기정보시스템공학과 교수

Tel : 031-539-1915

E-mail : chamin@road.daejin.ac.kr