

# 하이브리드 알고리즘을 응용하여 안전도제약을 만족시키는 최적전력조류

論 文

49A-6-8

## Security Constrained Optimal Power Flow by Hybrid Algorithms

金 圭 浩\* · 李 相 奉\*\* · 李 在 奎\*\*\* · 劉 錫 九§  
(Kyu-Ho Kim · Sang-Bong Rhee · Jae-Gyu Lee · Seok-Ku You)

**Abstract** - This paper presents a hybrid algorithm for solving optimal power flow(OPF) in order to enhance a system's capability to cope with outages, which is based on combined application of evolutionary computation and local search method.

The efficient algorithm combining main advantages of two methods is as follows : Firstly, evolutionary computation is used to perform global exploitation among a population. This gives a good initial point of conventional method. Then, local methods are used to perform local exploitation. The hybrid approach often outperforms either method operating alone and reduces the total computation time.

The objective function of the security constrained OPF is the minimization of generation fuel costs and real power losses. The resulting optimal operating point has to be feasible after outages such as any single line outage(respect of voltage magnitude, reactive power generation and power flow limits). In OPF considering security, the outages are selected by contingency ranking method(contingency screening model).

The method proposed is applied to IEEE 30 buses system to show its effectiveness.

**Key Words** : 최적전력조류(Optimal Power Flow), 안전도제약(Security Constraint), 진화계획법(Evolutionary Programming), 순차적 2차계획법(Sequential Quadratic Programming), 다중목적함수(Multi-Objective Function), 하이브리드 알고리즘(Hybrid Algorithms)

### 1. 서 론

OPF(Optimal Power Flow)는 1968년 Dommel과 Tinney에 의해 연구된 이후 많은 연구자들이 관심을 갖는 전력계통의 중요한 최적화 문제이다[1]. OPF문제는 전력계통이 요구하는 부하와 시스템 파라미터로 구성된 제약함수를 만족하도록 목적함수를 최적화하여 전력계통의 제어변수를 제어하는 비선형 문제이다. 이러한 OPF문제 해결을 위해서 함수의 기울기를 정보로 사용하는 Gradient방법[2]과 선형계획법(Linear Programming)[3,4], 순차적 2차계획법(Sequential Quadratic Programming : SQP)[5], Newton방법[6], P-Q 분할법[7]과 내점법(Interior Point Algorithm)[8] 등 같은 여러 가지 방법들이 적용되었다.

이러한 방법들은 전역적인 최적해를 얻기 위해서 목적함수가 convex 해야 한다는 조건을 필요로 하며 또한 convex 함수로 구성하기 위해 함수를 간략화해서 적용하기도 한다. 그러나 실제통에서 OPF문제는 non-convex하여 지역적인 최소값이 여러개 존재하며, 발전기의 valve-point loading

효과 등이 고려되면 목적함수는 더욱 복잡하게 구성된다.

기존의 최적화 방법을 OPF에 적용할 경우 최적값 수렴에 있어서 초기값의 영향이 상당히 크며, 최적값의 탐색에 있어서도 지역적 최소값으로 수렴하거나 발산하는 경우도 발생하게 된다. 따라서 OPF 문제의 전체적인 해석이 아닌 특별히 한정된 사례에 이용되거나 적용되어지는 제약함수나 목적함수의 유형에 따라 선택적으로 사용해야 하는 단점을 갖고 있다.

확률적 및 진화론적 방법에 기초한 진화연산(Evolutionary Computation)의 한 분야인 진화계획법(Evolutionary Programming : EP)은 교차, 선택 및 돌연변이의 연산자를 사용해 전역적 최적해를 탐색하는 알고리즘이다[9,10]. Simulated Annealing(SA)역시 EP와 마찬가지로 전역적 최적해 탐색을 보장하는 방법이다[11]. 그러나 EP 및 SA방법은 전역적 최적해에 대한 탐색능력을 갖고 있으나, 최적해 탐색 후반부에 탐색 속도가 늦다는 단점을 갖고 있다. 따라서, 본 연구에서는 OPF 문제를 해석하기 위하여 진화연산의 전역적 탐색 능력과 고전적 최적화 방법을 결합한 하이브리드 알고리즘을 제안하였다.

두 알고리즘의 장점만을 결합한 하이브리드 알고리즘은 탐색초기에 진화계획법(Evolutionary Programming : EP)을 사용하여 전역적 최적해 근처까지 빠르게 탐색한 후, 순차적 2차계획법(Sequential Quadratic Programming : SQP)와 같은 지역적 탐색법을 사용해서 정확한 값을 얻을 수 있다. 하이브리드 알고리즘은 각 알고리즘을 단독으로 사용하는 경우보다 최적해 탐색능력이 우수하고 계산시간을 단축시킬

\* 正 會 員 : 安山工科大学 助教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 正 會 員 : 大德大學 專任講師

§ 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日子 : 2000年 4月 14日

最終完了 : 2000年 5月 23日

수 있는 능력을 갖는다.

또한, OPF 문제를 해석하는데 있어 안전도를 고려하였다. 그림 1.1에 나타냈듯이 안전도를 고려하는데 있어서 상정사고 screening model, 즉 상정사고 순위 결정 방법(Contingency Ranking Method)을 이용하여, 각 사고 중 가장 위험한 경우에 대하여 예를 들었다[11,12]. OPF해석 후에 구해진 새로운 운전점은 계통내의 사고 후에도 전압크기, 무효전력량과 전력조류 한계값을 만족하게 된다.

안전도를 고려한 OPF 문제에 적용한 하이브리드 알고리즘의 효율성을 나타내기 위해 IEEE 30 모선계통에 적용하였다.

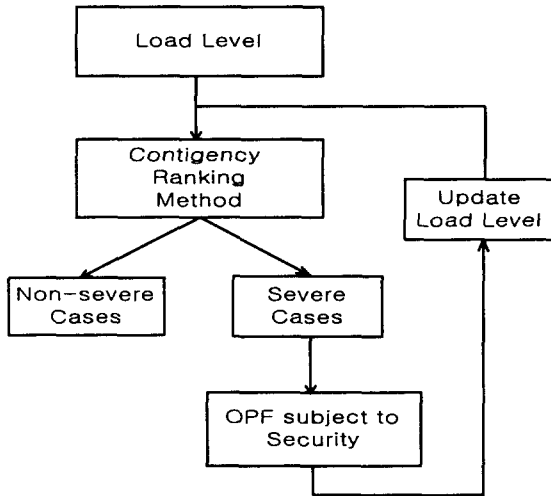


그림 1.1 상정사고 순위결정법에 의한 OPF  
Fig. 1.1 OPF using contingency ranking method

## 2. 문제의 정식화

안전도제약을 고려한 OPF의 목적은 유효전력 손실, 무효전력량, 발전비용 등을 최소화하거나 전압레벨을 최대화하는 것이며, 또한 전압, 무효전력 및 전력조류 한계를 고려한 정전사고에서의 최적 운전 가능점을 결정하는 것이다[1,10].

### 2.1 다중목적함수

안전도제약을 고려한 OPF의 다중목적함수로서, 발전 연료비용과 계통유효전력 손실을 최소화하였다. 전압레벨을 최대화하는 것이며, 또한 전압, 무효전력 및 전력조류 한계를 고려한 정전사고에서의 최적 운전 가능점을 결정하는 것이다.

#### - 연료비 함수

전력계통의 발전 연료비용을 최소화하기 위하여 식 (2.1)과 같은 연료비 함수를 목적함수로 사용하였다.

$$\text{Min FuelCost} = \sum_{i=1}^{NG} \{ a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \} \quad (2.1)$$

여기서,  $i$ 는 각 발전기 모선이고,  $NG$ 는 계통전체의 발전기 모선의 수이고,  $P_{Gi}$ 는 각 발전기의 유효 전력출력이고,  $a_i, b_i, c_i$ 는 각 발전기의 연료계수이다.

#### - 계통유효전력 손실

선로로부터 발생하는 유효전력 손실을 최소화하여 운전효율을 높일 수 있다.

$$\text{Min Ploss} = \sum G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (2.2)$$

여기서  $G_{ij}$ 는 모선  $i$ 와  $j$  사이 어드미턴스의 실수부,  $V$ 는 모선의 전압크기,  $\theta_{ij}$ 는 모선  $i$ 와  $j$ 사이의 위상차이다. 계통손실의 최소화는 유효전력조류에 대하여 여유를 갖게 되므로 계통 운전조건을 향상시킬 수 있다.

### 2.2 제약조건

안전도제약은 다음의 두가지 유형으로 나눌 수 있다.

- 계통 기준상태의 안전도제약(Intact System Security Constraints :  $N$  SC)을 갖는 시스템의 제약은 모선 전압크기 및 발전기 무효전력출력이 되며 이러한 양들은 최적화 후에 원래 계통에서의 허용 범위내에서 유지되어야 한다.
- 단일사고시 안전도제약(Single Outage Security Constraints :  $N-1$  SC)은 단일사고시의 제약을 나타내며 사고 후에도 모선 전압크기 및 발전기 무효전력출력은 계통의 허용범위를 만족해야 한다.

안전도제약을 고려한 OPF문제의 변수는 제어변수와 상태변수의 두 종류의 변수로 나눌 수 있다.

#### - 제어변수

최적화 방법이나 알고리즘에 의해 정해지거나 제어되는 변수를 나타내며 각 발전기의 발전기 유효전력 출력과 각 발전기의 전압크기, 변압기 탭비, 병렬콘덴서 및 리액터 등과 같은 무효전력원이 이에 속한다.

$$\begin{aligned} P_{Gi}^{\min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ V_{Gi}^{\min} &\leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max} \\ T_i^{\min} &\leq T_i \leq T_i^{\max} \\ Q_{cri}^{\min} &\leq Q_{cri} \leq Q_{cri}^{\max} \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서,  $P_{Gi}$ 는 목적함수의 연료비함수에서 설명한 각 발전기의 유효전력출력이고,  $V_{Gi}$ 는 각 발전기모선의 전압크기이고,  $T_i$ 는 변압기가 설치된 모선의 탭비이고,  $Q_{cri}$ 는 모선에 설치되어 있는 병렬콘덴서 및 리액터이다. 또한,  $\cdot^{\max}$  와  $\cdot^{\min}$ 는 각각의 상한치이다.

#### - 상태변수

상태변수는 각 모선에서의 전압크기 및 발전기 모선의 무효전력출력이 된다. 제약조건은 OPF를 통해 얻은 계통의 최적 운전점에 있어서 기준상태와 사고 후에도 모두 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} V_i^{\min} &\leq V_i \leq V_i^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \end{aligned} \quad (2.4)$$

여기서,  $V_i$ 는 각 부하모선의 전압크기이고,  $Q_{Gi}$ 는 발전기 모선의 무효전력출력이다.

- 등식 제약조건

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{NG} P_{Gi} - P_D - P_{Loss} &= 0 \\ h_{p0}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) &= 0 \\ h_{pj}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) &= 0 \\ h_{q0}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) &= 0 \\ h_{qj}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

식 (2.5)의 첫 번째 식은 계통의 수급평형조건이며, NG는 계통 전체 발전기 수이고,  $P_D$ 는 계통 전체 부하이며,  $P_{Loss}$ 는 계통 전체 유효전력 손실을 의미한다. 또한,  $\mathbf{u}$ (발전기의 유효전력출력, 발전기모선의 전압크기, 변압기가 설치된 모선의 탭비, 병렬콘덴서 및 리액터)는 제어변수이고,  $\mathbf{x}$ (부하모선의 전압크기, 발전기 모선의 무효전력출력)는 상태변수이다.  $h_{p0}$ 와  $h_{pj}$ 는 각각 기준상태 및 j번째 상정 사고 후에 계통전체에 대한 유효전력 밸런스이며,  $h_{q0}$ 와  $h_{qj}$ 는 각각 기준상태 및 j번째 상정사고 후에 계통전체에 대한 무효전력 밸런스, 즉 조류계산 만족에 대한 등식제약조건이다.

본 연구에서의 OPF계산은 안전도제약을 만족하도록 하는 계통 운전점을 결정하는 것이며, 이러한 최적 운전점은 안전도에 관한 분석에 의하여 계산된다. 안전도제약을 고려한 OPF에 의하여 얻은 계통의 최적 운전점은 모든 제약을 만족하며 계통내의 단일 사고전후에 전압크기 및 무효전력 발전량에 관한 한계범위를 만족하게 된다.

2.3 안전도제약을 고려한 OPF

2.1과 2.2절의 안전도제약을 고려한 OPF 문제의 다중목적 함수와 제약조건을 식 (2.6)과 같이 가중합(Weight Sum)으로 나타낸 일반적인 최적화문제 형태로 표현하였다.

$$\begin{aligned} \text{Min Obj} &= W1 * \text{FuelCost} + W2 * \text{Ploss} \quad (2.6) \\ \text{s.t} \quad &g(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \leq 0 \\ &h(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = 0 \end{aligned}$$

$W1$ 과  $W2$ 는 각 목적함수의 가중치이고,  $g(\mathbf{u}, \mathbf{x})$ 와  $h(\mathbf{u}, \mathbf{x})$ 는 부등식 및 등식제약조건이다.  $W1$ 과  $W2$ 는 일반적으로 다중목적함수 최적화에서 단일목적함수 최적화 문제로 변형할 때 각 목적함수의 비중에 따라 상대적으로 크기를 임의로 선정한다.

3. 탐색 알고리즘

진화연산은 자연계의 유전현상과 진화원칙에 근거를 둔 확률적 최적화 알고리즘으로서 크게 유전알고리즘(GA), 진화계획법(EP) 및 진화기법(ES)으로 분류된다[9,10]. 진화 연산은 목적함수 값만을 정보로 사용함으로 함수의 연속성 및 미분가능에 대한 조건이 필요 없다. 또한 확률적 방법에 의한 탐색을 함으로써 전역적해를 탐색하는 강력한 수렴특성을 갖고 있으나, 최적해 탐색 후반부에 탐색 속도가 늦다는

단점을 갖고 있다. 따라서, 본 연구에서는 OPF 문제를 해석하기 위하여 전역적 탐색기법인 진화계획법과 고전적 최적화 방법인 SQP를 결합한 하이브리드 알고리즘을 제안하였으며, 그림 3.1에 개략적인 알고리즘을 나타내었다. 두 알고리즘의 장점만을 결합한 하이브리드 알고리즘은 탐색초기에 진화계획법을 사용하여 전역적 최적해를 근방까지 빠르게 탐색한 후, 목적함수의 적합도가 거의 변화하지 않으면 지역적 탐색법인 SQP에 초기해로 사용하여 더욱 정확한 값을 얻을 수 있다.

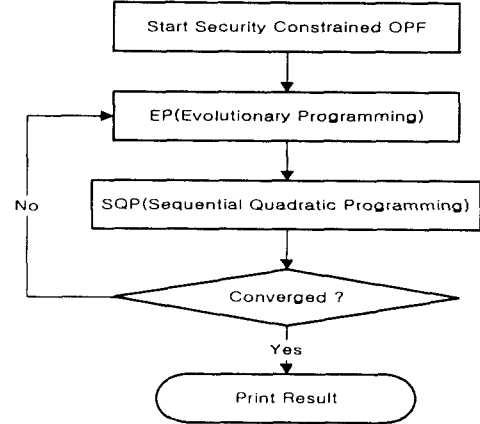


그림 3.1 하이브리드 알고리즘의 순서도  
Fig. 3.1 Flowchart of hybrid algorithms

3.1 진화계획법

진화계획법은 목적함수 값만을 정보로 사용함으로 함수의 연속성 및 미분가능에 대한 조건이 필요 없다는 전제조건에 의하여 일반화시킨 식 (2.6)의 다중목적함수로 표현한 목적함수를 식 (3.1)과 같이 적합도(Fitness) 함수로 사용하여 최소화 문제로 다룬다[9].

$$\text{Fitness} = W1 * \text{FuelCost} + W2 * \text{Ploss} \quad (3.1)$$

진화계획법에 의한 최적화 절차는 다음과 같다.

절차 1 : 초기화

각 개체에서 유전자는 구하고자하는 제어변수로 구성되며, 각 제어변수의 상하한치 범위내에서 랜덤하게 발생시킨다.

절차 2 : 제약조건 적용 및 적합도 평가

각 개체의 유전자를 이용하여 조류계산을 행한 후 연료비 함수 및 계통유효전력을 계산하고, 본 연구의 다중목적함수에 대한 적합도를 평가한다. 미리 정한 횟수이상 제약을 만족하지 않는 개체는 재 발생시켜 적합도를 평가한다.

절차 3 : 수렴판정

최대세대이면 종료하고 아니면 절차 4로 감

절차 4 : 돌연변이 과정

식 (3.2)는 돌연변이와 난수 z의 표준편차를 결정한다.  $\mathbf{p}_n$ 은 돌연변이 대상의 유전자 즉 돌연변이 대상인 제어변수이며,  $\hat{\mathbf{p}}_n$ 는 돌연변이 후의 유전자값이다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{p}}_n &= \mathbf{p}_n + \mathbf{a}_i \cdot \sigma_n \cdot z \cdot k(z) \\ \sigma_n &= \sqrt{\beta_n \cdot F(\mathbf{p}_n) + \gamma_n} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$a_i$ 는 크기조정 파라미터로서 각 유전자의 상 하한 폭의 크기에 비례하는 값이다.  $z$ 는 정규분포 특성을 갖는 난수이며,

$$함수 k(z) = \begin{cases} \cos 2\pi z, & i = 1 \\ \sin 2\pi z, & i = -1 \end{cases}, i = (-1)^k, k \text{ 는 난수}$$

를 사용하는 횟수이다.

함수  $k(z)$ 는 탐색의 방향이 음 또는 양의 방향으로 이루어지게 하며 또한 유전자의 개체변이 크기에 랜덤성을 준다.

**절차 5 : 경쟁과 선택**

식 (3.3)은 경쟁 및 선택 방식을 나타낸다.

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^{q_j} I_{R^+}(F(s_j) - F(s_{u_i}))}{\sum_{i=1}^{q_j} I_{R^+}(F(s_j) - F(s_{u_i}))}, \forall j = \{1, 2, \dots, 2N\} \quad (3.3)$$

여기서, 개체  $s_i$ 는 적합도를 계산할 개체이고  $s_{u_i}$ 는 전체 개체 중에서 임의로 선택된 개체이다. 이때 개체  $s_i$ 는 적합도에 근거하여 임의로 선택된  $q$ 개의 개체  $s_{u_i}$ 와 경쟁한다. 그러므로  $w_j$ 는  $j$ 번째 개체가 무작위로 선택된  $q$ 개의 개체에 대한 경쟁에서 승리한 횟수를 나타낸다. 이때  $q$ 는 외부파라미터로서  $q$ 를 크게 선택해 줄수록 결정적인 선택과정이 이루어지고 작게 할수록 확률적 선택과정이 이루어진다.

**3.2 Sequential Quadratic Programming(SQP)**

SQP는 매 번의 반복 계산 시 모든 제약조건을 만족하는 실현가능 해를 순차적 방법으로 탐색하는 비선형 문제의 해법이다. 기본적인 알고리즘 구성은 라그랑제 함수의 헤시안 행렬을 사용하며 QP와 line search 등의 여러 가지 탐색 방법이 조합된 탐색 기법이다[14].

SQP는 실현 가능한 초기해를 기반으로 라그랑제 함수의 헤시안 행렬을 구성하고 이 헤시안 행렬을 이용해 QP를 해석함으로써 탐색 방향을 결정한다. SQP에서 탐색방향 및 step size는 여러 가지 방법을 조합해서 사용하므로 목적함수, 제약식의 형태에 따라 다양하게 사용될 수 있다. 본 연구에서 사용된 방법은 line search (monotone, nonmonotone line search) 및 Armijo type arc search를 사용하였다[14]. 계산된 탐색 방향은 목적 함수를 감소시키는 방향으로 진행하며 모든 제약식을 만족한다.

SQP 방법의 일반적인 알고리즘 구성을 요약하면 다음과 같이 3단계로 구성된다.

**절차 1 : 초기화(initialize)**

변수 및 탐색 방향, step size.

**절차 2 : 최적해 탐색(search)**

- i) 변수 및 헤시안 행렬로 구성된 QP 문제의 해를 계산함으로써 해서 탐색 방향을 결정한다.
- ii) 목적함수와 등식, 부등식의 모든 제약을 만족하는 step size를 결정한다.

**절차 3 : 반복계산(update)**

- i) 헤시안 행렬 업데이트.
- ii)  $x_{k+1} = x_k + t_k d_k + t_k^2 \tilde{d}_k$   
여기서  $t_k$  :  $k$ 번째 step size  
 $d_k$  :  $k$ 번째 탐색 방향  
 $\tilde{d}_k$  :  $d_k$ 를 사용해 얻어지는 QP 문제의 해
- iii) 제약식을 포함한 라그랑제 문제의 해석

$$\min || \sum_{j=1}^{l_1} \zeta_{k,j} \nabla f_j(x_{k+1}) + \xi_k + \sum_{j=1}^{l_2} \lambda_{k,j} \nabla g_j(x_{k+1}) + \sum_{j=0}^{l_3} \mu_{k,j} \nabla h_j(x_{k+1}) + \sum_{j=0}^{l_4} \mu_j \nabla h_j(x_{k+1}) ||^2 \quad (3.4)$$

여기서

$\zeta_{k,j}, \xi_k, \mu_{k,j}, \lambda_{k,j}$  : QP 및 제약식과 관련된 K-T 승수이다.

**4. 사례연구**

안전도 제약을 고려한 OPF 문제에 진화연산의 진화계획법과 고전적 최적화 방법인 SQP를 결합한 하이브리드 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 IEEE 30 모선 41선로 모델계통에 적용하였다.

본 알고리즘에서 응용한 상정사고 위험순위 결정 방법은 문헌[12,13]의 방법을 이용하였으며, 38번 선로(모선 27-30)를 고려하였다. 유효전력 출력범위 및 발전 연료비용 계수는 표 4.1에 나타내었으며[10], 표 4.2에는 발전기 유효전력 출력의 상하한치와 발전기 유효전력출력, 총 연료비용 및 계통 유효전력 손실에 대하여 기준상태 및 안전도 제약을 고려한 OPF의 결과를 나타내었다. 발전기 유효전력출력이 OPF를 행한 후 새롭게 배분되어 발전기 총 연료비용이 기준상태(Base Case) 보다 감소되었음을 알 수 있다. 여기서 기준상태란 OPF에 의한 최적화되지 않은 상태를 의미한다. 계통 유효전력 손실의 경우 사고전후에 있어 기준상태 보다 감소되었으나 비교한 EP, SQP 및 Hybrid 방법에 있어서 계통 유효전력손실은 EP의 결과보다 Hybrid의 결과가 다소 크다. 이것은 발전기 연료비용과 계통 유효전력손실을 다중 목적함수로 처리하였기 때문에 발전기 연료비용이 EP에서 보다 Hybrid에서 훨씬 많이 감소되었기 때문이며, 결국 다중목적함수의 값은 Hybrid의 결과가 작다는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 Hybrid 경우 계통전체 운전비용을 감소시켰으므로, 안전도를 고려한 OPF에서 유효전력배분이 적절히 수행되었음을 알 수 있다.

표 4.1 발전기 연료비용계수

Table 4.1 Generator fuel cost coefficients

Bus No.	Fuel Cost Coefficients		
	a	b	c
1	0.00	2.00	0.00375
2	0.00	1.75	0.01750
5	0.00	1.00	0.06250
8	0.00	3.25	0.00834
11	0.00	3.00	0.02500
13	0.00	3.00	0.02500

표 4.2 발전기 유효전력출력 비교

Table 4.2 Comparison of generator real power output

Real Gen.[MW]	$P_G^{\min}$	$P_G^{\max}$	Base Case	EP	SQP	Hybrid
$P_{G1}$	95	190	139.0 (139.6)	103.6 (103.7)	103.6 (104.1)	103.6 (104.1)
$P_{G2}$	40	85	57.56	85.0	85.0	85.0
$P_{G5}$	15	70	24.56	28.377	28.408	28.383
$P_{G8}$	10	35	35.0	34.999	34.999	34.999
$P_{G11}$	10	35	17.93	21.081	21.168	21.111
$P_{G13}$	12	40	16.91	15.966	15.858	15.943
Generation Fuel Cost[\$]			762.824 (764.857)	740.215 (741.517)	740.268 (741.572)	740.234 (741.537)
Real Power Loss[MW]			7.5305 (8.1983)	5.6512 (6.1200)	5.6503 (6.1196)	5.6487 (6.1176)

( ): 사고후 슬랙모선의 유효전력출력, 발전연료비 및 유효전력손실

표 4.3 발전기 무효전력출력 비교

Table 4.3 Comparison of generator reactive power output

Reactive Gen. [MVAR]	$Q_G^{\min}$	$Q_G^{\max}$	Base Case	EP	SQP	Hybrid
$Q_{G1}$	-20	60	-13.1(-13.2)	-3.0(-3.0)	-2.9(-3.0)	-2.9(-3.0)
$Q_{G2}$	-20	60	24.4(24.7)	12.9(13.1)	13.3(13.6)	13.3(13.5)
$Q_{G5}$	-15	62.5	24.6(24.7)	24.7(24.8)	24.5(24.6)	24.5(24.6)
$Q_{G8}$	-5	10	2.3(3.1)	9.4(10.0)	9.4(10.0)	9.4(10.0)
$Q_{G11}$	-10	30	31.7(31.8)	12.2(12.3)	28.0(28.1)	23.0(23.1)
$Q_{G13}$	-15	30	33.9(34.1)	10.5(10.6)	6.2(6.3)	6.3(6.4)

( ): 사고후 발전기 무효전력출력

표 4.3은 상태변수인 발전기 무효전력출력의 상하한치와 안전도 제약을 고려한 OPF의 결과를 나타내었다. 기준상태에서 사고전후에 있어 발전기 모선 11과 13번의 경우 무효전력출력 범위를 위반하였으나, 안전도를 고려한 OPF 후에 무효전력출력의 범위를 모두 만족하며, 기준상태 보다 감소되었다. 또한, 발전기의 경우 역률은 대부분의 경우 0.9 이상으로 운전하는데 2번 발전기 모선의 경우 OPF전후 약 0.92

에서 각각의 방법 모두 0.98정도로 향상되었다. 8번 발전기 모선에서는 기준상태에서는 0.99 정도 되나, OPF 후에 있어 무효전력출력이 상당히 증가되어 역률이 0.96정도로 감소되었음을 알 수 있다. 그러나, 11번과 13번 발전기 모선의 경우 기준상태에서 역률이 0.5 이하였으나, OPF 이후 11번 발전기 모선은 EP에서 역률이 0.86정도, SQP 및 Hybrid의 결과는 0.7정도이고, 13번 모선은 EP가 0.83, Hybrid는 0.93으로 되었다. 11번 모선은 발전기의 전압크기가 SQP 및 Hybrid의 경우가 높게 최적화 되었기 때문이나, Hybrid 경우 계통 전체 운전비용을 감소시켰으므로, 적절한 OPF를 수행한 결과라 볼 수 있다. 이상으로부터 안전도를 고려한 OPF에서 무효전력배분이 적절히 수행되었음을 알 수 있다.

무효전력 제어변수에 대한 기준상태 및 안전도제약을 고려한 OPF 후의 결과를 표 4.4에 나타내었으며, 발전기 모선 전압은 6개, 변압기 탭은 4개, 병렬 콘덴서는 2개로 구성하였다. 무효전력 제어변수의 상하한치는 발전기모선 전압크기의 경우 0.95~1.1[p.u.], 변압기 탭은 0.9~1.1[p.u] 그리고 병렬콘덴서의 용량은 0.50[p.u.]로 하였다.

표 4.4는 선로 38의 탈락사고에 대한 상태변수인 부하모선 중 일부 모선의 전압크기의 변화를 나타낸 것이며, 허용범위는 0.95~1.05[p.u.]로 하였다. 표에서 알 수 있듯이 기준상태에서는 사고 전후에 제약을 위반하는 부하모선이 있으나, 안전도제약을 고려한 OPF 이후에 있어서 어떠한 부하모선도 제약을 위반하지 않았다. 특히, 모선 29와 30의 경우에 크게 제약을 위반하였으나, EP, SQP 및 Hybrid 각각의 경우에 모두 만족할 만한 결과를 얻었다.

또한, SQP의 경우 초기해에 따라 수렴속도와 해가 크게 영향을 받기 때문에 Hybrid 적용시 EP의 해를 SQP의 초기해로 선정하는데 있어 적절히 선택하여야 한다. 그러나 EP는 전역적 탐색기법이므로, 탐색초기에 대부분의 경우 빠르게 전역적 최적해 근처로 수렴해 나아간다. 따라서 이 값을 SQP의 초기해로 사용하여 대부분의 경우에 있어 EP 단독, 또는 SQP 단독으로 최적화 한 경우보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이상으로부터 본 연구의 알고리즘이 전력계통의 최적전력조류를 위한 우수한 방법임을 알 수 있었다.

표 4.4 무효전력 제어변수 비교[100 Base MVA]

Table 4.4 Comparison of reactive power control variables[100 Base MVA]

Reactive Power Control Variables[p.u.]	Base Case	EP	SQP	Hybrid
$V_{G1}$	1.0500	1.07168	1.07192	1.07216
$V_{G2}$	1.0400	1.06178	1.06217	1.06241
$V_{G5}$	1.0100	1.03434	1.03481	1.03506
$V_{G8}$	1.0100	1.03473	1.03562	1.03589
$V_{G11}$	1.0500	1.06671	1.09967	1.08854
$V_{G13}$	1.0500	1.06360	1.05770	1.05803
$T_1$	1.0780	1.02688	1.04718	1.04505
$T_2$	1.0690	1.04473	1.00676	1.01796
$T_3$	1.0320	0.98526	0.97620	0.97633
$T_4$	1.0680	0.96412	0.96534	0.96535
$Q_{C10}$	0.1900	0.37504	0.27131	0.31542
$Q_{C24}$	0.0400	0.11582	0.11592	0.11588

표 4.5 상정사고 전후의 모선 전압크기 비교(사고선로 38, 모선 27-30)

Table 4.5 Comparison of bus voltage magnitude for pre and post contingency (outage Line 38, Bus 27-30)

Bus Voltage Magnitude(p.u.)	Pre-Contingency				Post-Contingency			
	Base Case	EP	SQP	Hybrid	Base Case	EP	SQP	Hybrid
V <sub>18</sub>	0.9669	1.0280	1.0279	1.0281	0.9665	1.0277	1.0276	1.0278
V <sub>19</sub>	0.9623	1.0267	1.0267	1.0269	0.9619	1.0264	1.0264	1.0266
V <sub>20</sub>	0.9657	1.0314	1.0314	1.0317	0.9652	1.0311	1.0311	1.0314
V <sub>25</sub>	0.9372	1.0400	1.0398	1.0400	0.9340	1.0379	1.0377	1.0380
V <sub>26</sub>	0.9179	1.0227	1.0225	1.0228	0.9147	1.0206	1.0204	1.0206
V <sub>27</sub>	0.9377	1.0500	1.0497	1.0500	0.9335	1.0472	1.0469	1.0472
V <sub>29</sub>	0.9158	1.0307	1.0304	1.0307	0.8818	1.0031	1.0027	1.0030
V <sub>30</sub>	0.9031	1.0196	1.0192	1.0195	0.8398	0.9668	0.9665	0.9668

5. 결 론

참 고 문 헌

본 연구에서는 안전도제약을 고려한 OPF 문제를 해석하기 위하여 진화연산과 같은 전역적 탐색기법과 고전적 최적화 방법을 결합한 하이브리드 알고리즘을 제안하였다.

두 알고리즘의 장점만을 결합한 하이브리드 알고리즘은 탐색초기에 진화계획법을 사용하여 전역적 최적해 근처까지 빠르게 탐색한 후, 지역적 탐색법인 SQP를 사용하여 더욱 정확한 값을 얻을 수 있었다.

또한, SQP의 경우 초기해에 따라 수렴속도와 해가 크게 영향을 받기 때문에 Hybrid 적용시 EP의 해를 SQP의 초기해로 선정하는데 있어 적절히 선택하여야 한다. 그러나 EP는 전역적 탐색기법이므로, 탐색초기에 대부분의 경우 빠르게 전역적 최적해 근처로 수렴해 나아간다. 따라서 이 값을 SQP의 초기해로 사용하여 대부분의 경우에 있어 EP 단독, 또는 SQP 단독으로 최적화 한 경우보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

안전도제약을 고려한 OPF 문제의 최적해를 탐색하는데 있어 발전연료비용 함수와 계통유효전력손실 함수를 고려한 다중목적함수로 평가함수를 정식화하였다. OPF 문제를 해석하는데 있어 안전도를 고려하여 OPF 해석 후에 구해진 새로운 운전점은 계통내의 사고 후에도 모선 전압크기 등 계통 제약조건을 만족함을 알 수 있었다.

따라서, 본 논문에서 제시한 하이브리드 알고리즘은 여러 가지 목적함수를 갖는 문제에 기존의 방법보다 정확하고 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이며, 또한 전력계통의 제반적인 최적화 문제의 효율적인 해법으로 제시될 수 있을 것이다.

향후 연구로는 연계계통에 대하여 계통내의 다양한 사고를 고려하여 안전도제약을 만족시키는 OPF를 할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학공동연구소 주관으로 수행되었습니다. (과제번호 : 95-143)

- [1] H.W. Dommel &W.F. Tinney, "Optimal Power Flow Solution", IEEE Trans. PAS-87, 1968, pp.1866-1876.
- [2] D.I Sun, B. Ashley, B. Brewer, A Hughes, W. F. Tinney, "Optimal Power Flow by Newton Approach," IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 10, pp2864-2880,1984
- [3] E. Hobson, "Network Constrained Reactive Power Control Using Linear Programming", IEEE Trans. on Power PAS, Vol. 99, pp868-877, 1980
- [4] A. Urdaneta, "A Hybrid Genetic Algorithm for Optimal Reactive Power Planning Based Upon Successive Linear Programming IEEE Trans. on Power System, Vol.9, Aug. 1994, pp1327-1336.
- [5] J. S. Lipowski, C. Charalambous, "Solution of Optimal Load Flow Problem by Modified Recurcive Quadratic Programming Method", Proceeding of IEE, Vol. 5, No. 3, pp691-711, 1990
- [6] R.C. Burchett, H.H. Happ, D.R. Vierath, "Quadratically Convergent Optimal Power Flow," IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 11, pp3267-3276,1984.
- [7] R.R. shoult, D.T. Sun, "Optimal Power Flow Based upon P-Q Decomposition," IEEE Trans. on PAS, Vol. 101, No. 2, pp397-405, 1982
- [8] J. Momoh, S.X. Guo, E.C. Ogbuobiri & R. Adapa, "The Quadratic Interior Point Method Solving Power Systems Optimisation Problems", IEEE Trans. on Power System, Vol. 9, Aug. 1994, pp1327-1336.
- [9] J. R. McDonnell, D. B. Fogel, "Evolutionary programming IV", MIT Press, 1995
- [10] K. P. Wong, "Evolutionary Programming based Optimal Power Flow Algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 4, Nov. pp1245-1250, 1999

- [11] K.P. Wong, and Y.W. Wong, "Genetic and genetic/simulated-annealing approaches to economic dispatch", IEE Proc. Gen. Trans. & Distrib, Vol. 141, No.5, 1994, pp.507-513
- [12] G. C. Ejebe and B. F. Wollenberg, "Automatic Contingency Selection", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 1, pp97-103, 1979
- [13] 김규호, 유석구, "상정사고를 고려한 전압·무효전력 예방제어", 대한전기학회 논문지, 제 44권 9호, pp1141-1149, 1995
- [14] C.T. Lawrence & A.L. Tits, "Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming," *Optimization Methods and Software* 6(1996), 265-282

## 저 자 소 개



김 규 호 (金圭浩)

1965년 3월 8일생. 1988년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 안산공과대학 전기과 조교수  
E-mail : kyuhu@ansantc.ac.kr



이 재 규 (李在奎)

1962년 8월 10일생. 1986년 영남대 전기공학과 졸업. 1990년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 박사과정 수료. 1989년~1999년 LG산전 연구소 선임연구원. 현재 대덕대학 전임강사  
E-mail : leejpg@mail.ddc.ac.kr



이 상 봉 (李相奉)

1968년 2월 22일생. 1994년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정  
E-mail : sbrhee@mail.hanyang.ac.kr



유 석 구 (劉錫九)

1938년 10월 31일생. 1961년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 1996년 당학회 회장  
E-mail : skyou@mail.hanyang.ac.kr