

# 최적전력조류 해석을 위한 윈도우프로그램 팩키지 개발

論 文  
50A - 12 - 6

## Windows Program Package Development for Optimal Power Flow Analysis

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 windows program package for solving security constrained OPF in interconnected power systems, which is based on the combined application of evolutionary programming(EP) and sequential quadratic programming(SQP). The objective functions are the minimization of generation fuel costs and system power losses. The control variables are the active power of the generating units, the voltage magnitude of the generator, transformer tap settings and SVC setting. The state variables are the bus voltage magnitude, the reactive power of the generating unit, line flows and the tie line flow. In OPF considering security, the outages are selected by contingency ranking method. 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). The OPF package proposed is applied to IEEE 14 buses and 10 machines 39 buses model system.

**Key Words** : Optimal Power Flow, Security Constraint, Evolutionary Programming, Sequential Quadratic Programming, Hybrid Algorithms

### 1. 서 론

최적전력조류(Optimal Power Flow: OPF) 해석이란 전력계통에서 요구되는 부하와 시스템 파라미터로 구성된 제약 함수를 만족하도록 목적함수를 최적화하여 전력계통의 제어 변수를 제어하는 비선형 문제이다. 이러한 OPF문제 해결을 위해서 함수의 기울기를 정보로 사용하는 Gradient방법[1]과 순차적2차계획법(SQP)[2], Newton방법과 P-Q분할법[3]등 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.

확률적 및 진화론적 방법에 기초한 진화계획법(EP)은 교차, 선택 및 돌연변이의 연산자를 사용해 전역적최적해를 탐색하는 알고리즘이다[4,5]. 그러나 EP 방법은 전역적 최적해에 대한 탐색능력을 갖고 있으나, 최적해 탐색 후반부에 탐색 속도가 늦다는 단점을 갖고 있다.

본 연구에서는 다수개의 연계선로(Tie-Line)로 연결된 연계계통에서 Tie-Line의 용량한계를 만족시키면서 발전기 및 선로 등의 사고에 대한 안전도제약을 고려한 최적전력조류(Interconnected Optimal Power Flow: IOPF) 해석 방안을 제안하였다.

해석기법으로는 진화계획법(EP)의 전역적 탐색 능력과 순차적 2차계획법(SQP)을 결합한 하이브리드 알고리즘을 응용하였다[6]. 두 알고리즘의 장점만을 결합한 하이브리드 알고리즘은 탐색초기에 EP를 사용하여 전역적 최적해 근처까지 빠르게 탐색한 후, SQP와 같은 지역적 탐색법을 사용해서 정확한 값을 얻을 수 있다.

안전도를 고려한 최적전력조류 해석을 위하여 상정사고 screening model, 즉 상정사고 순위 결정 방법(Contingency Ranking Method)을 이용하여, 각 사고 중 가장 위험한 경우에 대하여 예를 들었다[7,8]. OPF해석 후에 구해진 새로운 운전점은 계통내의 사고 후에도 전압크기, 무효전력량과 전력조류 한계값을 만족하게 된다.

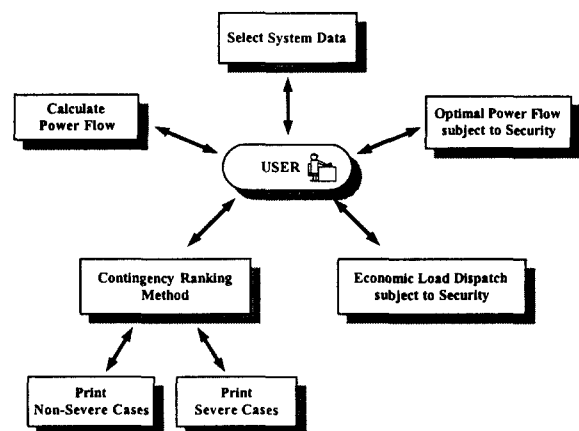


그림 1.1 OPf\_Win의 개략적인 구성  
Fig. 1.1 Simple Architecture for OPf\_Win

\* 正 會 員 : 安山工科大 助教授 · 工博  
\*\* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程  
\*\*\* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程 修了  
§ 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 教授 · 工博  
接受日子 : 2001年 10月 16日  
最終完了 : 2001年 11月 20日

또한, 전력계통을 연구하는 학생들이 전력계통의 이해 및 해석을 쉽게 할 수 있도록 최적전력조류 해석을 위한 윈도우 프로그램 패키지 OPF\_Win을 개발하였으며 개략적인 구성은 그림 1.1에 나타내었다[9]. OPF\_Win은 OPF의 통합적 분석을 위한 소프트웨어로서 사용자의 목적에 따라 전력계통을 해석할 수 있는 패키지이다. 본 프로그램은 사용자의 요구에 따른 대화식 메뉴를 지원하고 있으며, 전력계통에 기초적인 지식을 갖고 있는 사용자라면 쉽게 사용할 수 있다.

최적전력조류 패키지 OPF\_Win을 IEEE 14 모선 및 10기 39모선계통에 적용하였다.

## 2. 문제의 정식화

안전도제약을 고려한 OPF의 목적은 유효전력 손실, 무효전력량, 발전비용 등을 최소화하거나 전압레벨을 최대화하는 것이며, 또한 전압, 무효전력 및 전력조류 한계를 고려한 계통사고에서의 최적 운전 가능점을 결정하는 것이다[1,6].

### 2.1 목적함수

안전도제약을 고려한 OPF의 목적함수로서 발전 연료비용과 계통유효전력 손실을 선택하여 최소화할 수 있다.

#### 가. 연료비 함수

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

여기서,  $i$ 와  $A$ 는 각각 발전기모선 및 연계계통의 인덱스,  $NA$ 와  $NG$ 는 각각 연계계통의 수 및 발전기모선의 수이고,  $P_{Gi}$ 는 발전기의 유효전력출력이고,  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ 는 각 발전기의 연료계수이다.

#### 나. 계통유효전력 손실

$$\text{Min Ploss} = \sum_{A=1}^{NA} \sum_{i=1}^{NL} G_{ij}(V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}) \quad (2.2)$$

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

### 2.2 제약조건

안전도제약은 기준상태의 안전도제약(Intact System Security Constraints)과 단일사고시 안전도제약(Single Outage Security Constraints)을 모두 만족하여야 한다. 안전도제약을 고려한 OPF문제의 변수는 제어변수와 상태변수의 두 종류의 변수로 나눌 수 있다.

#### 가. 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. 식 (2.3)과 (2.4)는 각각 사고전후의 제어변수에 대한 제약조건이다.

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

$$\begin{aligned} P_{Gi}^{A,k,\min} &\leq P_{Gi}^{A,k} \leq P_{Gi}^{A,k,\max} \\ V_{Gi}^{A,k,\min} &\leq V_{Gi}^{A,k} \leq V_{Gi}^{A,k,\max} \\ T_i^{A,k,\min} &\leq T_i^{A,k} \leq T_i^{A,k,\max} \\ Q_{cr}^{A,k,\min} &\leq Q_{cr}^{A,k} \leq Q_{cr}^{A,k,\max} \end{aligned} \quad (2.4)$$

여기서,  $P_{Gi}$ 는 목적함수의 연료비함수에서 설명한 각 발전기의 유효전력출력이고,  $V_{Gi}$ 는 각 발전기모선의 전압크기이고,  $T_i$ 는 변압기가 설치된 모선의 탭 비이고,  $Q_{cr}$ 는 모선에 설치되어 있는 병렬콘덴서 및 리액터이다. 또한,  $\cdot^{\max}$  와  $\cdot^{\min}$ 는 각각의 상하한치이다.  $k$ 는 발전기사고 또는 선로사고와 같은 단일사고에 대한 인덱스이다.

#### 나. 상태변수

상태변수는 각 모선에서의 전압크기 및 발전기 모선의 무효전력출력이 된다. 제약조건은 OPF를 통해 얻은 계통의 최적 운전점에 있어서 식 (2.5)의 기준상태와 식 (2.6)의 사고 후에도 모두 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} V_j^{A,\min} &\leq V_j^A \leq V_j^{A,\max} \\ Q_{Gi}^{A,\min} &\leq Q_{Gi}^A \leq Q_{Gi}^{A,\max} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} V_j^{A,k,\min} &\leq V_j^{A,k} \leq V_j^{A,k,\max} \\ Q_{Gi}^{A,k,\min} &\leq Q_{Gi}^{A,k} \leq Q_{Gi}^{A,k,\max} \end{aligned} \quad (2.6)$$

여기서,  $k$ 는 발전기사고 또는 선로사고와 같은 단일사고에 대한 인덱스이다.  $V_j$ 는 각 부하모선의 전압크기이고,  $Q_{Gi}$ 는 발전기 모선의 무효전력출력이다.

#### 다. 등식 제약조건

$$\begin{aligned} \sum_{A=1}^{NA} \left\{ \sum_{i=1}^{NG} P_{Gi}^A - P_D^A - P_{Loss}^A \right\} &= 0 \\ \sum_{A=1}^{NA} \left\{ \sum_{i=1}^{NG} P_{Gi}^{A,k} - P_D^{A,k} - P_{Loss}^{A,k} \right\} &= 0 \\ h_{p0}^A(\mathbf{u}^A, \mathbf{x}^A) &= 0 \\ h_{pk}^A(\mathbf{u}^{A,k}, \mathbf{x}^{A,k}) &= 0 \\ h_{q0}^A(\mathbf{u}^A, \mathbf{x}^A) &= 0 \\ h_{qk}^A(\mathbf{u}^{A,k}, \mathbf{x}^{A,k}) &= 0 \\ \sum_{T=1}^{TL} p^{T,0} &= 0, \quad \sum_{T=1}^{TL} p^{T,k} = 0, \quad \sum_{T=1}^{TL} q^{T,0} = 0, \quad \sum_{T=1}^{TL} q^{T,k} = 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

여기서,  $k$ 는 발전기사고 또는 선로사고와 같은 단일사고에 대한 인덱스이다. 식 (2.7)의 첫 번째 및 두 번째 식은 기준상태 및 사고시의 각각의 연계계통 수급평형조건이며,  $NG$ 는 각각의 계통 전체 발전기 수이고,  $P_D$ 는 계통 전체 부하이며,  $P_{Loss}$ 는 각 계통의 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 무효전력

출력)는 상태변수이다.  $h_{j0}$ 와  $h_{jk}$ 는 각각 기준상태 및  $k$ 번째 상정사고 후에 계통전체에 대한 유효전력 밸런스이며,  $h_{j0}$ 와  $h_{jk}$ 는 각각 기준상태 및  $k$ 번째 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 일반적인 최적화문제로의 변형

2.1절과 2.2절의 연계계통에서 안전도제약을 고려한 OPF 해석을 위하여 다중목적함수로 구성할 경우 식 (2.8)과 같이 가중합(Weight Sum)으로 나타낸 일반적인 최적화문제의 표현이다[6].

$$\begin{aligned} \text{Min } Obj &= W1*(FuelCost^0 + FuelCost^k) \\ &+ W2*(Ploss^0 + Ploss^k) \\ \text{s.t } g(\mathbf{u}, \mathbf{x}) &\leq 0 \\ h(\mathbf{u}, \mathbf{x}) &= 0 \end{aligned} \tag{3.8}$$

$W1$ 과  $W2$ 는 각 목적함수의 가중치이고,  $g(\mathbf{u}, \mathbf{x})$ 와  $h(\mathbf{u}, \mathbf{x})$ 는 부등식 및 등식제약조건이다. 그리고 첨자 0와  $k$ 는 각각 base case와 단일사고에 대한 인덱스이다.  $W1$ 과  $W2$ 는 일반적으로 다중목적함수 최적화에서 단일목적함수 최적화 문제로 변형할 때 각 목적함수의 비중에 따라 상대적으로 크기를 임의로 선정한다.

3. 탐색 알고리즘

3.1 진화계획법

진화계획법은 목적함수 값만을 정보로 사용함으로 함수의 연속성 및 미분가능에 대한 조건이 필요 없다는 전제조건에 의하여 일반화시킨 식 (2.6)의 목적함수를 식 (3.1)과 같이 적합도(Fitness) 함수로 사용하여 최소화 문제로 다룬다[4,5].

$$\begin{aligned} \text{Min } Obj &= W1*(FuelCost^0 + FuelCost^k) \\ &+ W2*(Ploss^0 + Ploss^k) \end{aligned} \tag{3.1}$$

3.2 순차적2차계획법

순차적2차계획법(SQP)은 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[10].

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 search을 사용하였다. 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  $x_0$ , 탐색방향  $d_0$ , step size  $t_0$ . 변수  $x_0$ 가 실행불가능 영역의 초기값일 경우 실행가능영역의 초기해를 구성한다.

절차 2 : 최적해 탐색(search)

- i) 변수 및 헤시안 행렬로 구성된 QP 문제의 해를 계산함으로 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

$$\begin{aligned} \text{min } || \sum_{j=1}^{n_f} \zeta_{k,j} \nabla f_j(x_{k+1}) + \xi_k + \sum_{j=1}^l \lambda_{k,j} \nabla g_j(x_{k+1}) + \\ \sum_{j=0}^k \mu_{k,j} \nabla h_j(x_{k+1}) + \sum_{j=0}^k \mu_j \nabla h_j(x_{k+1}) ||^2 \end{aligned} \tag{3.2}$$

여기서  $\zeta_{k,j}$ ,  $\xi_k$ ,  $\mu_{k,j}$ ,  $\lambda_{k,j}$ 는 QP 문제 및 제약식과 관련된 K-T승수이다.

3.3 하이브리드 알고리즘

본 연구에서는 연계계통에서 OPF 문제를 해석하기 위하여 하이브리드 알고리즘을 제안하였으며, 그림 3.1에 순서도를 나타내었다.

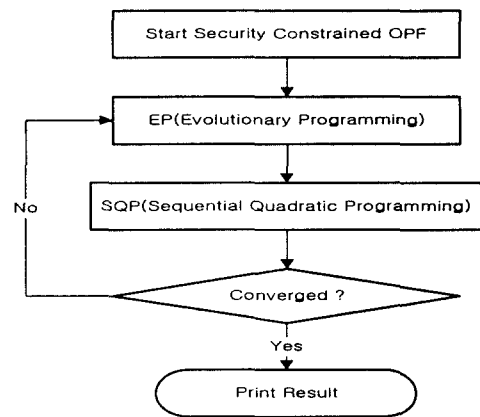


그림 3.1 하이브리드 알고리즘(EP+SQP) 순서도  
Fig. 3.1 Flowchart for Hybrid Algorithms(EP+SQP)

탐색초기에 진화계획법을 사용하여 최적해의 근치까지 빠르게 탐색한 후, 목적함수의 적합도가 거의 변화하지 않으면 지역적 탐색법인 SQP에 초기해로 사용하여 더욱 정확한 값을 얻을 수 있다[6].

### 3.4 IOPF 패키지 개발

본 연구에서는 연계계통에서 안전도제약을 고려한 최적전력조류를 해석하기 위한 윈도우 프로그램 패키지 OPF\_Win을 개발하였다[9].

OPF\_Win은 전력계통을 연구하는 학생들이 전력계통의 이해 및 해석을 쉽게 할 수 있는 OPF의 통합적 분석을 위한 소프트웨어로써 사용자의 목적에 따라 전력계통을 해석할 수 있는 패키지이다. 그림 3.2는 OPF\_Win에서 하이브리드 알고리즘(EP+ES)를 이용하여 최적전력조류 해석을 위한 순서도를 나타낸 것이다.

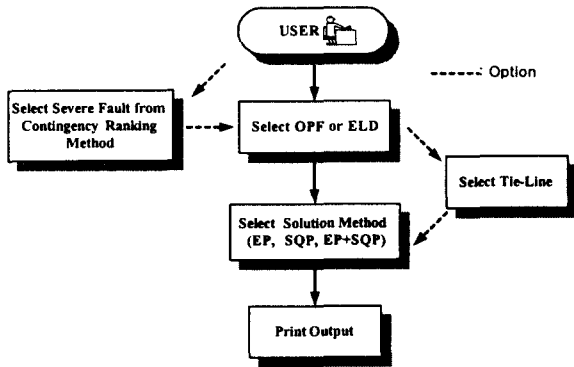


그림 3.2 OPF\_Win에서의 하이브리드 알고리즘(EP+SQP)  
Fig. 3.2 Hybrid Algorithms(EP+SQP) of OPF\_Win

#### 3.4.1 OPF\_Win의 개요

OPF\_Win은 OPF의 통합적 분석을 위한 소프트웨어로써 사용자의 목적에 따라 전력계통을 해석할 수 있는 패키지이다. 본 프로그램은 사용자의 요구에 따른 대화식 메뉴를 지원하고 있다. 기능은 전력계통에서 기초적이면서도 자주 응용되는 조류계산(Fast Decoupled Load Flow)을 단독으로 수행할 수 있다. 또한, 최적경제배분(ELD) 및 OPF 해석 등 각 부분을 단독적으로 처리할 수 있는 능력을 갖고 있다. 각각의 경우 연계계통에 대하여도 수행할 수 있다.

OPF\_Win의 모든 기능은 근본적으로 file 입출력으로 구성되어 있으며 부분적으로 키보드 직접입력 또는 마우스를 사용하여 메뉴로부터 항목을 선택하여 실행하는 윈도우환경의 프로그램이다.

#### 3.4.2 OPF\_Win 패키지의 구성

OPF\_Win 프로그램은 네가지의 해석틀로 구성되어 있으며 그림 3.3과 그림 3.4에 나타내었다.

##### (1) Power Flow

Fast Decoupled Load Flow를 수행한다.

##### (2) Contingency Ranking Method

발전기사고 및 선로사고 등에 있어서 선로조류 제한치 위반 및 모선 전압크기 제한치 위반에 대한 상정사고의 위험순위를 결정하는 인덱스를 계산할 수 있다.

##### (3) E.L.D(Economic Load Dispatch)

경제급전을 해석할 수 있으며 계통의 손실을 포함하여 해석 가능하다.

##### (4) OPF(Optimal Power Flow)

전력계통의 최적전력조류계산을 해석하며 여러 가지 제약을 포함하여 전력시스템을 분석한다. 특히 연계계통에 대한 해석이 가능하다.

#### 3.4.3 OPF\_Win의 해석알고리즘

OPF\_Win의 해석알고리즘은 EP, SQP 및 하이브리드(EP+SQP)로 구성되어 있으며 그림 3.5와 같이 사용자선택에 의해서 각각 독립적으로 개별적인 문제를 해석할 수 있다.

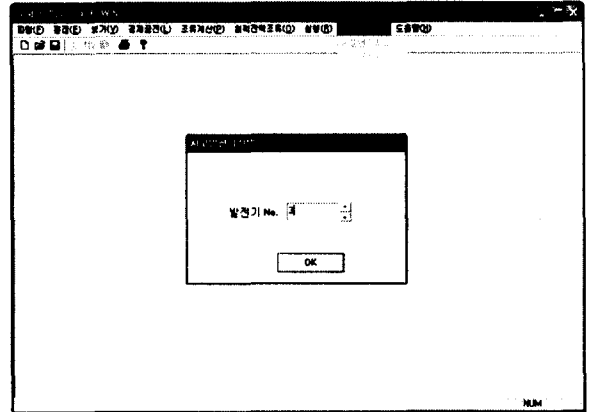


그림 3.3 발전기사고 선택  
Fig. 3.3 Selection of Generator Outage

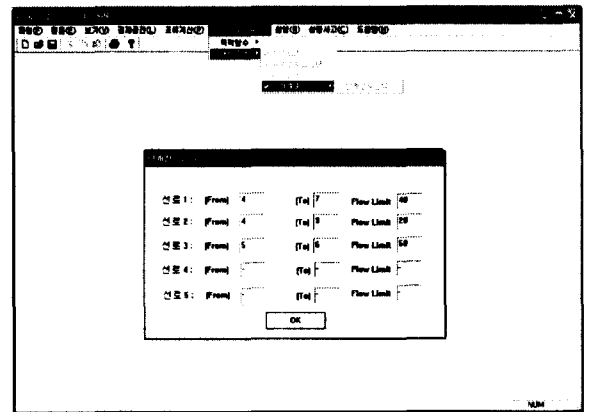


그림 3.4 연계선로 및 선로조류제한 입력  
Fig. 3.4 Input of Tie-Line and Line Flow Limit

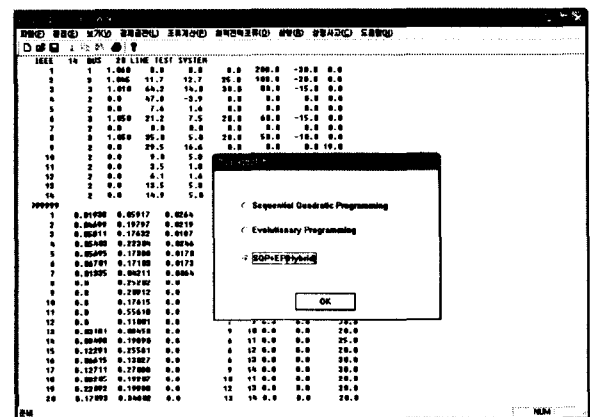


그림 3.5 해석기법 선택  
Fig. 3.5 Selection of Solution method

4. 사례 연구

Case 1. IEEE 14 모션

연계계통에 있어서 안전도 제약을 고려한 OPF 문제에 진화연산의 EP와 SQP를 결합한 하이브리드 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 그림 4.1과 같이 IEEE 14모션 모션계통에 적용하였다. 모션 4 - 7, 모션 4 - 9 및 모션 5 - 6을 연결하고 있는 선로를 Tie-Line으로 하였다.

본 연구에서 응용한 상정사고 위험순위 결정 방법은 선로 조류제한 위반에 대해서는 문헌[7]과 모션 전압크기 위반에 대해서는 문헌[8]의 방법을 이용하였다. 그 결과 발전기 사고중 계통에 미치는 영향이 가장 큰 Area 2의 8번 발전기를 고려하였다. 선로사고의 경우 계통에 미치는 영향이 가장 큰 Area 2의 선로 13(모션 9 - 10)을 고려하였다. 표 4.1과 4.2는 14모션 계통의 부하와 선로조류의 상한치를 나타내었다. 표 4.3은 발전기 연료비용계수와 유효 및 무효전력출력의 상하한치를 나타내었다. 표 4.4는 제안한 하이브리드 알고리즘을 이용하여 연계계통에서의 기준상태 및 안전도 제약을 고려한 OPF의 결과를 나타내었다.

표 4.4에서 알 수 있듯이 계통은 독립적으로 운전되며, 각 계통에서 부하는 각각 131.3MW와 132.7MW 이다. OPF하기 전 상태의 각 발전기 유효전력출력과 발전비용은 Pre-OPF 열에 나타내었다. Area 1과 Area 2의 총 유효전력출력은 각각 133.2MW와 139.5MW이고, 지역별 발전비용은 각각 316.49\$/h과 577.43\$/h이고, 전체 발전비용은 893.92\$/h이다.

여러 개의 Tie-Line에 의하여 연결된 Area 1과 Area 2에 대하여 안전도제약을 고려한 OPF후의 발전기 유효전력출력과 발전비용을 Post-OPF 열에 나타내었다. Area 1과 Area 2의 유효전력출력은 각각 209.5MW와 61.3MW이고, 지역별 발전비용은 각각 519.51\$/h과 221.09\$/h이고, 전체 발전비용은 740.62\$/h이다. 표 5.4로부터 Area 1은 단독으로 운전하는 경우 보다 더 많은 전력을 발전하고 있으며, Area 2는 단독운전 보다 더 적은 전력을 발전하는 것을 알 수 있다. Area 1의 경우 발전비용이 203.02\$/h 만큼 증가되었고, Area 2는 356.34\$/h가 감소되었으며 전체적으로는 153.32\$/h가 감소되었음을 알 수 있다. Tie-Line의 손실을 무시하면 각 Area에서 발전전력의 변화는 Tie-Line에 흐르는 전체전력에 해당되며 Interchange Power이다. 계통손실을 제외한 Interchange Power는 72.7MW(from Area 1 to Area 2)이며, 전력계통을 연계하여 운전할 경우 상당한 경제적 이득이 있다는 것을 알 수 있다.

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.

Case 2. 10기 39 모션

연계계통에 있어서 안전도 제약을 고려한 OPF 문제에 진화연산의 EP와 SQP를 결합한 하이브리드 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 10기 39모션 46선로 모델계통에 적용하였다. 모션 4 - 11, 모션 6 - 11 및 모션 16 - 17을 연결하고 있는 선로를 Tie-Line으로 하였다.

표 4.5는 제안한 하이브리드 알고리즘을 이용하여 연계계

통에서의 기준상태 및 안전도 제약을 고려한 OPF의 결과를 나타내었다.

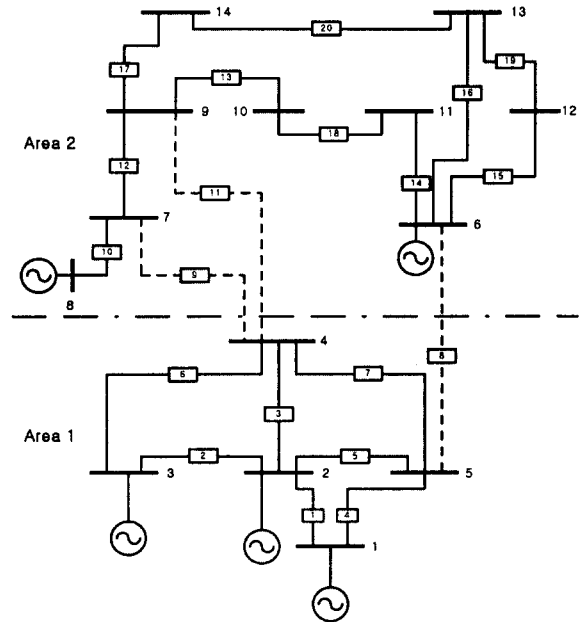


그림 4.1 IEEE 14 모션 계통도(Area 1과 Area 2)  
Fig. 4.1 Diagram of IEEE 14 buses(Area 1 and Area 2)

표 4.5로부터 Area 1은 단독으로 운전하는 경우 보다 더 많은 전력을 발전하고 있으며, Area 2는 단독운전 보다 더 적은 전력을 발전하는 것을 알 수 있다.

표 4.1 부하데이터  
Table 4.1 Load Data

Bus No.	Load	
	P(MW)	Q(MVAR)
1	0.0	0.0
2	11.7	12.7
3	64.2	14.0
4	47.8	-3.9
5	7.6	1.6
6	21.2	7.5
7	0.0	0.0
8	35.0	5.0
9	29.5	16.6
10	9.0	5.8
11	3.5	1.8
12	6.1	1.6
13	13.5	5.8
14	14.9	5.0

표 4.2 선로조류 제한치  
Table 4.2 Line Flow Limits

Line	From-To	Line Limit [MW]
1	1 - 2	200.0
2	2 - 3	40.0
3	2 - 4	70.0
4	1 - 5	60.0
5	2 - 5	40.0
6	3 - 4	30.0
7	4 - 5	80.0
8	5 - 6	50.0
9	4 - 7	40.0
10	7 - 8	60.0
11	4 - 9	20.0
12	7 - 9	50.0
13	9 - 10	20.0
14	6 - 11	25.0
15	6 - 12	20.0
16	6 - 13	30.0
17	9 - 14	30.0
18	10 - 11	20.0
19	12 - 13	20.0
20	13 - 14	20.0

Area 1의 경우 발전비용이 5,780.2\$/h 만큼 증가되었고, Area 2는 25,419.6\$/h가 감소되었으며 전체적으로는 19,639.4\$/h가 감소되었음을 알 수 있다. Tie-Line의 손실을 무시하면 각 Area에서 발전전력의 변화는 Tie-Line에 흐르는 전체전력에 해당되며 Interchange Power이다. 계통손실을 제외한 Interchange Power는 669.0MW(from Area 1 to

표 4.3 발전비용계수와 상하한치

Table 4.3 Cost Coefficients and Generation Limits

Unit No.	Cost Coefficient			Unit Limit			
	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$P_G^{\min}$	$P_G^{\max}$	$Q_G^{\min}$	$Q_G^{\max}$
				(MW)		(MVAR)	
1	0.0	2.00	0.00315	10	200	-30	200
2	0.0	1.75	0.01750	20	50	-20	100
3	0.0	1.00	0.06250	15	80	-15	80
6	0.0	3.25	0.00834	10	120	-15	60
8	0.0	3.00	0.02500	10	45	-10	50

표 4.5 IOPF 후의 결과(발전기 사고: Area 2의 발전기모선 38)

(): 발전기 사고후 변화된 전력

Table 4.5 The Results of IOPF(generator outage: Gen no. 38 of Area 2)

(): MW of Post-contingency

Regional Load[MW]	Unit	Unit Output[MW]		Regional Generation[MW] /Cost [\$ /h]		Interchange Power[MW]	Cost[\$ /h]	Tie line flow [MW]
		Pre-OPF	Post-OPF	Pre-OPF	Post-OPF			
Area 1 2,414.6	32	650.0	850.0	2,440.34 /62,499.49	2,745.2(3,607.4) /68,279.7	330.6(1,192.8) out	5,780.2 Increased costs	14-4: 177.3 (287.3) max. 400.0 11-6: 310.9 (361.4) max. 700.0 16-17: 180.8 (519.3) max. 600.0
	33	632.0	703.1					
	34	508.0	677.5					
	35	90.3	214.6(1,076.8)					
	36	560.0	300.0					
Area 2 3,982.5	30	250.0	850.0	4,018.14 /108,383.2	3,700.0(2,850.0) /82,963.6	282.5(1,132.5) in	25,419.6 Saving costs	
	31	504.0	850.0					
	37	540.0	300.0					
	38	830.0	850.0(0.0)					
	39	1,894.1	850.0					
Total Load 6,397.1		6,458.48	6,445.2(6,457.4)	6,458.48 /1,170,882.7	6,445.2(6,457.4) /151,243.2	System loss: 48.1(60.3)	Combined, Net Savings 19,639.4	
Only EP							Combined, Net Savings 19,637.5	
Only SQP							Combined, Net Savings 19,633.8	

표 4.4 IOPF 후의 결과(발전기 사고: Area 2의 발전기모선 8)

(): 발전기 사고후 변화된 전력

Table 4.4 The Results of IOPF(Generator Outage: Gen no. 8 of Area 2)

(): MW of Post-contingency

Regional Load[MW]	Unit	Unit Output[MW]		Regional Generation[MW] /Cost [\$ /h]		Interchange Power[MW]	Cost[\$ /h]	Tie line flow [MW]
		Pre-OPF	Post-OPF	Pre-OPF	Post-OPF			
Area 1 131.3	1	78.2	147.0(157.8)	133.2 /316.49	209.5(220.3) /519.51	78.2(89.0) out	203.02 Increased costs	4-7: 34.0 (40.0) max. 40 4-9: 18.1 (20.0) max. 20 5-6: 20.6 (22.7) max. 50.0
	2	25.0	35.0					
	3	30.0	27.5					
Area 2 132.7	6	119.5	51.3	139.5 /577.43	61.3(51.3) /221.09	71.4(81.4) in	356.34 Saving costs	
	8	20.0	10.0(0.0)					
Total Load 264.0		272.7	270.8(271.6)	272.7 /893.92	270.8(271.6) /740.62	System loss: 6.8(7.6)	Combined, Net Savings 153.32	
Only EP							Combined, Net Savings 151.23	
Only SQP							Combined, Net Savings 150.69	

Area 2)이며, 전력계통을 연계하여 운전할 경우 상당한 경제적 이득이 있다는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 다수개의 연계선로(Tie-Line)로 연결된 연계계통에서 Tie-Line의 용량한계를 만족시키면서 발전기 및 선로 등의 사고에 대한 안전도제약을 고려한 연계계통의 최적전력조류(Interconnected Optimal Power Flow: IOPF) 문제를 해석하기 위하여 다양한 최적화 방법을 이용한 윈도우 프로그램 패키지를 개발하였다.

계통을 단독으로 운전하는 것 보다 연계하여 운전할 경우 계통내의 사고 등에 효과적으로 대처할 수 있으며 상당한 경제적 이득이 있다는 것을 확인하였다. 또한, 알고리즘 사이의 비교에 있어서 EP 단독, 또는 SQP 단독으로 최적화한 경우보다 하이브리드 알고리즘이 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 제시한 하이브리드 알고리즘은 여러 가지 목적함수를 갖는 최적화문제에 기존의 방법보다 정확하고 유용한 정보를 제공할 수 있다.

또한, 본 연구에서 개발한 최적전력조류 패키지인 OPF\_Win은 OPF의 통합적 분석을 위한 소프트웨어로써 사용자의 목적에 따라 전력계통을 해석할 수 있는 패키지이다. 본 프로그램은 사용자의 요구에 따른 대화식 메뉴를 지원하고 있으며, 전력계통에 기초적인 지식을 갖고 있는 사용자라면 쉽게 사용할 수 있다. 기능은 전력계통에서 기초적이면서도 자주 응용되는 조류계산을 단독으로 수행할 수 있으며, 최적경제배분(ELD) 및 OPF 해석 등을 단독적으로 처리할 수 있는 능력을 갖고 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2000년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력 공학공동연구소 주관으로 수행되었습니다. (과제번호 : 00-032)

### 참 고 문 헌

- [1] 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, pp.2864-2880, 1984
- [2] J. S. Lipowski, C. Charalambous, "Solution of Optimal Load Flow Problem by Modified Recurcive Quadratic Programming Method", Proceeding of IEE, Vol. 5, No. 3, pp.691-711, 1990
- [3] R.R. shoult, D.T. Sun, "Optimal Power Flow Based upon P-Q Decomposition," IEEE Trans. on PAS, Vol. 101, No. 2, pp.397-405, 1982
- [4] J. R. McDonnell, D. B. Fogel, "Evolutionary programming IV", MIT Press, 1995
- [5] K. P. Wong, "Evolutionary Programming based Optimal Power Flow Algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 4, Nov. pp1245-1250, 1999
- [6] 김규호, 이상봉, 이재규, 유석구, "하이브리드 알고리즘을 응용하여 안전도제약을 만족시키는 최적전력조류", 대한전기학회 논문지, 제 49권 6호, pp.306-311, 2000
- [7] G. C. Ejebe and B. F. Wollenberg, "Automatic Contingency Selection", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 1, pp.97-103, 1979
- [8] F. Albuyeh, A. Bose and B. Heath, "Reactive Power Consideration in Automatic Contingency Selection", IEEE Trans. PAS, Vol. 101, pp.107-112, 1982
- [9] Zaratian, "Visual C++ 6.0 Programmer's Guide", Microsoft Press, 2000
- [10] C.T. Lawrence & A.L. Tits, "Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming," Optimization Methods and Software 6, pp.265-282, 1996

## 저 자 소 개



김규호 (金圭浩)

1966년 3월 8일 생. 1988년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 안산공과대 전기과 조교수  
E-mail : kyuhu@ansantc.ac.kr



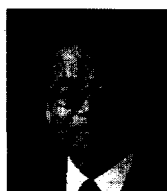
이재규 (李在奎)

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



이상봉 (李相奉)

1968년 2월 22일 생. 1994년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정  
E-mail : rrsd@ihanyang.ac.kr



유석구 (劉錫九)

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