

연계계통에서 안전도제약을 고려한 최적전력조류

김규호\* 이재규\*\* 이상봉\*\*\* 유석구\*\*\*  
 \*안산공과대학 \*\*대덕대학 \*\*\*한양대학교

Optimal Power Flow considering Security in Interconnected Power Systems

Kyu-Ho Kim\* Jae-Gyu Lee\*\* Sang-Bong Rhee\*\*\* Seok-Ku You\*\*\*  
 \*Ansan College of Technology \*\*DaeDuk College \*\*\*Hanyang Univ.

**Abstract** - This paper presents a hybrid algorithm 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. In OPF considering security, the outages are selected by contingency ranking method. 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. The method proposed is applied to the modified IEEE 14buses model system.

후에도 전압크기, 무효전력량과 전력조류 한계값을 만족하게 된다.

안전도를 고려한 OPF 문제에 적용한 하이브리드 알고리즘의 효율성을 나타내기 위해 IEEE 14 모선계통에 적용하였다.

2. 문제의 정식화

2.1 연계계통의 Power Interchange

최근 전력계통은 경제적 운영을 목적으로 계통간에 연계를 한다.

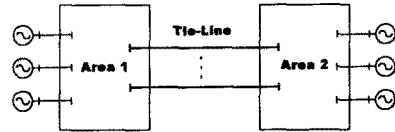


그림 2.1 연계계통

2.2 다중목적함수

안전도제약을 고려한 OPF의 다중목적함수로서, 발전 연료비용과 계통유효전력 손실을 최소화하였다.

- 연료비 함수

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

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

- 계통유효전력 손실

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

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

2.3 제약조건

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

- 제어변수

최적화 방법이나 알고리즘에 의해 정해지거나 제어되

1. 서 론

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[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]. 그러나 EP 방법은 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 EP를 사용하여 전역적 최적해 근처까지 빠르게 탐색한 후, SQP와 같은 지역적 탐색법을 사용해서 정확한 값을 얻을 수 있다. 하이브리드 알고리즘은 각 알고리즘을 단독으로 사용하는 경우보다 최적해 탐색능력이 우수하고 계산시간을 단축시킬 수 있는 능력을 갖는다.

또한, 연계계통에서 OPF 문제를 해석하는데 있어 안전도를 고려하였다. 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[5]. OPF해석 후에 구해진 새로운 운전점은 계통내의 사고

는 변수를 나타내며 각 발전기의 발전기 유효전력 출력과 각 발전기의 전압크기, 변압기 탭비, 병렬콘덴서 및 리액터 등과 같은 무효전력원이 이에 속한다.

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

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

#### - 상태변수

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

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

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

#### - 등식 제약조건

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{NA} \left\{ \sum_{j=1}^{NG} P_{Gi}^k - P_D^k - P_{Loss}^k \right\} &= 0 \\ h_{D0}^k(\mathbf{u}^k, \mathbf{x}^k) &= 0 \\ h_{Dj}^k(\mathbf{u}^k, \mathbf{x}^k) &= 0 \\ h_{G0}^k(\mathbf{u}^k, \mathbf{x}^k) &= 0 \\ h_{Gj}^k(\mathbf{u}^k, \mathbf{x}^k) &= 0 \\ \sum_{i=1}^{NA} p_i^T &= 0 \\ \sum_{i=1}^{NA} q_i^T &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

식 (2.5)의 첫 번째 식은 계통의 수급평형조건이며, NG는 계통 전체 발전기 수이고,  $P_D$ 는 계통 전체 부하이며,  $P_{Loss}$ 는 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 무효전력출력)는 상태변수이다.  $h_{D0}$ 와  $h_{Dj}$ 는 각각 기준상태 및 j번째 상정사고 후에 계통전체에 대한 유효전력 밸런스이며,  $h_{G0}$ 와  $h_{Gj}$ 는 각각 기준상태 및 j번째 상정사고 후에 계통전체에 대한 무효전력 밸런스, 즉 조류계산 만족에 대한 등식제약조건이다.

#### 2.4 연계계통에서 안전도제약을 고려한 OPF

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

$$\text{Min Obj} = W1 * \text{FuelCost} + W2 * P_{loss} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t} \quad &g^k(\mathbf{u}^k, \mathbf{x}^k) \leq 0 \\ &h^k(\mathbf{u}^k, \mathbf{x}^k) = 0 \end{aligned}$$

$W1$ 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 상대적

으로 크기를 임의로 선정한다.

### 3. 탐색알고리즘

본 연구에서는 연계계통에서 OPF 문제를 해석하기 위하여 하이브리드 알고리즘을 제안하였으며, 그림 3.1에 개략적인 알고리즘을 나타내었다. 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[6].

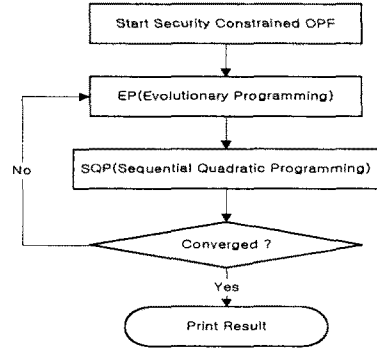


그림 3.1 하이브리드 알고리즘의 순서도

#### 3.1 진화계획법

진화계획법은 목적함수 값을 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[4].

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

#### 3.2 Sequential Quadratic Programming

SQP는 매 번의 반복 계산 시 모든 제약조건을 만족하는 실현가능 해를 순차적 방법으로 탐색하는 비선형 문제의 해법이다. 기본적인 알고리즘 구성은 라그랑주함수의 헤시안 행렬을 사용하며 QP와 line search 등의 여러가지 방법이 조합된 탐색기법이다[7].

### 4. 사례연구

연계계통에서 있어서 안전도 제약을 고려한 OPF 문제에 진화연산의 EP와 SQP를 결합한 하이브리드 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 IEEE 14모선 모델계통에 적용하였다. 모선4-모선7, 모선4-모선9 및 모선5-모선6을 연결하고 있는 선로를 Tie-Line으로 하였다.

본 연구에서 응용한 상정사고 위험순위 결정 방법으로는 문헌[5]의 방법을 이용하여 8번 발전기를 고려하였다. 표 4.1과 4.2는 14모선 계통의 부하와 선로조류의 상한치를 나타내었다. 표 4.3은 발전기 연료비용계수와 유효 및 무효전력출력의 상한치를 나타내었다. 표 4.4는 제안한 하이브리드 알고리즘을 이용하여 연계계통에서의 기준상태 및 안전도 제약을 고려한 OPF의 결과를 나타내었다.

계통은 독립적으로 운전되며, 각 계통에서 부하는 각각 131.3MW와 132.7MW이다. 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 225.4MW와 45.9MW이고, 지역별 발전비용은 각각 571.92\$/h과 159.93\$/h이고, 전체 발전비용은 731.85\$/h이다. 표 4.4로부터 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 255.43\$/h 만큼 증가되었고, Area 2는 417.5\$/h가 감소되었으며 전체적으로는 162.07\$/h가 감소되었음을 알 수 있다. 손실을 무시하면 각 Area에서 발전전력의 변화는 Tie-Line에 흐르는 전체전력에 해당되며 Interchange Power 라고 한다. 계통손실을 제외한 Interchange Power는 86.8MW(from area 1 to 2)이며, 전력계통을 연계하여 운전할 경우 상당한 경제적 이익이 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.

### 5. 결 론

본 연구에서는 연계계통에서 안전도제약을 고려한 OPF 문제를 해석하기 위하여 EP와 SQP 방법을 결합한 하이브리드 알고리즘을 제안하였다.

연계계통에서 OPF 문제를 해석하는데 있어 안전도를 고려하여 OPF 해석 후에 구해진 새로운 운전점은 계통 내의 사고 후에도 모션 전압크기 등 계통 제약조건을 만족함을 알 수 있었다. SQP는 초기해에 따라 수렴속도와 해가 크게 영향을 받기 때문에 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.

따라서, 본 논문에서 제시한 하이브리드 알고리즘은 여러 가지 목적함수를 갖는 문제에 기존의 방법보다 정확하고 유용한 정보를 제공할 수 있다.

**감사의 글**

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

표 4.4 하이브리드 알고리즘에 의한 연계계통의 OPF 후의 결과

Regional Load[MW]	Unit	Unit Output[MW]		Regional Generation [MW/Cost \$/h]		Interchange[MW]	Cost[\$/h]	Tie line flow [MW]
		Pre-OPF	Post OPF	Pre-OPF	Post-OPF			
Area 1 (131.3)	1	78.2	157.4(168.3)	133.2 /316.49	225.4(236.3) /571.92	94.1(105) out	255.43 Increased costs	4-7: 34.3 (40.0) 4-9: 18.2 (20.0) 5-6: 34.7 (37.0)
	2	25.0	37.2					
	3	30.0	30.8					
Area 2 (132.7)	6	119.5	35.9	139.5 /577.43	45.9(35.9) /159.93	86.8(96.8) in	417.50 Saving costs	
	8	20.0	10.0(0.0)					
Total Load(264.0)		272.7	271.2(272.1)	272.7 /893.92	271.2(272.1) /731.85	System loss: 7.3(8.3)	Combined, Net Savings 162.07	
Only EP							Combined, Net Savings 162.05	
Only SQP							Combined, Net Savings 161.04	

### (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, pp2864-2880,1984
- [2] J. S. Lipowski, C. Charalambous, "Solution of Optimal Load Flow Problem by Modified Recursive Quadratic Programming Method", Proceeding of IEE, Vol. 5, No. 3, pp691-711, 1990
- [3] R.R. shoult, D.T. Sun, "Optimal Power Flow Based upon P-Q Decomposition," IEEE Trans. on PAS, Vol. 101, No. 2, pp397-405, 1982
- [4] J. R. McDonnell, D. B. Fogel, "Evolutionary programming IV", MIT Press, 1995
- [5] G. C. Ejebe and B. F. Wollenberg, "Automatic Contingency Selection", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 1, pp97-103, 1979
- [6] 김규호, 이상봉, 이재규, 유석구, "하이브리드 알고리즘을 응용하여 안전도제약을 만족시키는 최적전력조류", 대한전기학회 논문지, 제 49권 6호, pp306-311, 2000
- [7] C.T. Lawrence & A.L. Tits, "Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming," Optimization Methods and Software 6, 265-282, 1996

표 4.1 부하데이터

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 선로조류제한치

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

표 4.3 발전비용계수와 상한치

Unit No.	Cost Coefficient			Unit Limit			
	a <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	c <sub>i</sub>	P <sub>G</sub> <sup>min</sup>	P <sub>G</sub> <sup>max</sup>	Q <sub>G</sub> <sup>min</sup>	Q <sub>G</sub> <sup>max</sup>
				(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

( ): 상경사고후 변화된 전력