

실변수 TABU탐색기법을 이용한 최적조류계산

정창우*, 이명환, 신종린 채명석
 건국대학교 전기공학과 군장대학

Optimal Power Flow Algorithm Using Tabu Search Method With Continuous Variable

Chang-Woo Jung*, Myung-Hwan Lee, Joong-Rin Shin Myung-Suk Chae
 Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ. Kunjang College

Abstract - This paper presents a Tabu Search (TS) based algorithm to solve the Optimal Power Flow (OPF) problem, converges rapidly to global optima by means of escaping local minima. In this paper, a new approach based on the random TS algorithm with continuous variable is proposed to find that a solution to the OPF problem within reasonable time complexity. To verify the efficiency of the proposed approach, case studies are made for IEEE 30-bus system

- N_G : 발전모선 집합
 - P_D : 부하의 총합
 - P_L : 계통의 송전 손실
 - U, U^{min}, U^{max} : 제어변수벡터 및 상·하한 상수벡터
 - X, X^{min}, X^{max} : 상태변수벡터 및 상·하한 상수벡터
 - a_i, b_i, c_i : i 번째의 발전기의 발전비용 계수
 - P_{Gi} : i 번째의 발전기의 유효발전량
- 이다.

1. 서 론

최적조류계산(OPF: Optimal Power Flow)은 기술적, 물리적, 환경적 제약조건(동호 및 부동호 제약) 하에서 최소비용으로 전력계통을 운용하기 위한 비선형 최적화 문제로 정의할 수 있다. 최적조류계산은 계통운용의 효율성을 증대시킴으로써 계통계획, 운용 업무의 개선, 운용자의 업무 영역확대 등의 효과를 기대할 수 있으며 그리고 최근 전력산업 구조 개편에 따른 계통운용의 효율성 확보, 합리적인 효율 체계의 확립 등에 그 필요성이 두드러지고 있다 [1,2].

기존의 최적조류계산에 사용된 해석기법은 비선형 계획법, 선형 계획법 등과 같은 수치적인 방법이 주로 사용되었다. 기존의 접근 방법들은 제어변수가 많을 경우 과도한 계산 소요 시간이 요구되므로 계산 성능을 향상 시키기 위해서 최근 metaheuristic 알고리즘이 적용되고 있다.

본 논문에서는 metaheuristic 알고리즘 중에서 tabu 탐색기법을 이용하여 최적조류계산을 수행하였다.

tabu 탐색기법은 해의 탐색 과정을 기억하여 해의 순환을 방지함으로써 국부 최적해에 수렴할 가능성을 줄였으며, 다른 전역탐색기법에 비해 대상 문제에 대한 지식을 충분히 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있다[3,4,5].

TS기법은 일반적으로 이산변수(discrete variable)를 갖는 조합 최적화 문제에 많이 이용된다. TS기법을 OPF 문제에 적용하기 위해서는 실변수(continuous variable)를 사용해야만 한다. 이러한 실변수 사용 기법은 전체 TS기법의 계산 시간, 성능에 크게 작용할 수 있기 때문에 합당한 실변수 전략이 요구된다. 본 논문에서는 기하학적 동심원을 활용한 실변수 전략을 사용하였다.

본 논문에서 사용된 알고리즘의 효율성을 보이기 위해서 IEEE 30모선 계통에 대한 사례연구를 수행하고 결과를 비교, 분석하였다.

2. OPF 문제의 정식화

일반적으로 OPF문제는 다음과 같이 정식화된다.

$$\min f = \sum_{i \in N_G} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \quad (1)$$

subject to

$$\sum P_{Gi} - P_D - P_L(u, x) = 0$$

$$U^{min} \leq U \leq U^{max}$$

$$X^{min} \leq X \leq X^{max}$$

여기서,

본 논문에서 제어변수는 발전기의 유효발전량, 발전모선의 전압, 변압기 탭 비, shunt 커패시터 용량 등이고, 상태변수로는 슬랙 발전기의 유효발전량, 발전기의 무효발전량, 부하모선의 전압 등을 사용하였다.

이러한 상태변수의 부동호 제약조건은 벌점함수를 도입하여 목적함수에 포함시킴으로써 식(2)와 같이 상태변수에 대한 제약 최적화 문제로 변환할 수 있다.

$$\min f = \sum_{i \in N_G} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) + \lambda_X (X - X^{lim})^2 \quad (2)$$

subject to

$$\sum P_{Gi} - P_D - P_L(u, x) = 0$$

$$U^{min} \leq U \leq U^{max}$$

여기서, λ_X 는 각각의 상태변수에 대한 벌점계수이고 X^{lim} 는 상태변수의 상·하한 상수벡터를 나타낸다.

3. tabu 탐색기법을 이용한 OPF

tabu search 기법은 Glover[3]에 의해 연구되기 시작한 인간의 기억 과정을 모방한 일종의 탐색기법으로서 이는 해를 탐색한 결과를 기억하고 되풀아가는 것을 금지(tabu)하고, 해의 순환(cycling)을 방지하여, 부분 최적해에서 벗어날 수 있게 하는 기법이다.

해 공간의 탐색과정은 현재해로부터 이웃해(neighbor solution)를 생성하는 move방법, 이동에 관한 정보를 규정하는 tabu 속성(attribute), 이것을 기억하고 일정기간이 지나면 이동의 tabu 상태를 해제할 수 있게 하는 tabu 목록(tabu list), move가 타부사이즈 동안 tabu list에 남아 있어서 보다 좋은 해를 적극적으로 탐색하는데 도움을 주며, tabu로 지정된 move라고 하더라도 최적해를 탐색할 수 있는 가능성이 유효하면 현재의 tabu 상태를 무시할 수 있게 해주는 열망수준(aspiration level)등에 영향을 받게 된다. 일반적인 tabu 탐색은 조합 최적화 문제(combinatorial optimization problem)에 적용할 경우에 탐색속도가 대단히 빠른 장점이 있으나, 다변수 최적화 문제 및 실변수 문제에 적용할 경우 최적해 탐색 능력이 저하될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해서 N. Hu[4]가 제안한 실변수 random tabu 탐색기법을 사용하여 OPF 문제에 적용하였다.

3.1 제어변수의 move

OPF 문제에서 사용하는 제어변수는 발전기의 유효발전량, 발전모선 전압, 변압기 탭 비, shunt 커패시터 용량 등이 일

다. 이런 제어변수들은 각각 제어할 수 있는 범위와 물리적인 제어량이 다르기 때문에 모든 제어변수가 동일한 move를 갖지 않는다.

그러므로 각각의 제어변수에 따른 move를 결정할 필요가 있다. 본 논문에서는 OPF 문제에서 사용하는 모든 제어변수의 범위를 $[-1, 1]$ 로 정규화 함으로써 모든 제어변수의 범위와 물리적인 제어량을 동일한 변수로 가정하였다. 따라서 제어변수들이 동일한 move를 가짐으로써 알고리즘의 효율성을 높였다.

3.2 이웃해의 생성

이웃해의 생성은 해 공간의 탐색성능을 결정하는 중요한 요소가 된다. 본 논문에서는 기하학적인 동심원 방법에 입각한 이웃해 생성방법을 사용하였다[4],[5].

기존의 이산 변수를 사용한 tabu 탐색과는 달리 기하학적인 동심원 반경 내에서 현재 해의 이웃 해를 임의로 선택함으로써 실 변수를 사용한 tabu 탐색이 가능하도록 하였다.

그림 1 은 이웃해 생성 위치를 2변수에 대해서 도시 한 것이다.

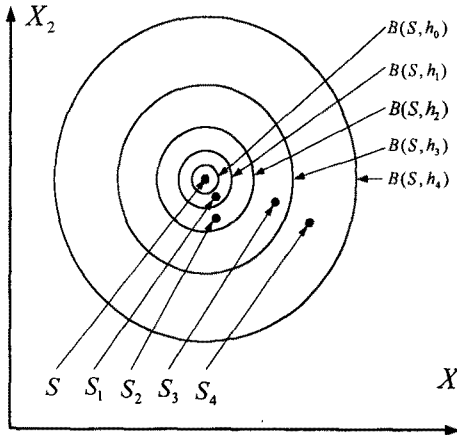


그림 1. 이웃해 생성 위치
Fig. 1 Location of neighbor solution generated from the current solution

현재해가 동심원의 중심이 되고 각각의 분할된 동심원들이 갖는 반경은 다음과 같다.

$$h_{k-i+1} = \frac{h_k}{2^{i-1}}, \quad i=1, \dots, k \quad (3)$$

여기서, k 는 이웃해의 개수, h_{k-i+1} 는 각 동심원의 반경, h_k 는 현재해에서 move할 수 있는 최대 거리이다.

그림 1 에서 S 는 현재해, S_1, S_2, S_3, S_4 현재해 S 에 대한 이웃해를 나타내고, $B(S, h_i)$ 는 각각의 이웃해에 대한 반경이다. tabu 탐색에서 k 와 $B(S, h_i)$ 는 최적해 탐색을 위한 중요한 요소로 시행착오법(trial and error)을 통해 주어진 문제에 적합한 값을 선정하였다.

3.3 tabu list와 열망조건

초기의 tabu list는 비어있는 상태이며, tabu 탐색이 반복 수행됨에 따라 얻어지는 해가 tabu list에 저장된다. 이러한 tabu list는 최근의 특정 개수(tabu size)의 해를 유지함으로써 같은 해의 순환을 억제하고 개선된 해로 진행하여 최적해에 도달하도록 한다. 일반적으로 tabu list의 크기는 저장되는 tabu 속성의 개수를 나타내며, 목록의 크기가 너무 작으면 해의 순환이 발생하기 쉬우며, 너무 크면 부분 최적을 탐색을 못할 수도 있고 계산 소요시간이 많이 요구될 수 있다.

본 논문에서 사용한 tabu list 평가방법은 그림 1 의 현재해 S 에 대한 이웃해와 tabu list에 저장된 해의 기하학적 거리가 ϵ 보다 작다면 같은 해로 간주하여 다른 해를 탐색하도록 하였고, 선택된 해가 tabu list에 있다하더라도 개선된 해로 이동할 가능성이 있다면 tabu list를 무시하고 열망조건에 의해 최선해로 선정 될 수 있도록 하였다.

3.4 tabu 탐색을 이용한 OPF

본 논문에서 실변수 tabu 탐색기법에 근간한 문제 해결을 위해 제안한 방법의 흐름도는 그림 2 와 같다.

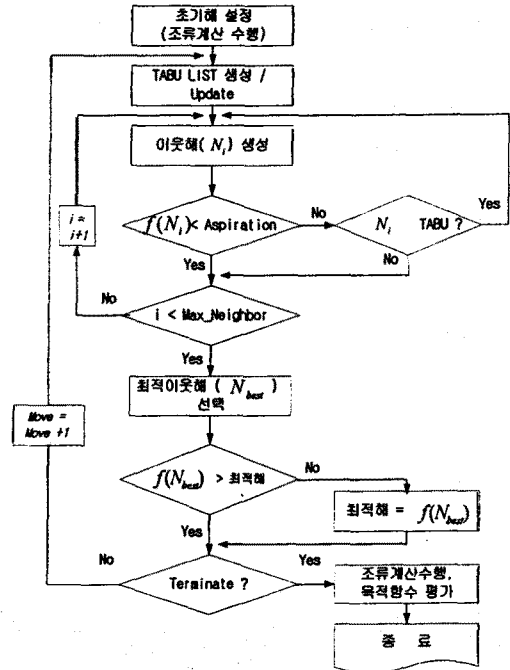


그림 2. 실변수 tabu 탐색기법을 이용한 OPF 흐름도
Fig. 2 The Flow chart of the proposed OPF based on tabu search with continuous variables

4. 사례 연구

논문에서 제안한 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해서 표본 계통(IEEE 30 모선[6])에 대한 연구를 수행하였다. 표본계통은 6개의 발전모선과 4개의 branch((6,9), (6,10), (4,12), (28,27))에 변압기가 존재하며, 무효전력 보상 장치가 10, 12, 15, 17, 20, 21, 23, 24, 29 모선에 시설된 계통이다. 모든 전력과 전압은 단위분율(pu)로 표기하였으며 전력의 base 값은 100[MVA] 이다.

표본계통의 초기 상태 및 발전기의 발전비용 계수는 표1, 표2 와 같다.

표 1. 사례연구를 위한 초기 조건
Table 1. Initial conditions for case study

Bus	1	2	5	8	11	13
P	0.9965	0.80	0.50	0.20	0.20	0.20
V	(모든 모선)				1.0	
T	(모든 변압기)				1.0	
C	(모든 커패시터)				1.0	

표 2. 발전비용 계수
Table 2. Power generation Fuel cost parameters

Bus	1	2	5	8	11	13
비용 계수	a	0	0	0	0	0
	b	2	1.75	1	3.25	3
	c	0.0037	0.0175	0.0625	0.0083	0.025

표 3, 4 는 발전모선의 P, Q, V 한계값과 탭 비 및 커패시터의 한계값을 나타내었다.

표 3. 발전모선의 P, Q, V의 한계값
Table 3. Power generation limits

Bus	1	2	5	8	11	13
P_{min}	0.5	0.2	0.15	0.1	0.1	0.12
P_{max}	2.0	0.8	0.5	0.35	0.3	0.4
Q_{min}	-0.2	-0.2	-0.15	-0.15	-0.1	-0.15
Q_{max}	2.0	1.0	0.8	0.6	0.5	0.6
V_{min}	0.95					
V_{max}	1.10					

표 4. 탭 비 및 Shunt 커패시터 한계값
Table 4. Transformer tap setting limits & Capacitor limits

구분	Tap ratio	Shunt capacitor
min	0.90	0.00
max	1.10	0.05

본 논문에서 사용한 tabu 탐색을 위한 파라메터는 다음과 같다.

- Tabu length : 7
- Neighbor 수 : 17

사용된 모든 제어변수의 범위를 [-1,1]로 변환함으로써 제어 변수의 특성을 고려하지 않고 이웃해를 선정하여 tabu 탐색을 수행하였다.

사례연구 결과는 표5, 표6에 나타내었다. 표 5는 각 제어변수에 대해 도출된 해이며, 표 6 본 논문에서 제안한 알고리즘을 50회 반복 수행하였을 때의 결과이다.

표 5. Tabu 탐색을 이용한 OPF 결과
Table 5. Results of OPF by using TS algorithm

P_1	P_2	P_3	P_4	P_{11}	P_{13}	$\$/hr$		
1.77319	0.487449	0.213743	0.211914	0.11925	0.1200	800.905		
V_1	V_2	V_3	V_4	V_{11}	V_{13}			
1.0912	1.0720	1.0409	1.0466	1.1000	1.0526			
T_1		T_2		T_3		T_4		
1.0283		1.0187		0.9150		1.0390		
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
0.0453	0.00314	0.0359	0.0478	0.0358	0.0285	0.0461	0.0253	0.0082

표 6. 모의 성능
Table 6. Performance(Worst & Best solution, Average, Standard Deviation)

초기값	Worst	Best	평균	표준편차
903.137	801.8755	800.902	801.1507	0.05269

표 6에서의 모의성능 결과에서 보듯이 평균 801.1507에서 표준 편차 0.05269이내 결과 값을 얻어 제안한 알고리즘이 비교적 높은 신뢰성 및 효율성을 보였다.

그림 3은 제시된 바와 같이 tabu 탐색알고리즘의 수렴특성을 나타낸 것이다. 그림 3에서 최적해 근방에 빠르게 수렴함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 실변수 해의 정확도를 높이기 위해 시뮬레이션 설정값을 엄격하게 주어, tabu length 는

7, Neighbor 수는 17, ϵ 을 0.0000001 로 설정하였고, 종료조건을 500회 이상 해의 개선이 없을 때 종료되는 것으로 설정하였다. 이러한 강화된 조건에 의해 다소 계산 소요 시간이 증가되었지만 정확한 해를 도출할 수 있었고, 정확한 해와 수렴속도간의 trade-off로 해의 개선이 가능함을 알 수 있었다.

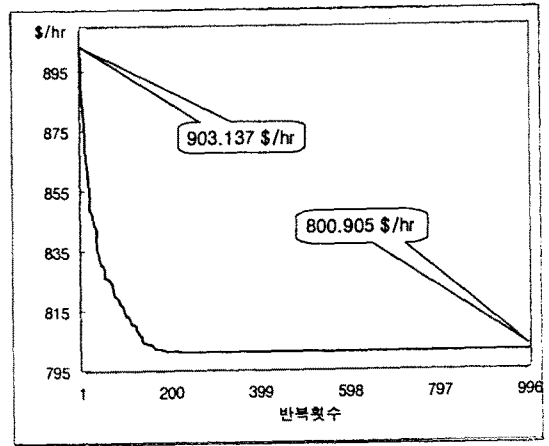


그림 3. 시뮬레이션 수렴 특성
Fig. 3 Convergent profile

5. 결 론

본 연구에서는 tabu 탐색 알고리즘을 OPF계산에 적용하였다. 실변수 해의 도출을 위해 random TS를 사용하였으며, 제어변수가 많은 OPF문제에 대해서도 시뮬레이션 결과 빠른 수렴성을 갖음을 확인하였다. 본 논문에서 수행한 사례 연구 결과는 종료조건 및 ϵ 의 완화로서 개선 할 수 있으며, 본 논문에서는 정확한 실변수 해를 구하고자 종료조건 및 ϵ , TS 파라메터를 강화하여 시뮬레이션 하였다. Neighbor의 생성이 시뮬레이션 결과에 속도 및 수렴성 면에서 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, Neighbor에 따른 격적성 판정을 위한 조류계산 수행시간의 단축이 요구되었다. 이에 따라, 향후, 이웃해 생성 방법 및 열망기준 등에 다양한 실변수 산출기법을 개발하여 수렴 특성 및 OPF 해의 특성을 개선하는 연구를 수행할 계획이다.

(참 고 문 헌)

- [1] M. E. El-Hawary, IEEE Tutorial Course - Optimal Power Flow : Solution Techniques, Requirements, and challenges.
- [2] A. J. Wood & B. F. Wollenberg, Power Generation Operation & Control : J. Wiley & Sons, Inc., N. Y. 1984
- [3] Fred Glover & Manuel Laguna, TABU SEARCH, Kluwer Academic Publisher, 1997
- [4] Nanfang Hu, "Tabu search method with random moves for Globally Optimal design", International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 35, 1055 - 1070, 1992
- [5] P. Siarry & G. Berthiau, "Fitting of Tabu search to optimize functions of continuous variables", International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 40, 2449 - 2457, 1997.
- [6] L L Lai & J T Ma, R Yokoyama & M Zhao "Improved genetic algorithm for optimal power under both normal and contingent operations", Electrical Power & Energy System, Vol 19, N 287-292, 1997