

방사상 배전계통의 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 최적 배치 및 운용

김태균, 백영기, 김규호, 유석구**

* 한국전력공사 전력연구원, ** 안산공업전문대학, *** 한양대학교

Optimal Capacitor Placement and Operation for Loss reduction and Improvement of Voltage Profile in Radial Distribution Systems

Kim Tae-Kyun, Baek Young-Ki, Kim Kyu-Ho, You Seok-Ku**

*Korea Electric Power Research Institute, **Ansan tech. college, ***Hanyang Univ.

Abstract This paper presents an optimization method which determines locations and size of capacitors simultaneously while minimizing power losses and improving voltage profile in radial distribution systems. Especially, the cost function associated with capacitor placement is considered as step function due to banks of standard discrete capacities. Genetic algorithms(GA) are used to obtain efficiently the solution of the cost function associated with capacitors which is non-continuous and non-differentiable function. The strings in GA consist of the node number index and size of capacitors to be installed. The length mutation operator, which is able to change the length of strings in each generation, is used.

The proposed method which determines locations and size of capacitors simultaneously can reduce power losses and improve voltage profile with capacitors of minimum size. Its efficiency is proved through the application in radial distribution systems.

1. 서론

방사상 배전계통에서 전력손실을 감소시키고 전압을 허용범위내에 유지시키기 위하여 커패시터를 설치할 위치 및 투입용량을 합리적으로 결정하는 것을 일반적인 커패시터 배치 문제(general capacitor placement problem)라고 한다[1-3].

방사상 배전계통에서 기존의 설비를 효과적으로 사용하면서 전력손실을 감소시키기 위하여 커패시터의 설치 위치와 용량을 결정하는 연구가 많이 진행되었다. 특히, Baran 등은 혼합정수계획법을 이용하여 주문제에서는 커패시터의 설치위치를 결정하고, 부문제에서는 투입량을 이산변수로 고려하였고, 특히 조류방정식을 문제에 포함시켰다[1]. Chiang 등은 Baran의 방법과 유사하나 부하제약을 문제에 포함시켰고, 전역적 탐색기법의 일종인 모의담금질(simulated annealing)법을 사용하였다[2]. 최근 Sundhararajan 등은 GA를 이용하여 커패시터 설치위치 및 용량에 관하여 최적계획 하였다[3]. 특히, 감도분석으로부터 커패시터가 설치될 위치를 선정하고, GA를 이용하여 투입량을 결정하는 2단계 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 방사상 배전계통에 있어서 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 최적배치 및 운용 방안을 제시하였다. 커패시터 배치와 관련된 비용함수를 실제

뱅크단위로 이산성을 고려하여 계단함수로 정식화하였고, 불연속이면서 미분 불가능한 함수인 커패시터 배치와 관련된 비용함수의 해를 효율적으로 구하기 위하여 GA를 이용하였다. 특히, GA의 스트링을 커패시터가 배치될 모선의 인덱스와 투입량인 뱅크단위로 동시에 구성하여 기존의 방법보다 효율적으로 해를 탐색하였다. 또한, 스트링의 길이를 변화시킬 수 있는 길이 돌연변이(length mutation) 연산자를 사용하므로써 효과적으로 커패시터 설치위치의 수를 결정할 수 있었다.

제안한 커패시터 설치위치와 투입량을 동시에 탐색할 수 있는 방안으로부터 커패시터의 최소 투입량으로 다양한 부하수준에서 전력손실을 감소시키고, 전압강하를 적절히 보상시킬 수 있으며, 이에 대한 효용성을 방사상 배전계통에 적용하여 입증하였다.

2. 커패시터 최적 배치를 위한 정식화

커패시터 배치 문제는 방사상 배전계통에 설치될 커패시터의 위치 및 투입용량을 결정하는 것이다.

계통의 전력손실을 최소화하기 위하여 주어진 시간 T 동안의 부하변동을 고려할 필요가 있다. 부하변동이 이산적으로 근사화시키고 부하는 일정하게 변화된다고 가정하여 부하지속곡선(load duration curve)을 그림 1과 같이 구간별선형함수(piecewise linear function)로 근사화한다.

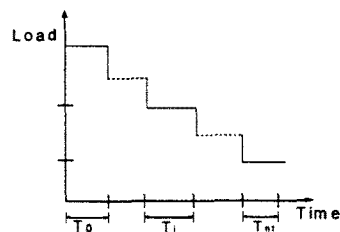


그림 1 근사화한 부하지속곡선

또한, 임의의 모선에서 커패시터의 비용은 그림 2와 같이 뱅크단위의 설치비용 함수인 불연속의 미분 불가능한 계단함수(step-like function)로 나타낼 수 있다. 목적함수는 계통전압의 허용범위와 같은 운전제약을 만족시키면서 계통의 전력손실을 감소시키기 위한 커패시터 설치를 위한 총 설치비용을 최소화하는 것으로서 식 (1)과 같이 나타내었다.

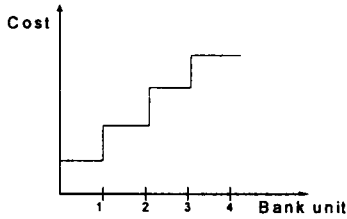


그림 2 미분불가능한 계단함수로 구성된 비용함수

$$\begin{aligned} \text{MIN } & K_e \sum_{i=1}^{nt} T_i P_i + K_p P_0 + K_c \sum_{j=1}^{nc} Q_c j \\ \text{s.t. } & Q_{c_i}^{\min} \leq Q_{c_i} \leq Q_{c_i}^{\max} \\ & V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

nt, nc : 부하수준의 수 및 커패시터 설치후보의 수
 K_e, K_p, K_c : 전력손실, 침투부하 전력손실 및 커패시터 비용 계수

T_i, P_i : 부하수준 i 의 지속시간 및 전력손실

P_0 : 침투부하 전력손실

Q_{c_j} : 커패시터 설치위치 j 의 투입량

V_j : 모선 j 의 전압크기

$\cdot^{\max}, \cdot^{\min}$: 상하한치

3. 유전알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithms : GA)은 자연선택과 자연 유전학의 원리를 근거한 최적점탐색 알고리즘이다. GA는 최적화문제의 목적함수로부터 적합도를 구해 적합도에 따라 다음 세대에 생존과 소멸을 결정하는 것이다[5]. 본 연구에서는 이산성을 고려하여 계통손실 및 전압보상을 위한 커패시터 최적배치 방안으로서, 커패시터를 설치할 위치와 투입량을 동시에 결정하기 위하여 유전알고리즘의 스트링을 정수로 표현하여 설치위치와 커패시터의뱅크단위로 구성하였다. 커패시터가 설치될 후보위치를 그림 3과 같이 나타내었으며, 첫 번째 열은 커패시터가 설치될 후보인덱스를 의미하고, 두 번째 열은 후보위치의 위치번호를 나타내었다. 또한, GA의 스트링을 그림 4와 같이 구성하여 나타내었다. 효율적인 유전작용자를 사용하기 위하여 첫 번째 열에는 후보위치의 위치인덱스를, 두 번째 열에는 투입량에 대한 커패시터뱅크단위로 구성하였다. 또한 각 개체의 스트링의 길이를 X^t 와 Y^t 같이 서로 다르게 표현하였다.

(위치인덱스)	1	2	3	4	5	6	7	8
(후보위치)	2	3	4	5	6	7	8	9

그림 3 위치인덱스와 후보위치

X^t	(위치인덱스)	1	3	2	4	5		
	(투입뱅크)	2	1	3	2	1		
Y^t	(위치인덱스)	2	4	1	7	3	6	8
	(투입뱅크)	3	1	4	3	1	2	3

그림 4 스트링 길이가 다른 두 개체의 위치인덱스와 투입뱅크

3.1 유전작용자

GA를 이용하여 최적해를 탐색하기 위하여 다음과 같은 유전작용자가 사용된다[4,5].

가. 복제(Reproduction)

복제란 적합도에 비례하여 개체를 생존시키는 작용자로서, 비선형이고 불연속인 양의 값을 갖는 함수로 적합도 함수를 정의할 수 있다.

나. 교차(Crossover)

새롭게 복제된 개체들 중에서 교차확률에 따라 교차할 개체를 선정한다. 예를 들어 그림 2와 같이 X^t 와 Y^t 라는 개체가 선정되었다고 하면 식 (2)와 같이 두벡터의 선형조합(linear combination)으로 정의한다. 이것을 whole arithmetical crossover라 한다. a 는 0과 1 사이의 난수, t 는 현재대, $t+1$ 은 다음세대, X^t 와 Y^t 는 어버이이고, X^{t+1} 과 Y^{t+1} 은 자손이다.

$$\begin{aligned} X^{t+1} &= a \cdot Y^t + (1-a) \cdot X^t \\ Y^{t+1} &= a \cdot X^t + (1-a) \cdot Y^t \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)로부터 계산된 값은 실수이므로 정수값으로 변환시킨다.

다. 돌연변이

교차를 행한 후 개체의 스트링에서 각각의 유전자는 돌연변이 확률만큼 랜덤한 변화를 한다. 돌연변이 대상 개체가 선정되면 길이 돌연변이(length mutation)를 사용하여 스트링의 길이를 새로 결정한다. 그리고, 대상 개체의 임의의 유전자에 대하여 후보위치 및 투입량을 새롭게 선정한다.

3.2 최적화를 위한 유전알고리즘 응용

정식화한 목적함수 및 제약조건을 페널티함수를 이용하여 비제약 최적화문제로 변형한 후, GA를 응용하기 위하여 역을 취하여 적합도 최대화문제로 변형하여 방사상 배전계통의 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 배치 및 운용의 최적해를 탐색한다.

4. 사례연구 및 검토

방사상 배전계통의 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 최적배치 및 운용 방안의 효율성을 입증하기 위하여 표 1과 같은 23kV 9-section feeder로 구성된 계통에 적용하였다[3].

커패시터는 300kvar/bank로 하였으며, 최대 10bank로 하였다. 전압의 허용범위는 0.90-1.00p.u., 개체의 수는 30개, 최대세대의 수는 100세대로 하였다. 비용계수는 $K_p = \$168/\text{kWh/year}$, $K_e = 60\text{mills/kWh}$, $K_c = \$4.9/\text{kvar}$ 이다[3]. 또한, 표 2와 같은 부하수준 및 부하지속시간을 고려하였으며, 부하수준 110%가 침투전력이다.

표 1 9-section feeder의 데이터(3상)

send node	end node	Send node load		Line impedance of section	
		P(kw)	Q(kvar)	R(ohm)	X(ohm)
2	3	1640	200	5.3434	3.0264
3	4	980	130	4.7953	2.7160
4	5	1150	60	2.0552	1.1640
5	6	780	110	0.9053	0.7886
6	7	1610	600	1.9831	1.7276
7	8	1598	1840	0.6984	0.6084
8	9	1790	446	0.7463	1.2050
9	10	980	340	0.0140	0.6051
10	1(SS)	1840	460	0.1233	0.4127

표 2 부하수준 및 부하지속시간

Load level(%)	110	90	70
Time interval(hours)	1000	6760	1000

커패시터를 설치하지 않은 상태에서 연간 전체 전력손

실 비용은 \$528,075이며, 표 3은 유전작용자 확률에 따른 커패시터 설치후 전체비용을 나타낸 것이다. Case E가 가장 좋은 결과를 나타내었으며, 연간 약 \$13,653의 비용이 절감됨을 알 수 있다.

표 3 유전작용자 확률에 따른 전체비용

	Case					
	A	B	C	D	E	F
교차확률	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7
돌연변이 확률	0.05	0.02	0.03	0.05	0.09	0.05
전체비용 (\$)	524,203	519,484	521,381	515,689	514,422	521,618

그림 5는 각 Case에 따른 전체비용, 그림 6은 침두부하 손실비용을 나타낸 것이다. 그림 7은 각 세대가 진행됨에 따른 페널티 함수의 변화를 나타낸 것이며, 각 경우에 있어 일정 세대를 거친후 제약조건을 만족하여 페널티가 영으로 됨을 알 수 있다. 표 4는 만족할 만한 결과를 나타낸 Case D와 E에 대한 커패시터 설치위치와 투입량을 나타내었다.

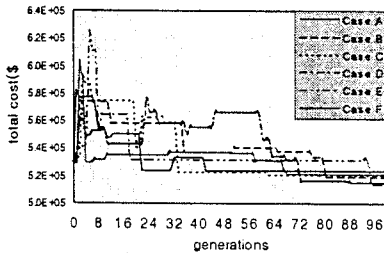


그림 5 전체비용

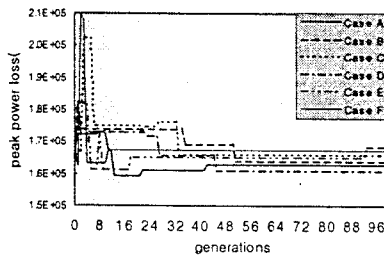


그림 6 침두부하 전력손실 비용

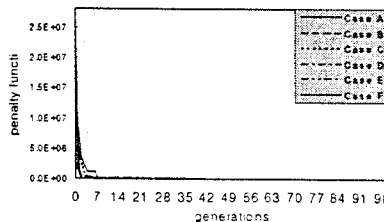


그림 7 페널티 함수의 변화

표 5는 각 부하수준에 대하여 커패시터를 설치하지 않은 경우와 결과가 가장 좋은 Case E에 대한 전압크기를 비교한 것이다. 커패시터 설치 후 전압허용범위를 만족함을 알 수 있다. 또한, 손실은 각 부하수준의 커패시터

설치 전 보다 감소되었다.

표 4 커패시터 설치위치 및 용량

설치위치 (노드)	용량(kvar)					
	Load level(%)					
	Case D			Case E		
	110%	90%	70%	110%	90%	70%
2	2100	1200	2100	2100	900	600
4	0	0	0	2400	1200	0
6	3000	1800	0	0	0	0
7	2100	2400	0	1800	1800	0

표 5 커패시터 설치전·후의 전압크기

노드	전압크기(p.u.)					
	Load level(%) - Case E					
	커패시터 설치전			커패시터 설치후		
	110%	90%	70%	110%	90%	70%
2	0.8109	0.8587	0.8938	0.9005	0.9003	0.9061
3	0.8361	0.8773	0.9076	0.9118	0.9135	0.9167
4	0.8719	0.9039	0.9275	0.9342	0.9350	0.9337
5	0.8934	0.9199	0.9395	0.9449	0.9464	0.9445
6	0.9052	0.9287	0.9462	0.9497	0.9521	0.9503
손실(p.u.)	1.1059	0.6272	0.3585	1.0039	0.5735	0.3460

5. 결론

본 연구에서는 방사상 배전계통에 있어서 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 최적배치 및 운용 방안을 제시하였다.

커패시터 배치와 관련된 비용함수를 실제 뱅크단위로 이산성을 고려한 계단함수로 정식화하고, 커패시터 배치와 관련된 비용함수의 해를 효율적으로 구하기 위하여 GA를 사용하였다. 특히, GA의 스트링을 커패시터가 배치될 위치인덱스와 투입량인 뱅크단위로 동시에 구성하여 기존의 방법보다 효율적으로 해를 탐색할 수 있었다. 또한, GA의 스트링의 길이를 변화시킬 수 있는 길이 돌연변이 연산자를 사용함으로써 효과적으로 커패시터 설치위치의 수를 결정할 수 있었다.

제안한 커패시터 설치위치와 투입량을 동시에 탐색할 수 있는 방안으로부터 커패시터의 최소 투입량으로 전력손실을 감소시키고, 전압강하를 적절히 보상할 수 있다.

끝으로 불평형 배전계통의 부하변동에 따른 전력손실 및 전압보상을 위한 커패시터 운용 방안을 확립할 필요가 있다고 사료된다.

(참고 문헌)

- [1] M. Baran, F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution system", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, No. 1, pp725-734, January, 1989
- [2] H. Chiang, "Optimal capacitor placements in distribution system: Part 1 : A new formulation and the overall problem", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, pp634-649, January, 1990
- [3] S. Sundhararajan, "Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems using Genetic Algorithm", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 9 No. 3, pp1499-1507, August, 1994
- [4] 문병서, 김규호, 유석규, "가변직렬 콘덴서를 이용하여 과도안정도 향상을 위한 유전알고리즘 응용", 대한전기학회 논문집, 제46권 1호, pp38-45, 1997
- [5] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms + Data structures = Evolution Programs", Second Edition, Springer Verlag, 1992