

유전알고리즘을 이용한 전압/무효전력 제어

김종율, 김학만, 국경수, 오태규
한국전기연구원

Voltage and Reactive Power Control By Using Genetic Algorithm

Jong Yul Kim, Hak Man Kim, Kyung Soo Kook, Tae Kyoo Oh
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In this study, Genetic Algorithm(GA) is applied for voltage and reactive power control in power system. In power system, switched shunt capacitors are used to improve the voltage profile and to reduce power losses. There are many switched shunt capacitors in power system. Therefore, it is necessary to coordinate these switched shunt capacitors. A Genetic Algorithm(GA) is used to find optimal coordination of switched shunt capacitors in power system. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated in KEPCO's power system.

1. 서 론

전력 계통이 점점 더 복잡해지고 커져감에 따라 정상상태에서의 전력손실 감소 및 전압 특성 향상뿐만 아니라 상정상고시의 저전압 발생 문제 등을 해결하기 위해서는 전압 및 무효전력의 적절한 제어가 필요하다.

일반적으로 전압 및 무효전력 제어는 전력 계통내의 변압기 탭, 발전기 단자 전압, switched shunt capacitor 등과 같은 무효전력원의 적절한 조작을 통해 이루어지는데 더 나은 전압 및 무효전력 제어 효과를 얻기 위해서는 전력 계통내의 여러 개의 무효전력원들의 운영을 최적으로 결정하여야 한다.

즉, capacitor 배치 문제[1-2]가 바로 그 예라고 할 수 있는데 이는 전력 계통내 capacitor의 설치 위치 및 투입량을 최적화함으로써 전압 및 무효전력 제어 효과를 향상하고자 하는 연구이다.

아울러 변압기 탭, 발전기 단자 전압 및 switched shunt capacitor 간의 협조제어 역시 이러한 목적을 달성하는데 있어 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

그러나 전력 계통이 광역화됨에 따라 많은 수의 무효전력원이 존재하며 이들을 적절히 제어하는 것은 매우 많은 시간이 소요되는 어려운 일이라 할 수 있다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 기존에는 로컬 네트워크 모델링이나 decomposition을 이용하는 기법[3-4]을 통해 계통 사이즈와 계산 시간을 줄이고자 하는 연구가 진행되었으며 simulated annealing과 같은 최적해 탐색 기법을 이용하는 방법[5]이 제시되었다.

또한 최근에는 전문가 시스템 및 신경망이나 유전알고리즘과 같은 인공지능 기법을 이용하는 방법[6,8,9]이 제시되고 있다.

본 논문에서는 전압 및 무효전력 제어를 위해 switched shunt capacitor 투입량을 최적해 탐색기법인 유전알고리즘을 이용하여 최적화시키는 기법을 제시하였다.

사례연구에서는 한전 중장기 계통 계획 데이터에 근거한 테스트 계통에서 상정상고시 저전압 발생 문제를 switched shunt capacitor 투입량을 유전알고리즘으로 최적화하여 해결하고자 하였고 저전압 문제 해결후의 모선 전압 분포 및 유효전력 손실을 감도 분석을 이용한 방법[6-7]과 비교하여 효과를 확인하였다.

2. 유전알고리즘에 의한 전압 및 무효전력 제어

전력 계통내의 각 모선에 설치된 switched shunt capacitor 투입량 제어에 의해서 선로에 흐르는 무효전력을 제어할 수 있고 이를 통해 전력손실 감소 및 전압 특성 향상의 효과를 얻을 수 있다. 그러나 이러한 효과를 얻기 위해서는 switched shunt capacitor의 투입량을 적절히 선정하여야 하는데 전력 계통이 점점 커지고 복잡해짐에 따라 많은 수의 switched shunt capacitor가 존재하고 이를 최적화시키는 것은 어려운 문제이다.

본 논문에서는 switched shunt capacitor에 의한 전압 및 무효전력 제어 문제를 다음과 같은 최적화 문제로 정의하였고 이를 유전알고리즘을 이용하여 최적해를 탐색하였다.

$$\min F(X) = F_v(X) + F_{loss}(X) \tag{1}$$

여기서,

$X = [SC_i]$: i 번째 switched shunt capacitor 투입량 [Mvar]

$F_v(X) = \sum_j V_{d,j}$: $V_{d,j}$ 는 j 번째 모선 전압 편차

$F_{loss}(X)$: 유효전력 손실 [MW]

$F_v(X)$ 는 각 모선 전압에 대한 설정값과의 편차의 합이며 식(2)~식(5)와 같이 모선 전압 편차가 1.0[pu] 근처의 일정부분에서는 '0'이 되도록 하고 그 범위를 벗어나면 선형적으로 증가하도록 하였으며 모선 전압 허용범위 ($V_{min2} \leq V_j \leq V_{max2}$)를 초과할 경우는 매우 큰 임의의 값을 가지도록 하였다.

$$V_{min1} \leq V_j \leq V_{max1} \text{ 이면 } V_{d,j} = 0 \tag{2}$$

$$V_{max1} < V_j \leq V_{max2} \text{ 이면 } V_{d,j} = (V_j - V_{max1}) \tag{3}$$

$$V_{min2} \leq V_j < V_{min1} \text{ 이면 } V_{d,j} = (V_{min1} - V_j) \tag{4}$$

$$V_{min2} > V_j \text{ 또는 } V_j > V_{max2} \text{ 이면 } V_{d,j} = \alpha \tag{5}$$

여기서,

V_j : j 번째 모선 전압 [pu]

V_{min2}, V_{max2} : 모선 전압 허용범위 상하한치 [pu]

V_{min1}, V_{max1} : 전압 편차 '0'구간의 상하한치 [pu]

α : 임의의 매우 큰 상수

또한 switched shunt capacitor 투입량에 대한 제약조건은 식(6)과 같다.

$$SC_i^{\min} \leq SC_i \leq SC_i^{\max} \quad (6)$$

SC_i 는 i 번째 switched shunt capacitor의 투입량을 나타내며 switched shunt capacitor 투입 bank 수에 따라 이산적인 값을 가진다.

유전알고리즘의 적합도 선정은 최적해 탐색에 있어 매우 중요한데 본 논문에서는 최소화 문제이므로 목적함수 값이 적어질수록 적합도가 증가하도록 식(7)과 같이 선정하였다.

$$fitness = \frac{\beta}{W_1 * F_v(X) + W_2 * F_{loss}(X)} \quad (7)$$

여기서, W_1, W_2 : 가중치
 β : 임의의 상수

유전알고리즘을 이용하여 최적해를 구하는 과정은 다음과 같다.

- a) 초기화
 주어진 문제의 제약조건을 고려하여 랜덤하게 스트링을 생성하는 과정이다. switched shunt capacitor 투입 bank 수가 랜덤하게 발생된다.
- b) 평가
 각 스트링을 주어진 목적함수에 따라 적합도를 계산한다. 각 스트링의 switched shunt capacitor 투입량에 대해 PSS/E를 이용하여 조류계산을 수행하고 모선 전압 편차 및 유효전력 손실을 계산하여 적합도를 구한다.
- c) 복제
 자연 생태계의 적자생존의 메카니즘을 이용한 것으로 높은 적합도를 가진 염색체일수록 다음세대에 복제 될 확률이 높으며, 여러 가지 방법이 있지만 룰렛휠 방법을 사용하였다.
- d) 교배 및 돌연변이
 복제한 후 일정한 확률을 가지고 스트링을 변화시켜 새로운 해집단을 생성하는 과정이며 교배 및 돌연변이 방법으로는 변경된 단순교배(modified simple crossover)와 균일 돌연변이(uniform mutation)를 사용하였다.
 예를 들면, t 세대에서 두 개의 스트링 $S_v^t = [v_1, \dots, v_N]$ 와 $S_w^t = [w_1, \dots, w_N]$ 에 대한 교배 결과는 식(8),(9)이며 돌연변이 결과는 식(10)과 같다.

$$S_v^{t+1} = [v_1, \dots, v_k, v_{k+1}, \dots, v_N] \quad (8)$$

$$S_w^{t+1} = [w_1, \dots, w_k, w_{k+1}, \dots, w_N] \quad (9)$$

여기서, $v_j = \alpha_1 \times v_j + \alpha_2 \times w_j$
 $w_j = \alpha_1 \times w_j + \alpha_2 \times v_j$
 α_1, α_2 : 0 과 1사이의 임의수
 N : 각 스트링의 변수의 개수

$$S_v^{t+1} = [v_1, \dots, v_k', v_{k+1}, \dots, v_N] \quad (10)$$

여기서, v_k' 는 k 번째 변수의 상한치와 하한치 사이의 임의 수

e) b)~d) 과정을 반복하여 수행한다.

3. 사례 연구

본 논문에서 제시한 기법의 효과를 검증하기 위해서 테스트 계통에 적용하여 PSS/E 환경에서 상정사고시 저전압 발생 모선의 전압 향상 정도를 검토하였다. 검토 대상 계통은 한전의 중장기 데이터를 근거로 하였으며 계통 조건 및 사례연구에서 사용한 파라메타는 표 1과 같다.

표 1 사례연구에서 사용된 파라메타

계통 구성	239기 745부하 944모선
$V_{\min 1}$	0.97
$V_{\max 1}$	1.03
$V_{\min 2}$	0.925
$V_{\max 2}$	1.05
switched shunt capacitor	0.0 ~ 설정값
α	100

본 사례 연구에서는 모선 전압이 0.925[pu] 미만인 경우를 저전압 모선으로 1.05[pu] 초과인 경우를 과전압 모선으로 정의하였고 모선 전압 허용범위($V_{\min 2} \sim V_{\max 2}$)를 0.925~1.05[pu]로 선정하였다. 상정사고 스크린 결과 7410-7470 345kV 2회선 차단 상정사고시 7380,7390,7470 모선에서 저전압 문제가 발생하였고 고장 선로 인근 지역의 계통에 설치되어 있는 switched shunt capacitor 29개를 최적화 할 변수로 선정하였다.

표 2에서는 상정사고 전후의 7380,7390,7470 모선 전압을 나타내고 있다. 상정사고시 정상상태 모선 전압 보다 0.1[pu] 정도 감소함을 알 수 있다. 따라서 이들 3개 모선의 전압을 모선 전압 허용범위 내로 향상시키는 동시에 각 모선 전압 편차 및 유효전력 손실을 감소하도록 switched shunt capacitor를 최적화하였다. 표 3에서는 최적화에 사용된 유전알고리즘의 파라메타 값을 나타내고 있다.

표 2 상정사고 전후의 모선 전압

모선	상정사고 이전 전압 [pu]	상정사고 이후 전압 [pu]
7380	1.0007	0.9074
7390	1.0024	0.9060
7470	1.0074	0.8969

표 3 유전알고리즘 파라메타

GA 파라메타	설정값
해집단 수	80
세대수	50
교배확률	0.85
돌연변이 확률	0.005
β	100000
W_1	10
W_2	5

그림 1,2에서는 유전알고리즘의 세대수에 대한 적합도 및 7380,7390,7470 모선 전압의 추이를 나타내고 있다. 초기에는 저전압 발생으로 적합도가 매우 낮지만 6-7세대 경과하면서 7380,7390 모선 전압이 0.925[pu] 이상으

로 향상됨에 따라 적합도가 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 10세대 경과 후 7470 모선 역시 저전압 문제가 해결되면서 다시 한번 적합도가 급격히 증가하고 있다. 15세대가 지나면서는 각 모선 전압이 $V_{min1} \sim V_{max1}$ 사이에서 분포하면서 유효전력 손실이 적어지도록 하기 위한 해를 탐색하는 과정이라고 할 수 있으며 이에 3개 모선 전압이 다소 떨어지는 경향을 나타내고 있다.

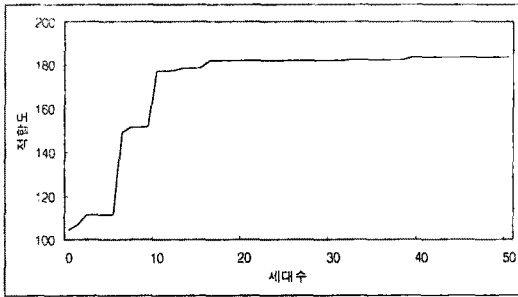


그림 1 세대수 경과에 따른 적합도 추이

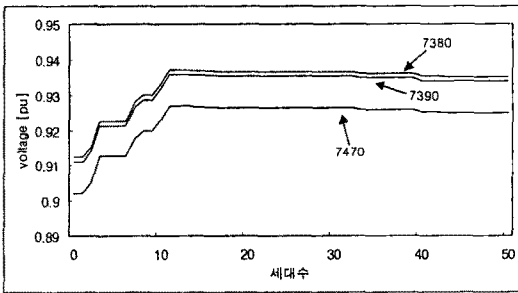


그림 2 세대수 경과에 따른 7380,7390,7470 모선 전압 추이

본 사례 연구에서는 감도 분석을 이용한 방법[6-7]에 의한 저전압 문제 해결 결과를 유전알고리즘에 의한 결과와 비교하여 그 효과를 검토하였으며 표 4에서는 두 가지 방법에 결과를 나타내고 있다.

결과 비교에서 사용된 감도 분석을 이용한 방법은 7380,7390,7470 모선 전압에 대한 29개 switched shunt capacitor의 영향도를 검토하여 영향도가 큰 순서로 차례대로 switched shunt capacitor를 최대 용량까지 투입하면서 저전압 문제를 해결하는 것이다.

비교 결과 두 가지 방법 모두 저전압 발생 문제는 해결되었다. 그러나 감도 분석을 이용한 방법의 경우 모선 전압 편차의 합이 큰 값을 가지는데 이는 저전압 모선은 없지만 전체적인 모선들의 전압이 1.0[pu]와는 상당한 편차를 가지고 분포함을 의미한다. 이에 반해 본 논문에서 제시한 유전알고리즘을 이용한 방법의 경우 각 모선 전압이 1.0[pu] 가까이 분포함을 알 수 있고 이로 인해 무효전력 손실측면에서 약 5[Mvar]정도 더 감소하는 결과를 나타내었으며 유효전력 손실 측면에서도 약 0.3[MW] 정도 줄어들었다.

4. 결론

본 논문에서는 최적해 탐색 기법인 유전알고리즘을 이용하여 switched shunt capacitor 투입량을 최적화시키는 기법을 제시하였고 이를 선계통에 적용하여 그 효과를 검증하였다. 효과 검증을 위한 사례연구에서는 상경 사고시 저전압 발생 문제를 해결하기 위해 저전압 발생

모선 인근의 switched shunt capacitor를 유전알고리즘으로 최적화하였고 저전압 발생 모선의 전압 향상 정도 뿐만 아니라 각 모선 전압의 분포 및 유효전력 손실 저감 효과를 감도 분석을 이용한 방법과 비교하여 검토하였다. 비교 결과 본 논문에서 제시한 기법이 모선 전압 분포를 더욱 향상시켰으며 유효전력 손실 측면에서도 더 좋은 결과를 나타내었다.

향후로는 변압기 탭 및 발전기 단자 전압 또는 FACTS 기기들을 포함한 협조제어에 대해서 후후 연구범위를 확장할 계획이다.

표 4 저전압 문제 해결 결과 비교

		감도 분석을 이용한 방법	유전알고리즘을 이용한 방법
모선 전압 편차의 합		16.104	7.527
유효전력 손실 [MW]		75.201	74.958
무효전력 손실 [Mvar]		1136.128	1131.948
모선전압 [pu]	7380	0.9349	0.9359
	7390	0.9337	0.9347
	7470	0.9250	0.9259

(참고 문헌)

- [1] J. J. Grainger and S. H. Lee, "Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, March, 1981, pp.1105-1116
- [2] M. Baran and F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution system", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 4, No.1, January 1989, pp.725-734
- [3] H.Kobayashi and et al., "Diakoptic approach to sensitivity analysis in large-scale systems", IEEE/PES Summer Meeting, Los Angeles, July 16-21, 1978, Paper No.A78531-6.
- [4] N.Deeb and S. M. Shagidehpour, "Linear reactive power optimisation in large power network using decomposition approach", IEEE Trans on Power Systems, Vol.5, No.2, May 1990, pp.428-438.
- [5] R.-H. Liang and Y.-S. Wang, "Main transformer ULTC and capacitors scheduling by simulated annealing approach", Electrical power & Energy systems, Vol.5, No.2, May 2001, pp.531-538.
- [6] Tan Loc Le and Michael Negnevitsky, "Expert System Application for Voltage and VAR Control in Power Transmission and Distribution Systems", IEEE Trans on Power Delivery, Vol.12, No.3, July 1997, pp.1392-1397.
- [7] I. Hano and Y. Tamura and S. Narita, "Real time control of system voltage and reactive power", IEEE Trans on Power Systems and Apparatus, Vol.88, No.10, Oct 1969
- [8] Santoso NI and Tan OT, "Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems", IEEE Trans on Power Systems, May 1990, pp.266-272.
- [9] Hidenori Aoki and Yoshibumi Mizutani, "Reactive Power Control by Genetic Algorithm", Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting - V.2, pp.1389-1393