

GA를 이용한 UPFC와 전력용 콘덴서의 최적 제어

김학만, 김종율, 오태규  
한국전기연구원

Optimal Control of UPFC and Switched Shunt Capacitor by Using Genetic Algorithm

Hak-Man Kim, Jong-Yul Kim, Tae-Kyoo Oh  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - In power system planing and operation, voltage and reactive power control are very important. The voltage deviation and system losses can be reduced through control of reactive power sources. In general, there are several different reactive power sources, we used UPFC and switched shunt capacitor to improve the voltage profile and to reduce system losses in this study. Since there are many switched shunt capacitors in power system, so it is necessary to coordinate these switched shunt capacitors. In this study, Genetic Algorithm(GA) is used to find optimal coordination of UPFC and switched shunt capacitors in a local area of power system. In case study, the effectiveness of the proposed method is demonstrated in KEPCO's power system. The simulation is performed by PSS/E.

1. 서 론

전력계통이 점점 더 복잡하고 광역화됨에 따라서 전압 및 무효전력 제어는 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 특히 전압과 밀접한 관련이 있는 무효전력은 그 특성상 장거리 수송 및 수수가 어렵다. 따라서 효과적인 전압 및 무효전력 제어를 위해서는 지역계통 내의 조상설비들을 최적으로 운용하는 것이 중요한데 비선형의 복잡한 시스템인 전력계통에 대해 해석적인 방법을 이용하여 조상설비의 운영을 결정하기란 매우 어려운 일이다. 이에 대해서 과거 지속적인 연구가 수행되었다[1]-[8]. 한편, 최근 전력계통에 FACTS(Flexible AC Transmission Systems)가 도입되어 전력조류 제어에 이용되고 있다. 국내에서 조류 및 전압제어를 위해서 강진변전소의 80MVA급 UPFC가 운전되고 있다.

본 논문에서는 지역계통의 전압 및 무효전력 제어를 위해서 UPFC의 전압, 유효 및 무효전력 제어값과 154kV 변전소에 설치된 대표적인 조상설비인 전력용 콘덴서의 최적 투입량을 최적해 탐색기법 중 하나인 GA(Genetic Algorithm)를 이용하여 결정하는 기법을 제안하였다. 본 논문에서 사용된 GA는 탐색공간의 여러 점을 동시에 탐색하는 전역적 탐색방법으로 국부해에 수렴할 가능성이 적고 목적함수의 미분가능 및 연속성과 같은 조건에 제약을 받지 않는 확률론적 최적해 탐색방법이다. 사례연구에서는 우리계통의 중장기 계획 데이터를 이용하여 지역 관리자 계통에 적용하여 상정사고시 발생하는 전압 강하에 대한 전압 및 무효전력 제어에 초점을 두었다. 시뮬레이션은 실제 계통 해석에 이용되고 있는 PTI사의 PSS/E에서 수행하였다.

2. GA를 이용한 전압 및 무효전력 제어

모선 전압과 무효전력은 아주 밀접한 관련이 있다. 특히, 무효전력의 수수는 양단 모선 전압 크기에 의해서 결정되며, 또한 전력손실을 발생시킨다. 따라서 효과적인

전압 및 무효전력의 제어를 위해서는 가능한 모선 전압 크기의 차이가 없이 전압 분포가 이루어지는 것이 효과적이다. 특히, 상정사고 발생시에는 상정사고가 발생한 모선을 중심으로 전압이 크게 강하하며, 상대적으로 상정사고의 영향을 적게 받는 모선의 경우는 비교적 적은 전압 강하가 발생하여 모선 간에 전압차를 커지게 한다. 이런 계통 상황에서 전압의 크기가 큰 모선에서 전압이 작은 모선으로 무효전력이 이동하게 된다. 따라서 상정사고 이후 지역 계통의 전압 크기를 모두 같게 유지시키는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 가능하면 특정 범위 내로 유지하여 상대적으로 전압의 분포를 고르게 하고, 이 때 발생하는 손실을 최소화하는 것이 바람직하다.

따라서 본 논문에서는 이런 관계를 수리 모델로 반영하였는데, 수리 모델의 개념은 UPFC의 전압, 유효 및 무효전력 제어값과 대표적인 154kV 모선의 조상설비인 전력용 콘덴서의 투입량 결정에 대해서 각 모선 전압의 분포를 가능하면 특정 범위 내로 유지시키며, 상정사고에 따른 상대적인 영향으로 인해 특정 범위 내로 유지하기가 어려운 경우라도 허용되는 최소한의 범위 내로 유지시키는데 초점을 두었다. 이와 아울러 전력 손실의 최소화를 고려하였다. 무효전력 손실의 경우는 각 모선 전압 균형에서 반영되어 있으므로, 추가로 유효전력의 손실의 최소화하는 것을 목적함수인 식 (1)에 반영하였다.

$$\min F(X) = \sum_j V_{d,j}(X) + Loss(X) \quad (1)$$

여기서,  $X = [SC_i, UP, UQ, UV]$  : 전력용 콘덴서 설치 모선들의 투입량과 UPFC의 유효전력, 무효전력, 전압 제어 값을 나타내는 벡터

$SC_i$  : i 번째 모선의 전력용 콘덴서의 투입량[Mvar]

$UP$  : UPFC의 유효전력 제어 값

$UQ$  : UPFC의 무효전력 제어 값

$UV$  : UPFC의 전압 제어 값

$V_{d,j}(X)$  : 전력용 콘덴서 투입량과 UPFC 제어 벡터 X에 대한 j 번째 모선의 전압 위반 정도

$Loss(X)$  : 유효 전력 손실 [MW]

최적화 수리 모델에서 식(2)~(6)의 제약 조건이 수립되었는데, 식(2)는 전력용 콘덴서의 투입량은 설비 용량 범위 내에서 가능해야함을 나타낸다. 실제 투입량은 전력용 콘덴서 설치 모선의 전력용 콘덴서의 뱅크 단위로 뱅크 투입 수에 따라 불연속적인 값을 가진다.

$$SC_i^{\min} \leq SC_i \leq SC_i^{\max} \quad (2)$$

식 (3)~(5)는 UPFC의 용량을 고려한 제어 값의 범위를 나타낸 것이다.

$$UP^{\min} \leq UP \leq UP^{\max} \quad (3)$$

$$UQ^{\min} \leq UQ \leq UQ^{\max} \quad (4)$$

$$UV^{\min} \leq UV \leq UV^{\max} \quad (5)$$

목적함수 식(1)에서 모선의 전압 위반 정도는 그림 1의 전압 범위에서 규정된다. 그림 1에서 전압 범위는 크게 3부분으로 정의된다.  $V_{\min 1} \sim V_{\max 1}$ 로 표현되는 목표전압범위는 전압의 균형을 위한 목표 전압의 범위이고  $V_{\min 2} \sim V_{\max 2}$ 로 표현되는 모선전압 허용범위는 운용측면에서 허용되는 전압 범위이며, 모선전압 허용범위의 바깥 부분은 모선전압 위반범위를 나타낸다. 모선 전압 크기에 따라 식(6)~(9)와 같이 페널티 값으로 규정되어 지역계통의 모선 전압이 가능한 목표전압범위 내로 분포될 수 있도록 유도하였다. 즉, 식(7),(8)의 모선전압 허용범위 안의 모선 전압크기에 대해서 선행적으로 페널티를 부가하였으며, 모선전압 위반범위 안의 모선 전압 크기에 대해서는 임의의 큰 페널티 상수를 부가하였다.

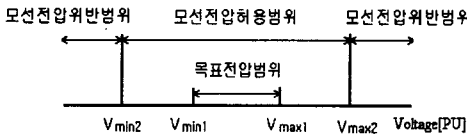


그림 1 전압 범위

$$V_{\min 1} \leq V_j \leq V_{\max 1}, \quad V_{d,j} = 0 \quad (6)$$

$$V_{\max 1} < V_j \leq V_{\max 2}, \quad V_{d,j} = (V_j - V_{\max 1}) \quad (7)$$

$$V_{\min 2} \leq V_j < V_{\min 1}, \quad V_{d,j} = (V_{\min 1} - V_j) \quad (8)$$

$$V_j < V_{\min 2} \text{ 또는 } V_j > V_{\max 2}, \quad V_{d,j} = \alpha \quad (9)$$

여기서,  $V_j$ : j번째 모선 전압 [PU]

$V_{\min 1}, V_{\max 1}$ : 모선의 목표전압범위의 상하한치 [PU]

$V_{\min 2}, V_{\max 2}$ : 모선의 전압허용범위의 상하한치 [PU]

$\alpha$ : 모선전압 위반에 따른 페널티 상수

UPFC의 제어값과 전력용 콘덴서 투입 뱅크 수를 최적화하는 문제에서 최적화 변수는 전력용 콘덴서 투입량 즉, 뱅크 수와 UPFC의 유효 및 무효전력, 전압 값이므로 이를 그림 2와 같이 GA에서 최적화 변수들의 벡터로 구성되는 단일 염색체 개체로 표현하여 전체 해집단을 구성하였다. 여기서 각 변수들은 정수로 표현하였다.

$$\text{1번째 염색체} \quad [SC_1 \ SC_2 \ \dots \ SC_j \ UP \ UQ \ UV]$$

$$\text{2번째 염색체} \quad [SC_1 \ SC_2 \ \dots \ SC_j \ UP \ UQ \ UV]$$

$$\text{N번째 염색체} \quad [SC_1 \ SC_2 \ \dots \ SC_j \ UP \ UQ \ UV]$$

그림 2 해집단의 구성

GA의 적합도 선정은 최적해 탐색에 있어 매우 중요한데 본 논문에서는 최소화 문제이므로 목적함수 값이 적어질수록 적합도가 증가하도록 하기 위해서 식(10)과 같이 정의하였다.

$$\text{fitness function} = \frac{\beta}{W_1 * \sum_j V_{d,j}(X) + W_2 * \text{Loss}(X)} \quad (10)$$

여기서,  $W_1, W_2$ : 가중치

$\beta$ : 임의의 상수

그림 3은 GA의 적용 흐름도를 나타내고 있다. 본 논문에서는 엘리트즘(elitism)을 이용하여 적합도가 가장 우수한 염색체를 다음 세대에 강제로 복제시키는 방법을 이용하였다.

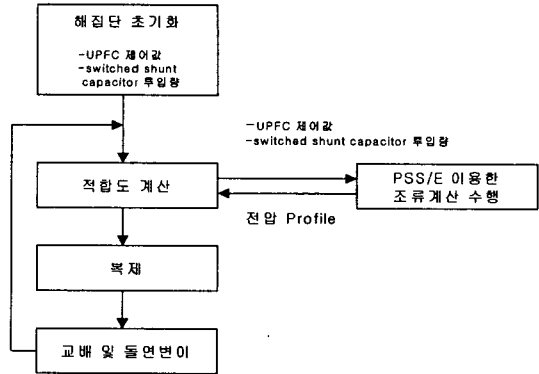


그림 3 GA 적용 흐름도

### 3. 사례 연구

본 논문에서 제시한 기법의 효과를 검증하기 위해서 테스트 계통에 대해 PSS/E 환경에서 상정사고시 저전압 발생 모선의 전압 향상 정도를 검토하였다. 검토 대상 계통은 한전의 중장기 데이터를 근거로 하였으며 대상 계통은 239 발전기 모선과 743 부하 모선으로 구성되어 있다.

본 사례 연구에서는 상정사고 시 모선 전압이 0.925[pu] 미만인 경우를 저전압 모선으로 1.05[pu] 초과인 경우를 과전압 모선으로 정의하였고 모선전압 허용범위( $V_{\min 2} \sim V_{\max 2}$ )를 0.925~1.05[pu]로 선정하였다. 최적해 탐색과 관련된 전압 범위와 관련된 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 전압 범위 관련 파라미터

파라미터	설정값
$V_{\min 1}$	0.97
$V_{\max 1}$	1.03
$V_{\min 2}$	0.925
$V_{\max 2}$	1.05
$\alpha$	100

사례연구 적용 지역계통은 전력용 콘덴서가 29곳 154 kV 변전소에 설치되어 있는 그림 4의 남서부 지역계통으로, 2회선 선로 차단 상정사고 스크린 결과 7150~7600 345kV 2회선 차단 상정사고 시 및 7410~7470 154kV 2회선 차단 상정사고 시 저전압 문제가 발생하였다. 표 2는 상정사고 전·후의 저전압 발생 모선 전압을 나타낸 것이다.

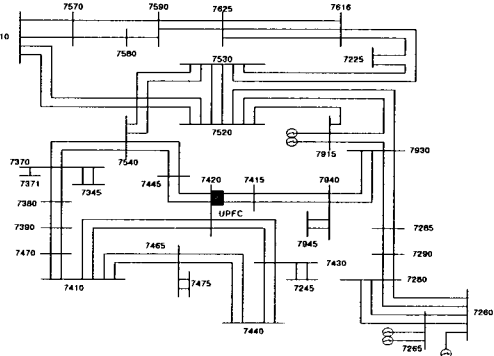


그림 4 테스트 계통 제어 지역

표 2. 상정 사고 전·후 모선 전압 변동

Case	상정사고	모선	상정사고 이전 [PU]	상정사고 이후 [PU]
Case 1	7150-7600	7400	0.9836	0.9171
	2회선 탈락	7500	0.9865	0.9203
Case 2	7410-7470	7380	1.0007	0.9074
	2회선 탈락	7390	1.0024	0.9060
		7470	1.0074	0.8969

표 3에서는 최적화에 사용된 GA의 파라미터 값을 나타낸 것이다.

표 3. GA 파라미터

GA 파라미터	설정값
해집단 수	50
세대수	30
교배확률	0.85
돌연변이 확률	0.05
$\beta$	100000
$W_1$	10
$W_2$	5

UPFC의 제어 범위는 식 (11)~(13)과 같이 정하였다.

$$-100 \leq UP \leq 100 \quad (11)$$

$$-100 \leq UQ \leq 100 \quad (12)$$

$$0.94 \leq UV \leq 1.03 \quad (13)$$

사례연구에 대한 GA 적용 결과는 그림 5, 6과 같다. 그림 5는 Case 1에 대한 GA 적용시 세대별 7450, 7500 모선의 전압 변화를 나타낸 것이다. 30세대에 이르렀을 때 7400 모선 전압은 0.9738[PU]로 개선되었고, 7500 모선 전압은 0.9707[PU]로 개선되었다. 그림 6은 Case 2에 대한 GA 적용시 세대별 7380, 7390, 7470 모선의 전압 변화를 나타낸 것이다. 30세대에 이르렀을 때 7380 모선 전압은 0.9417[PU]로, 7390 모선 전압은 0.9405[PU]로, 7470 모선 전압은 0.9318[PU]로 개선되었다.

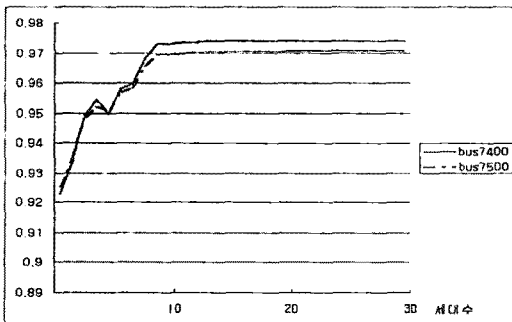


그림 5. 세대별 모선 전압(Case 1)

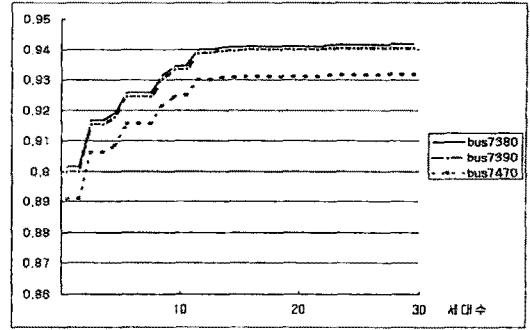


그림 6. 세대별 모선 전압(Case 2)

#### 4. 결론

본 논문에서는 최적해 탐색 기법인 GA를 이용하여 전력 계통내의 UPFC의 유효 및 무효전력, 전압의 제어값과 전력용 콘덴서의 투입량을 최적화시키는 기법을 제시하였고 이를 실제계에 적용하여 그 효과를 검증하였다. 그 결과 상정사고시 저전압 발생 모선의 전압을 0.925[p.u]이상으로 향상시킴을 알 수 있었다.

특히, 제시한 기법은 우리계통의 실제계통 해석에 이용되고 있는 PTI사의 PSS/E 환경에서 PSS/E와 호환이 되는 고급 언어인 IPLAN을 이용하여 구현하였으므로 실제계의 계통계획 및 운용 측면에서도 활용이 기대된다.

#### [참 고 문 헌]

- [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] 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.
- [8] Hidenori Aoki and Yoshitomi Mizutani, "Reactive Power Control by Genetic Algorithm", Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting - V. 2, pp. 1389-1393.