

직렬콘덴서를 이용한 송전용량증대를 위한 유전알고리즘 응용

유석구 김규호 이경훈*

현양대학교

An Application of Genetic Algorithm to increase Transfer Capacity using Series Capacitor

Seok-Ku You Kyu-Ho Kim Kyung-Hoon Lee*
Hanyang University

Abstract This paper proposes a GAs-applied method for power system planning using series capacitors in order to control the flow of power as desired and utilize the existing transmission facilities to its transfer capacity limits. The control strategy problem is formulated as optimization problem. Also, in employing genetic algorithms to solve the optimization problems, real variable-based genetic algorithm is presented to save the coding processing time and obtain more accurate value of the variable. An application to IEEE 57-bus test system proves that the proposed method is effective for improvement of power system transfer capacity.

1. 서론

근래 전력수요의 증가에 따라 전력설비를 확장하는 것은 입지 확보의 어려움과 환경적인 제약, 그리고 많은 건설기간이 소요되는 등 경제적 부담을 준다. 따라서 증가하는 전력수요에 대처하여 기존의 발-송전설비를 효율적으로 운용하여 송전전력을 최대로 증대시킬 필요가 있다. 최근 대전용량 반도체기술이 실용화됨에 따라 직렬콘덴서, 이상변압기, SVC, HVDC 등과 같은 FACTS기기를 이용하여 선로의 임파인더스와 송수전선간의 전압크기 및 위상각을 제어함으로써 선로조류를 제어하여 송전전력증가 및 안정도를 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 특히 고속 가변직렬콘덴서와 같은 FACTS기기의 설치에 따른 SSR영향의 분석 및 해결책에 관한 연구가 제시되고 있으며[1], 에너지함수를 이용하여 과도간도항상을 위한 FACTS기기 설치위치선정 및 투입용량결정에 관한 연구가 진행되고 있다[2]. 또한 수요의 증가로 인해 선로의 정격용량을 초과하는 문제가 발생될 수 있다. 송전선로에 흐르는 전력은 FACTS기기의 일종인 직렬콘덴서를 이용하여 송전선로의 임파인더스를 보상하므로써 과부하상태에 있는 선로의 조류를 여유가 있는 다른 선로로 분산시키, 결국에는 송전용량이 증대되는 효과를 얻을 수 있다. 따라서 이러한 직렬콘덴서의 특성을 이용하여 송전체통의 설비이용률을 높임으로써 기존의 설비만으로도 송전용량을 증대시키는 일이 가능하다.

본 연구에서는 자연의 유전학과 자연선택의 원리에 기초한 전역적탐색기법인 유전알고리즘을 이용하여 송전용량증대를 위한 직렬콘덴서 설치위치와 투입량을 결정하는 방법을 제시하였다. 특히 유전알고리즘의 스트링을 정수로 표현하여 직렬콘덴서를 설치할 선로로서 구성하였으며, 동시에 투입량을 최적화하였다. 끝으로 제안한 알고리즘을 IEEE 57보선 모델계통에 적용하여 타당성을 보였다.

2. 유전알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithms : GAs)은 자연의 유전학과 자연선택의 원리를 근거로 한 최적집합생기법으로서, 자연계에서 염색체가 복제, 교배, 돌연변이 등의 과정을 통해서 진화하듯이 이러한 역할을 하는 사용자들을 사용하여 해를 구한다. 유전알고리즘의 장점은 다음과 같다. 첫째, 단일해가 아닌 해집단을 구성함으로 전역적 최적집을 구할 가능성이 높다. 둘째, 목적함수의 미분가능과 연속성등의 조건이 필요없이 복잡한 비선형 함수에 쉽게 적용할 수 있다[3~6].

최근 GAs는 기계설계, 시스템의 상태추정, 퍼지제어기 설계, 전력계통 등 다양한 분야에 성공적으로 적용되고 있다. 유전알고리즘은 일반적으로 최적화문제의 변수들의 집합을 유한길이의 2진 스트링으로 코딩하는데, 본 연구에서 변수를 2진 스트링으로 코딩하지 않고 스트링을 구성하는 유전알고리즘을 사용하여 코딩질차에 따른 시간을 줄이고 좀 더 정확한 값을 유지한다. GAs는 다음과 같은 유전자작용자를 갖는다.

가. 복제(Reproduction)

이전 세대의 개체들 중에서 다음 세대를 구성할 개체를 선택하는 연산자이다. 적합도가 큰 개체일수록 선택될 확률이 높으며, 따라서 다음 세대는 이전 세대에 비해 큰 적합도평균을 갖는다.

나. 교차(Crossover)

새롭게 복제된 개체들 중에서 교차확률에 따라 교차할 개체를 선정한다. 예를 들어 $S_v^t = (v_1, \dots, v_m)$,

$S_w^t = (w_1, \dots, w_m)$ 라는 개체들이 선정되고 k번재 위치에서 교차가 일어난다면, 그 결과 새롭게 형성된 개체들은 식(1)과 같다. 이와 같은 교차를 Simple Crossover라 한다.

$$S_v^{t+1} = (v_1, \dots, v_k, w_{k+1}, \dots, w_m) \quad (1)$$

$$S_w^{t+1} = (w_1, \dots, w_k, v_{k+1}, \dots, v_m) \quad (1)$$

다. 돌연변이(Mutation)

돌연변이 연산자는 개체의 스트링에서 돌연변이화를 만큼 랜덤한 변화를 일으켜 국지적최적화로 수렴하는 것을 방지하는 역할을 한다. 돌연변이 연산자중에 uniform돌연변이는 식 (2)와 같이 돌연변이화를 의해 선택된 개체 S^t 의 변수 v_k 를 상하한치 u_k^t 와 l_k^t 내에서 바꾸는 것이다.

$$S^{t+1} = (v_1, \dots, v_k, \dots, v_m) \quad (2)$$

3. 송전용량 증대를 위한 정식화

부하의 증가에 따른 조류의 변화로 인해 정격용량을 넘는 선로가 발생할 수 있다. 이 경우에 그 선로의 송전전력을 정격용량이하로 유지하면서 부하에 전력을 안정하게 공급되도록 다른 선로에 직렬콘덴서를 설치하여 리액턴스를 감소시킬 필요가 있다. 따라서 직렬콘덴서의 설치장소와 투입량을 결정해야만 한다. 설치장소를 결정하고 투입량을 최소화하기 위해서 식 (3)과 같이 제약조건을 갖는 최적화 문제로 구성할 수 있다.

$$\text{Minimize } X_c = \sum X_{ci} \quad (3)$$

$$\text{s.t } P_r \leq P_r^{\text{rated}}$$

$$V_j^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}$$

X_c : 전체 선로의 총투입량

X_{ci} : 선로*i*의 투입량

P_r : 선로*r*의 유효전력

P_r^{rated} : 선로*r*의 정기유출전력

V_j : 모선j의 전압크기

V_j^{\max}, V_j^{\min} : 모선j의 전압상·하한치

제약조건으로는 모든 선로의 유효전력정격용량을 초과하지 않으면서 선로리액턴스변화에 의한 모선전압의 상하한치를 만족하도록 하였다. 위의 식 (3)의 최적화 문제를 식 (4)와 같이 페널티함수를 포함하는 새로운 목적함수로 구성하므로써 제약조건이 없는 최적화 문제로 변형할 수 있다.

$$\text{Minimize } f = \sum X_{ci} + \mu \sum (P_t - P_t^{\lim})^2 + \mu \sum (V_j - V_j^{\lim})^2 \quad (4)$$

P_t^{\lim} : 선로t의 정격유효전력제약, 즉

$$P_t^{\lim} = \begin{cases} P_t^{\text{rated}} & \text{IF } P_t \geq P_t^{\text{rated}} \\ P_t & \text{IF } P_t < P_t^{\text{rated}} \end{cases}$$

V_j^{\lim} : 모선j의 전압제약, 즉

$$V_j^{\lim} = \begin{cases} V_j^{\max} & \text{IF } V_j > V_j^{\max} \\ V_j & \text{IF } V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max} \\ V_j^{\min} & \text{IF } V_j < V_j^{\min} \end{cases}$$

4. 유전알고리즘의 적용

송전용량증대를 위한 방안으로서, 효율적으로 직렬콘덴서 설치위치와 투입량을 결정하기 위하여 유전알고리즘의 스트링을 정수로 표현하였다. 또한 다음과 같은 선로는 선택될 선로에서 제외한다.

- ① 하나의 발전기모선과 연결된 단일 선로
- ② 변압기가 설치된 선로
- ③ 선로에 흐르는 조류가 정격용량을 넘는 선로

다음은 유전알고리즘을 이용한 직렬콘덴서 설치위치와 투입량을 결정하기 위한 절차이다.

첫째, 초기개체의 발생

개체의 유전자수를 결정한 후, 선로중에서 유전자수만큼을 랜덤하게 선택한다. 이때 같은 선로가 2번이상 선택될 수도 있다. 선택된 선로들은 유전자로서 개체를 구성한다.

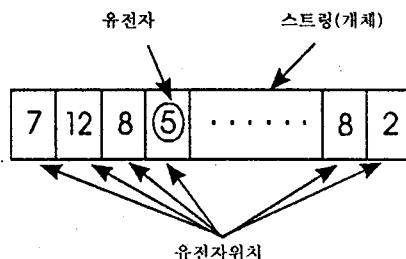


그림 1 개체구성도

Fig. 1 Structure of String

둘째, 설치위치 및 투입량 결정

선택된 선로의 투입량은 그 선로의 리액턴스와 선택된 횟수에 따라 결정된다. 만약 i번째 선로가 N_i 번 선택되었다면 그 선로의 투입량은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{ci} = N_i \times X_i \times R \quad (5)$$

여기서 N_i, X_i, R 은

N_i : 선로i의 선택된 수

X_i : 선로i의 리액턴스

R : $0 < R < 1$

이다. 한 선로의 투입량 X_{ci} 를 식 (5)과 같이 정의하므로써 계통전체의 투입량은 개체의 유전자수에 의해서 고정되는 것이 아니라 유동적이 되며, 따라서 총투입량을 최소화할 수 있다. 이때

선로 리액턴스의 변화에 따라 계통어드미던스를 새롭게 구성한다.

셋째, 조류계산 및 적합도 평가

각 개체에 대해서 조류계산을 하고, 식 (4)의 역을 취하여 식 (6)과 같이 목적함수 최소화문제를 적합도 최대화문제로 변형한다.

$$\text{Fitness} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

네째, 유전자 조작

GAs의 작용자인 복제, 교차, 돌연변이를 각각의 작용자 확률에 따라 행한다.

위의 단계들을 그림 2와 같은 순서도에 따라 행한다.

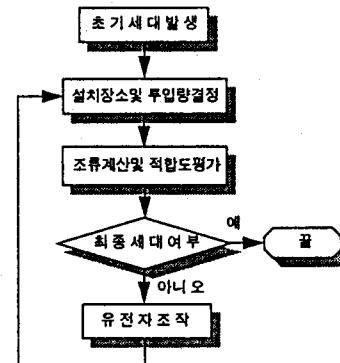


그림 2 순서도

Fig. 2 Flow Chart

5. 사례연구

IEEE 57 bus 모델개통에 제안된 방법을 적용하여 효율성을 입증하였다. 1개의 선로(경우 1)와 3개의 선로가 초과한 경우(경우 2)에 대해 개체를 구성하는 유전자수를 각각 10개, 12개로 하고, 교차확률은 0.6, 돌연변이확률은 0.0333으로 하였다. 표 1은 경우1에 대하여 직렬콘덴서 투입전과 투입후의 선로조류를 나타낸 것이며, 표 2는 직렬콘덴서가 설치된 선로와 투입양을 나타낸 것이다. 선로 8의 유효전력조류는 정격용량을 14%초과 하였으나 직렬콘덴서를 선로 7, 22, 28에 0.217[p.u.]만큼 투입하여 정격용량이하로 감소하였다. 표 3과 4는 경우 2에 대한 결과를 나타낸 것이다. 경우 1과 유사함을 알 수 있다.

표 1 유효전력변화 (경우 1)

Table 1 Variation of Real Power (Case 1)

선로번호	정격용량 [p.u.]	유효전력조류 (투입전)[p.u.]	정격초과율 [%]	유효전력조류 (투입후)[p.u.]
8	1.56	1.7801	14	1.5513

표 2 선로투입량 (경우 1)

Table 2 Injected Reactance of each line (Case 1)

선로번호	투입량[p.u.]	보상율[%]
7	0.138	80
22	0.057	80
28	0.022	40

표 3 유효전력변화 (경우 2)

Table 3 Variation of Real Power (Case 2)

선로번호	정격용량 [p.u.]	유효전력조류 (투입전)[p.u.]	정격초과율 [%]	유효전력조류 (투입후)[p.u.]
3	0.50	0.6020	20	0.4115
8	1.56	1.7801	14	1.5531
28	0.55	0.6971	26	0.5529

표 4 선로투입량 (경우 2)

Table 4 Injected Reactance of each line (Case 2)

선로번호	투입량[p.u.]	보상율[%]
7	0.104	60
14	0.07	80
22	0.057	80
53	0.006	20

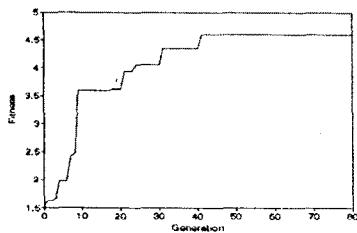


그림 3 적합도 (경우 1)

Fig. 3 Variation of Fitness (Case 1)

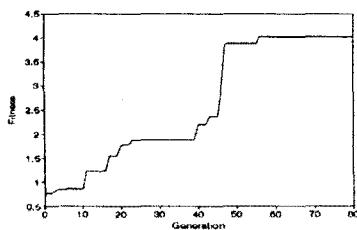


그림 4 적합도(경우 2)

Fig. 4 Variation of Fitness (Case 2)

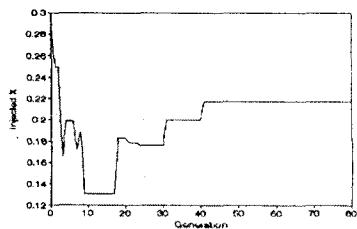


그림 5 계통전체의 총투입량 (경우 1)

Fig. 5 Variation of Injected Reactance (Case 1)

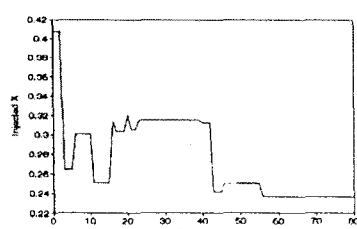


그림 6 계통전체의 총투입량 (경우 2)

Fig. 6 Variation of Injected Reactance (Case 2)

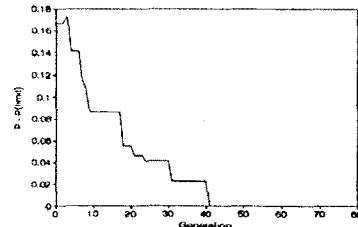


그림 7 정격초과유효전력 (경우 1)

Fig. 7 Variation of Real Power Overflow (Case 1)

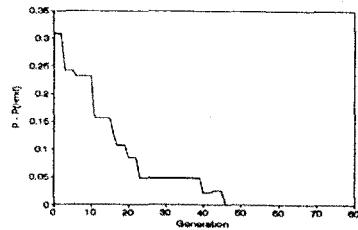


그림 8 정격초과유효전력 (경우 2)

Fig. 8 Variation of Real Power Overflow (Case 2)

그림 3과 4는 적합도변화이고, 그림 5와 6은 저령콘덴서의 총투입량을 나타낸 것이다, 그림 7과 8은 선로의 정격용량을 초과한 송전유효전력의 합을 각각의 경우 1과 2에 대해 나타낸 것이다. 경우 1은 약 40세대이후부터 선로의 조류가 정격용량이하로 감소하였고, 저령콘덴서의 총투입량도 일정한 값으로 수렴하여 거의 변화되지 않으므로 적합도 역시 변화되지 않음을 알 수 있다. 또한 경우 2는 약 45세대이후부터 선로조류는 정격용량이하로 감소하였으나, 저령콘덴서의 총투입량은 계속 변화하여 선로의 조류를 정격용량이하를 유지하면서 감소함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 전역적탐색기법인 유전알고리즘을 이용하여 송전용량증대를 위한 저령콘덴서 설치위치와 투입량을 결정하는 방법을 제시하였다. 목적함수는 전체계통에 투입되는 보상량의 최소화로 구성하였고 선로의 정격유효전력과 보상전압을 제약조건으로 하였다. 특히 유전알고리즘의 스트링을 정수로 표현하여 저령콘덴서를 설치할 선로로서 구성하였으며, 동시에 투입되는 저령콘덴서의 양을 최소화하였다. 따라서 송전선로의 임피던스가 보상되어 과부하상태에 있었던 선로의 조류를 여유가 있는 다른 선로로 분산시킬 수 있었으며, 결국 송전용량이 증대되는 효과를 얻을 수 있었다. 끝으로 본 논문에서는 정상상태해석을 논하였지만, 과도안정도와 동태안정도에 대한 해석도 함께 수행될 필요가 있다.

7. 참고문헌

1. C. E. Bowler, D. H. Baker "FACTS and SSR - Focus on TCSC Application and Mitigation of SSR Problems", Proceedings : FACTS Conference EPRI TR-100504
2. K. R. Padiyar, H. S. Y. Sastry, "Direct Stability Analysis of AC/DC Power Systems Using a Structure Preserving Energy Function", Proceedings of IEEE Int. Conference on Computer System and Signal Processing, Bangalore, India, December, 1984
3. 유석구, 김규호, "상정사고를 고려한 전압-무효전력 예방제어", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp3-6, 1995
4. D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison Wesley, 1989
5. Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Second Edison, Springer Verlag, 1992
6. 류근배 등, "유전알고리즘을 이용한 선형유도전동기의 다중목적 최적설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp165-167, 1994