

유전알고리즘을 이용한 배전계통의 손실 최소화에 관한 연구

윤창대*, 최상열*, 신명철*
*성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과

A Study with Genetic Algorithm Applied to Distribution Systems Reconfiguration for Loss Minimization

Chang-Dae Yoon*, Sang-youll Choi*, Myung-chul Shin*
*Dept. of Electrical and Compter Eng. Sungkyunkwan Univ.

Abstract - Distribution systems consist of network in physical and radial in electrical aspect. Therefore, radial operation is realized by changing the status of sectionalizing switches, and is usually done for loss reduction in the system. In this paper, we propose an optimal method for distribution systems reconfiguration. Specifically, we use genetic algorithm method to solve distribution systems reconfiguration for loss minimization problem. A genetic algorithm(GA) is set up, in which some improvements are made on string coding, fitness function and mutation pattern. As a result, premature convergence is avoided.

1. 서 론

대부분의 배전계통은 방사상의 형태로 구성되어 있으며, 계통 내에는 수 개 이상의 상시 개로 개폐기와 상시 폐로 개폐기가 있다. 정상적으로 운전되는 상태를 기반으로 하여 배전계통은 계통의 신뢰도를 향상시키고 손실을 줄이기 위해 선로상 개폐기의 상태를 적절히 결정함으로써 재구성 될 수 있다. 특히, 정상 상태에서는 전압강하가 크게 발생하는 지점의 부하를 절체함으로써 전력손실을 줄일 수 있고 부하분담을 균등하게 하여 전력공급의 신뢰도는 물론 기기의 수명 연장을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 개폐기를 원방에서 신속히 조작할 수 있게 하는 배전자동화 시스템의 기반을 제공할 수 있다. 지금까지 배전계통의 운용시 발생하는 선로 손실을 최소화하는 목적으로 여러 가지 기법들이 계통의 재구성을 위한 방법으로 제안되었다. Aoki 등[1]은 sectionalizer에 의한 변압기와 피더들간의 부하 균형을 위한 알고리즘을 제시하였고, Shirmohamadi 등[2]은 모든 개폐기를 닫은 망 상태의 배전계통에서 조류계산을 통해 전류가 가장 적게 흐르는 개폐기를 열어 방사상구조를 유지하는 방법을, Baran 등[3]과 Cinvanlar 등[4]은 개폐기 조작을 통해 저장된 손실을 계산하는 근사적인 조류계산 방식을, Goswami 등[5]은 KVL 과 KCL (Kirchhoff)의 전압, 전류 법칙)을 이용하여 손실감소를 위한 배전계통 재구성의 알고리즘을 제안하였으며 이외에도 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing), 전문가 시스템, 그리고 최근에는 여러 인공지능(AI)기법들이 도입되고 있는 추세이다. 하지만, 대부분의 방법이 지역최적해에 수렴하는 특성을 가지고 있으며, 매우 많은 계산 시간을 필요로 하는 부담으로 인해 대규모의 배전계통에는 적용이 불가능한 단점을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 전역적인 해를 찾는 데 적합하고 계산상의 부담을 줄일 수 있는 유전 알고리즘(GA)을 제안하였으며, 기존에 사용되었던 GA의 실행능력을 개선하기 위해 초기 스트링의 구성 시 각 브랜치의 인덱스값을 계산하여 보다 전역적인 스트링으로 구성하고[7], 염색체의 표현과 적합도 함수의 몇몇 요소들을 수정하여 돌연변이로 하여

금 해의 조기 수렴을 방지함으로써 알맞은 해에 수렴하도록 하였다.

2. 선로의 손실 최소화

2.1 손실 최소화의 개요

배전계통에서의 손실 최소화 문제는 계통내의 부하 불평형이나 과부하가 발생하는 피더를 확인한 후 구분 개폐기와 연계개폐기를 조작하여 위반 요소를 해소함으로써 구현되는 것이며 이것은 선로의 구성과 전압, 전류 등의 제약조건을 동시에 만족해야 하는 문제이다. 다시 말해서 이 문제는 손실 최소화를 나타내는 목적함수를 이용하여 선로를 재구성함으로써 제약조건을 위반하는 지점의 부하를 다른 쪽으로 절체시켜, 결과적으로 부하분담을 균등하게 하여 손실을 최소화하는 것이다.

2.2 목적함수와 제약 조건

목적함수는 아래의 식 (1)에서 계산한 손실을 전체 계통의 관점에서 최소화하는 것으로 모든 선로에 나타나는 손실의 합으로 간단히 표현된다.

- 목적함수

$$Min : P_{loss} = \sum_{i=1}^n r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (1)$$

P_i, Q_i : 구간 i 에서의 유효 및 무효전력

r_i : 구간 i 에서의 선로 저항

V_i : i 번째 부하단의 전압

- 전류 제약조건 : 지선 i 를 흐르는 전류 I_i 는 도체 허용 전류용량의 한계치 이하이어야 한다. 즉,

$$I_i \leq I_i^{max} \quad i=0,1, \dots, n \quad (2)$$

I_i : i 번째 지선의 유입전류

I_i^{max} : 도체의 허용 전류용량

- 전압강하 제약조건 : 부하단 전압 V_i 는 허용전압의 하한치 이상이어야 한다. 즉,

$$V_i \geq V_i^{min} \quad i=0,1, \dots, n \quad (3)$$

V_i : i 번째 부하단의 전압

V_i^{min} : 부하단의 허용전압 하한치

- 방사상 제약조건 : 계통의 방사상 구조는 계속 유지되어야 하며 조류의 흐름이 루프를 형성해서는 안 된다. 즉,

$$T = e - e_c, \quad e_c = n - 1 \quad (4)$$

- T : 연계 개폐기의 개수
- e : 선로 개수
- n : 모선의 개수
- e_c : 닫힌 개폐기의 개수

3. 유전 알고리즘(GA)

유전 알고리즘은 생물의 진화과정을 모방한 확률적 탐색방법으로 하나의 해가 아닌 여러 해집단을 동시에 탐색하는 전역적 탐색이 우수한 알고리즘이다. 탐색공간의 새로운 점들은 재생산, 교배, 돌연변이라는 유전알고리즘의 연산을 거쳐 진화되고, 이러한 연산들은 일관적으로 연속적인 세대를 통해 더 나은 자손을 생산하며 전역 최적해를 향해 빠르게 도달하도록 한다. 본 논문에서는 염색체의 구성과 적합도 함수를 계통에 적용 가능한 형태로 설정하였으며 돌연변이 연산의 확률을 변화시켜 초기해에 수렴하는 것을 피하도록 하였다. 그림1에는 제시한 유전알고리즘의 전체적인 흐름을 나타내었다[9].

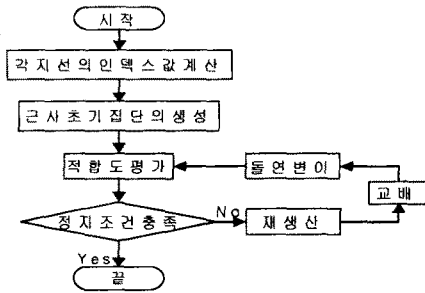


그림 1. 알고리즘의 전체 구성도

3.1 개체의 표현과 초기구성

Nara등[6]은 염색체의 구조를 각 스위치 *i*에 대해 "Arc No. (*i*)"와 "SW. No. (*i*)"로서 나타내었다. 이것은 각각 *i*번째 개방 스위치를 포함하는 Arc(branch)번호와 Arc상에 위치하는 상시 개방 스위치를 나타낸다. 하지만 이와 같은 방법으로 모든 스위치에 대하여 염색체를 표현한다면, 대규모의 배전계통에서는 염색체의 길이가 매우 길어지기 때문에 모든 Arc와 스위치를 염색체로 표현한다는 것은 계산상으로 볼 때 매우 비능률적인 결과를 가져오는 것을 알 수 있다. 일반적으로, 배전계통의 개방 스위치의 위치를 나타내는 번호는 계통의 방사상 구조에 의해 광범위적으로 결정할 수 있다. 따라서 방사상 구조를 유지하는 것은 계통내의 개방 스위치 번호를 결정하는 것만으로 충분하다. 그림2는 3개의 상시 개방 스위치를 가지는 간단한 배전계통을 보여준다.

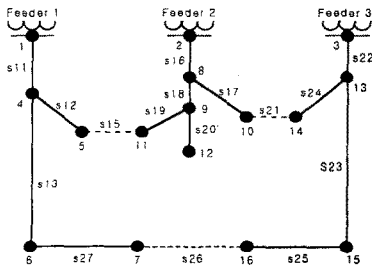


그림 2. Three feeder 계통 모델

그림2에서 초기적으로 개방한 스위치 s15, s21, s26에 의해 계통이 방사상 형태로 유지되는 것을 알 수 있다.

이 점을 감안한다면, 계통이 방사상 구조를 이루기 위해서는 단지 개방 스위치의 위치를 결정하는 것으로 충분하고 염색체는 이 개방 스위치에 의해 구성되며 염색체의 길이는 개방 스위치의 개수에 관계하는 것을 알 수 있다. 그림2를 위한 염색체의 구성을 예로서 나타내면 그림3과 같다.

01111	10101	11010
Switch 15	Switch 21	Switch 26

그림 3. 그림1의 염색체 표현

초기 염색체의 구성은 Whei-Min Lin[7]등이 제안한 알고리즘을 사용하여 결정하였다. 이 알고리즘은 계통내의 모든 연계 개폐기를 닫은 상태에서 여러 개의 망을 구성한 후, 각 망내에서 손실을 최소화 할 수 있는 근사 최적 연계 개폐기를 결정하는 것이다. 여기에서는 모두 3가지의 Index(지표)를 사용하는데, 전압강하지표(voltage index: $\mu_{\tilde{V}}$)와 파라미터 지표(ohmic index: $\mu_{\tilde{L}}$) 그리고 이 두 지표에 의해 계산되어지는 결정지표(decision index: $\mu_{\tilde{D}}$)가 그것이며 이 지표들은 node 전압과 선로정수에 의해 계산되어진다.

- 전압강하지표($\mu_{\tilde{V}}$)

$$\mu_{\tilde{V}}(n) = \exp \left(-\frac{\alpha(\Delta V_n)^2}{(\Delta V^2 \omega)} \right) \quad (5)$$

- 파라미터 지표($\mu_{\tilde{L}}$)

$$\mu_{\tilde{L}}(n) = \exp \left(-\alpha \left(\frac{R_n Y_n^2}{R_{av} Y_{av}^2} \right) \right) \quad (6)$$

- 결정지표($\mu_{\tilde{D}}$)

$$\mu_{\tilde{D}}(n) = \mu_{\tilde{V}}(n) \times \mu_{\tilde{L}}(n) \quad (7)$$

여기서,

ΔV_n : n번째 가지에서의 전압강하

ΔV_{av}^2 : 루프내 모든 가지 전압강하의 산술적 평균

R_{av} : 루프내 가지의 평균저항

Y_{av} : 루프내 가지의 평균 어드미턴스

ω : 연계개폐기와의 상대적 거리값

이와 같은 방법으로 모든 가지에서의 지표를 계산하여 각 망내에서 최대의 $\mu_{\tilde{D}}$ 값을 가지는 가지를 GA의 초기 세대의 값으로 결정한다.

3.2 적합도 함수의 구성

유전 알고리즘은 근본적으로 주어진 공간 내에서 제약 없는 탐색과정을 수행하며 이 탐색과정이 진행되는 동안에는 단지 적합도 함수의 값만이 유용한 정보로서 작용을 한다. 따라서 정확한 적합도 함수를 구성하는 것은 매우 중요한 것이다. 본 논문에서는 적합도 함수를 손실 최소화 개념의 목적함수와 제약 조건을 수반하는 벌점함수(penalty function)를 조합하여 구성하였으며, 적합도 함수는 항상 최대화 문제 형태로 기술되어야 하고 음의 값을 가져서는 안 되는 유전 알고리즘 특성상 목적함수를 적절히 사상(mapping)하여 다음과 같은 최대화 문제로 기술하였다.

$$\text{Max} : f = \frac{1}{L} \quad (8)$$

$$L = P_{loss} \cdot k_i + \beta_1 \max\{0, (|I_i| - I_i^{max})^2\} + \beta_2 \max\{0, (V_i^{min} - V_i)^2\} \quad (9)$$

여기서 $\beta_i (i=1, 2) =$ 상수이며, k_i 는 각 브랜치의 현 상태를 의미한다[8].

3.3 재생산, 교배, 돌연변이

본 논문에서는 재생산에 사용되는 알고리즘 중 가장 많이 사용되고 있는 룰렛 휠 선택(roulette wheel selection)을 사용하였으며, 각각의 염색체는 염색체의 총 적합도 값에 대한 자신의 적합도 값을 평가하여 그에 상응하는 영역을 룰렛 휠 상에서 차지한다. 즉, 자신의 적합도에 따른 선택적 확률(선택도)이 결정되는 것이며 이 선택도는 (10)식에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{선택도} = P_s(s_i(k)) &= \frac{s_i(k) \text{의 적합도}}{\text{개체들의 적합도합}} \\ &= \frac{f_i(k)}{f_{sum}(k)} \quad (1 \leq i \leq n) \end{aligned} \quad (10)$$

교배는 급원으로부터 임의의 쌍을 취하여 임의의 쌍을 선택하여 새로운 쌍의 염색체를 생산하며, 염색체 각각은 부모 스트링의 부분으로부터 만들어진다. 이러한 모의 진화가 계속되는 동안 재생산과 교배 연산자는 집단을 더욱 강하게 해주고 이로 인하여 염색체들은 서로 닮아가게 된다. 이러한 현상은 세대 말기에는 바람직 하지만 세대초기에 발생하게 되면 염색체의 다양성 결핍으로 준 최적해(suboptimal solution)나 사점(dead corner)에 빠지게 되는 요인이 된다. 이러한 원치 않는 해로부터 벗어나기 위한 메커니즘이 돌연변이 이다[10]. 계통 재구성 문제에 적용되는 돌연변이는 그 확률을 낮게 설정한다면 조기 수렴적인 결과만을 낳게 되므로 본 논문에서는 현 세대의 돌연변이 확률($p(k)$)에 대한 다음 세대의 돌연변이 확률($p(k+1)$)을 수정하여 (11)식과 같은 방법으로 적용하였다.

$$p(k+1) = \begin{cases} p(k) - p_{step} & \text{if } f_{min}(k) \text{ unchanged} \\ p(k) & \text{if } f_{min}(k) \text{ decreased} \\ p_{final} & \text{if } p(k) - p_{step} < p_{final} \end{cases} \quad (11)$$

여기서 초기의 설정값 $p(0) = p_{init} = 1.0$ 로서 진화를 시작하며 p_{step} 은 0.002, 어느 정도 진화를 거듭하여 다다르는 최소의 돌연변이 확률인 p_{final} 은 0.05로서 제한을 두었다. 이는 앞서도 언급했듯이 재생산과 교배로 인해 발생할 수 있는 부적절한 해로부터 벗어나기 위함이다.

4. 사례연구

그림 4는 32모선 계통도로서 32개의 모선을 방사상으로 구성하기 위하여 개방된 5개의 연계 개폐기를 접선으로 표시하였고 닫힌 32개의 구분 개폐기를 실선으로

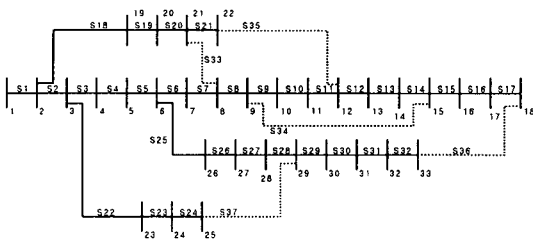


그림 4. 32모선 모의 배전계통

로 표시하였다. 이 계통의 급전 전압은 12.66 [KV], 전체부하는 5084.26[KW], 2547.32[KVar], 그리고 초기 손실은 199.619[KW]이다. 모의 시험 결과 계통의 전체 손실은 기존의 방법에 비하여 향상되지는 않았지만 알고리즘의 초기세대를 근사적인 값으로 시작하여, 적은 세대수로도 결과를 얻을 수 있었으며 준 최적해에 빠질 수 있는 가능성을 배제하였다.

5. 결론

본 논문에서는 전역탐색 기법인 유전알고리즘을 응용하여 배전계통의 손실최소화를 위한 계통 재구성 문제에 적용하였다. 이 알고리즘은 염색체의 표현과 적합도 함수, 돌연변이의 몇몇 부분을 개선하고 초기 스트링의 구성 시 근사적인 최적 개폐기를 미리 결정함으로써 계산 시간을 단축하고 초기 수렴의 단점을 피하도록 하였으며 계통의 손실 최소화에도 충분히 적용 가능한 것으로 보인다. 또한 제한한 알고리즘은 전력계통의 계획과 운영면에 있어서의 많은 문제에 한층 더 진보된 방법으로 적용할 수 있는 매우 높은 가능성을 지니고 있으며, 제안한 방법에서 재생산 과정에서의 엘리티즘을 적용하여 유전알고리즘의 확률적 속성 때문에 발생하는 최적자(the fittest)가 누락하는 현상을 방지하고, 교배와 돌연변이 연산이 관계하는 제어 파라미터를 도입하여 계통에의 적용에 알맞은 형태로 발전을 시키고 또한, 적합도 함수를 보다 더 알맞게 개선하고 다른 인공지능(AI) 알고리즘의 장점을 접목시킨다면 후에 실 계통에도 충분히 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh, M. Kanazashi, "An efficient algorithm for load balancing of transformers and feeders", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, 1988, pp. 1865-1872, October 1988.
- [2] D. Shirmohammadi, H.Y. Hong, "Reconfiguration of electrical distribution networks for resistive line losses reduction", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-4, 1989, pp. 1492-1498, May 1988.
- [3] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-4, 1989, pp. 1401-1407, April 1989.
- [4] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for losses reduction", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-3, 1988, pp.1217-1223, July 1988.
- [5] S. K. Goswami, S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1484-1491, July 1992.
- [6] Nara, K., Shiose, A., Kitagawa, M., and Ishihara, T., "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration", IEEE Trans. Power Systems, Vol.7, No.3, 1992, pp1044-1051
- [7] Whei-Min Lin, Hong-Chan Chin, "A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, pp. 870-875 July 1998.
- [8] 전영재, 김재철 "배전 계통의 손실 최소화를 위한 시뮬레이션 어닐링과 타부 탐색의 적용" 대한 전기학회논문지, 제 50A권 1호, pp. 28 -37, 2001, 1.
- [9] Jizhong Zhu, C. S. Chang, "Refined Genetic Algorithm for Minimum-Loss Reconfiguration of Electrical Distribution Network", Energy Management and Power Delivery, 1998, Page(s): 485 -489 vol.2
- [10] 진강규 저 "유전알고리즘과 그 응용" 교우사 발행