

Coordinated Control of the Reactive Power Compensator Using a Genetic Algorithm

李 松 根*
(Song-Keun Lee)

Abstract - A loop power system has a nonlinear characteristics. Also it is very hard to analyse through a equation if a discontinuous characteristic of the ULTC is added to a system. However, the problem which is hard to analyse by equations can acquire the useful result with what use the genetic algorithm (GA) which is a multi-point search program. In this paper, we proved through a simulation that the proposed method can reduce an operation frequency of tap changers and improving the quality of voltage of the buses by decreasing the deviation between the actual voltage and the reference voltage through the coordinated control of the ULTC that use GA in the loop power system.

Key Words : ULTC, Coordinated Control, Reactive power compensator, Genetic Algorithm

1. 서 론

급속한 산업의 발전과 생활 수준 향상에 힘입어 전력 수요가 크게 증가하고 있다. 또한 전기 응용기기, 컴퓨터설비, 가정용 전기, 전자 제품 등이 널리 보급되어 일상 생활에서 전기 의존도가 점점 높아져서 양질의 전력을 수용자에게 공급할 필요성이 갈수록 증대하고 있다.

전력 계통은 원거리의 발전기와 수많은 수용가를 연결시키기 위하여 각종 송전선로와 배전선로로 구성되어 있으며 또한, 여러 가지 송배전 전압 계급으로 이루어진다. 그리고, 어떤 곳에서도 전압의 변경이 필요한 곳이면 변압기가 설치되어야 한다.

변압기에는 시시각각 변동하는 전압을 제어하기 위하여 변압기의 비율을 제어할 수 있는 탭이 구비되어 있다. 부하시 탭절환기(ULTC)는 동작속도가 느리고, 불연속적인 계단식 제어시스템이다. 탭동작시 전압변동이 발생하고 전기적인 과도현상으로 기계적인 접점이 마모된다. 그러므로 과도한 탭 동작은 기기의 수명을 단축시킬 뿐 아니라 변압기의 고장을 유발하여 광역정전을 야기할 수 있다. 따라서, 전압 품질을 만족하는 범위 안에서 탭의 동작 횟수를 최소한으로 하는 것이 ULTC의 제어 목표라고 할 수 있다. 특정한 조건에서 ULTC는 역동작을 일으켜 전압붕괴를 촉진시킬 수 있으므로 ULTC는 적절히 제어되어야 한다.

Calvic[1]은 부하시 탭 절환기 변압기에 의해 제어되는 동적인 전압 모델을 구하였고 Medanic[2]은 Calvic의 모델을 이용하여 계통의 안정성을 연구하였다. Yorino[4]는 Medanic[2]에서 이용한 리아푸노프 정리를 사용하여 상호간섭 현상을 피할 수 있는 불감대의 영역을 구하였다. 김홍균

[4]은 루프 계통에서의 부하시 탭 절환기간의 상호 동작 협조 부족에 의하여 발생하는 진동 현상을 계통내의 탭 절환기들이 동시에 동작하는 것은 무시하고 상위측과 하위측이 동작될 때에 대하여만 해석하였다.

루프 전력 계통은 비선형 특성을 가진다. 그리고 ULTC의 이산적인 특성이 계통에 더해지게 되면 수식을 통하여 계통을 해석하는 것은 매우 어려운 일이다.

수식적으로 해석하기 어려운 문제는 다중 점 탐색 프로그램 중의 하나인 유전자 알고리즘(GA)를 활용함으로써 유용한 결과를 얻을 수 있다.

이 논문에서는 루프 계통에서 GA를 이용한 ULTC들의 협조 제어를 통하여 계통의 전압품질을 만족하는 범위 안에서 탭의 동작 횟수를 줄일 수 있음을 모의 실험을 통하여 입증하였다.

2. 유전자 알고리즘(GA)

유전자 알고리즘(GA)은 다윈의 진화론과 유전 이론에 근거하고 다중 점 탐색 기법을 사용하여 세대를 거치면서 목적 함수를 만족하는 최적해로 수렴해가는 알고리즘이다. 기존의 최적화 알고리즘은 함수의 연속성, 미분 가능성, 선형성 등이 보장되지 않을 경우 함수를 최적화하는데 많은 어려움을 겪었으나 GA는 점 탐색 알고리즘이어서 함수의 연속성, 미분 가능성, 선형성 등이 보장되지 않아도 함수를 최적화하는 것이 가능하다. 본 논문에서 사용한 GA는 돌연변이, 교차에서 한 점 교차, 복제에서는 엘리트와 블렛 방법을 병행하여 사용하였다.

3. ULTC 제어특성 및 모델[1,4,5]

일반적인 ULTC 변압기는 탭절환 장치를 가진 변압기, 모터구동요소, 선로전압강하 보상기를 포함하는 자동 전압조정기, 측정용 전압·전류 변성기(CT, PT)로 구성된다. 탭

* 正 會 員 : 全州大學 工學部 助教授 · 工博

接受日字 : 2002년 8월 29일

最終完了 : 2002년 11월 21일

절환 장치와 모터 구동장치는 한 스텝씩 동작하는 구조이고 동작시간은 10초이내이다. 자동전압 조정기의 입력요소는 불감대와 지연시간으로 구성된다. 각 요소는 조정이 가능한데 불감대의 조정점위는 0.6~6%이고, 지연시간의 조정범위는 10~180초인데 이것은 순시 전압 변동에 의한 빈번한 탭 절환을 방지하기 위한 목적으로 사용된다. 선로 전압 강하 보상은 부하 변동에 따른 기준 전압을 보상하기 위하여 사용된다. 측정용 변압기(PT)와 변류기(CT)는 고전압, 대전류를 저전압, 소전류로 바꾸어 준다. ULTC변압기의 동작원리는 그림 1과 같이 전압 편차가 불감대 경계값보다 크면 카운터가 작동하기 시작한다. 지연시간 이내에 전압편차가 불감대 경계값보다 작아지면 카운터를 영으로 복원하고 지연시간 이상 전압 편차가 경계값 이상으로 지속되면 탭은 동작하고 카운터는 다시 영으로 하여 다음 동작을 준비한다.

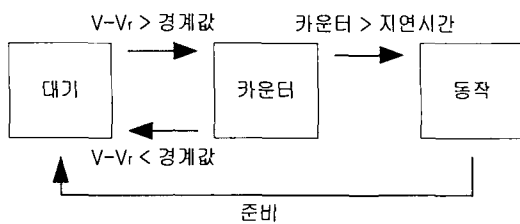


그림 1 ULTC의 동작 상태
Fig. 1 State of the ULTC operation

4. 제안한 시스템

루프 전력 계통의 비선형성에 탭 절환기의 불연속성을 포함하게 되는 복잡한 문제를 수식적으로 해석하기는 매우 어렵다. 이러한 문제를 다중 점 탐색 프로그램인 GA를 이용하여 루프 계통 변압기들의 협조 제어 문제를 풀었다. 제안한 시스템의 순서도는 그림 2와 3과 같다.

GA에서 적합도는(Fitness) 식(1)과 같이 하였다.

$$Fitness = K_1 \times \sum (|V_{reference}| - |V_{calculated}|)^2 + K_2 \times N \quad (1)$$

여기서 N은 한 스텝에서 움직인 탭절환기의 수

K_1, K_2 는 상수계수

$V_{reference}$ 는 기준 전압

$V_{calculated}$ 는 계산된 전압

K_1, K_2 는 상수 계수로 원하는 목적에 맞도록 선택을 하면 된다. 이 논문에서는 $K_1=1$ 그리고 $K_2=0.06$ 으로 하였다. 이 수치는 경험적인 값으로 주어진 계통이 수렴을 하였을 때 전압편차의 합이 평균적으로 0.06의 값을 가져서 이 값을 K_2 의 값으로 선정을 하였다.

Fitness의 목적은 계통의 전압을 기준 전압에 근접하게 하는 것과 탭 절환기들의 동작횟수를 줄이는 것이다.

선택의 과정은 엘리트 방법과 룰렛방법을 병행하여 행하였고 교차는 한점 교차로 하였다.

수렴 판단은 Fitness의 변화가 0.001보다 적은 것이 3회 이상 반복된 경우로 하였다.

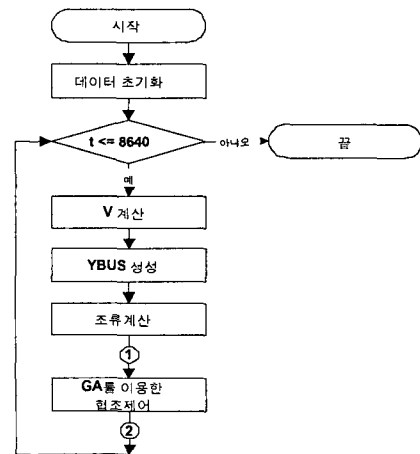


그림 2 제안한 시스템
Fig. 2 Proposed System

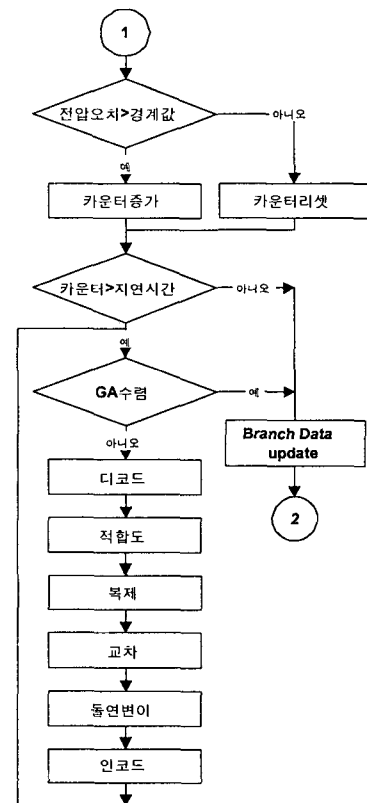


그림 3 GA부분 순서도
Fig. 3 Flowchart of the GA part

5. 사례 연구

제안한 시스템의 유용성을 보이기 위하여 Anderson[6]의 9모선 계통을 이용하였다. 9모선 계통에는 탭 절환기가 3기가 설치되어 있는 것을 그림 4와 같이 6번과 8번 모선에 배전용 탭 절환기 2기를 추가 설치하였다.

본 모의 실험의 목적은 5기의 탭 절환기를 제어하여 계통의 전압의 품질을 향상 시키면서 탭절환기의 동작횟수를 줄이는데 있다.

모의 실험에서 모든 변압기들은 0.9~1.1p.u.까지 동작을 하며, 탭 스텝은 32단계로 각 스텝의 크기는 0.00625p.u.을 갖는다.

GA에서 사용한 집단의 수는 50이고 각각의 개체는 0에서 31까지를 갖는 정수로하였다. 이는, 탭 절환기는 스텝수와 같이 모델링 하였다.

모선 10과 11의 부하 전력량은 그림5. 와 같다. 비교 분석을 위하여 3가지의 실험을 하였다.

- ① 변압기들을 움직이지 않은 경우,
- ② 변압기를 3절의 방법(현 계통에서 사용되고 있는 방법)으로 작동한 경우와
- ③ 제한한 시스템으로 GA를 이용하여 제어한 경우에 대하여 알아보았다.

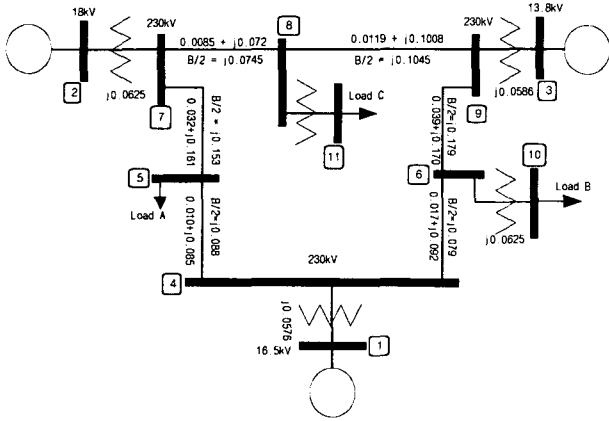


그림 4 3기 11모선 계통도
Fig. 4 3Generator 11 Buses System

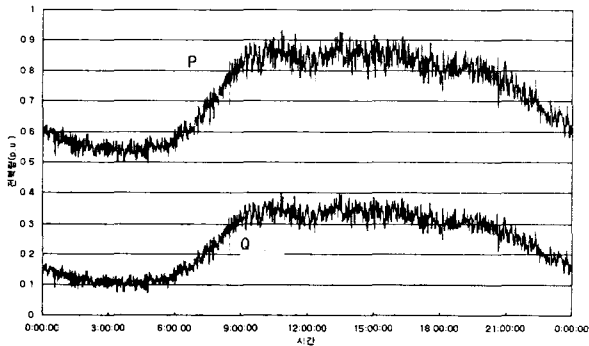


그림 5 모선10과 11의 유효 무효 부하 전력량
Fig. 5 Real and Reactive power of the Bus10 and 11

표기를 편하게 하기 위하여 그림 4의 변압기들에 다음과 같이 번호를 매겼다.

변압기1 : 모선1과 모선4사이

변압기2 : 모선2과 모선7사이

변압기3 : 모선3과 모선9사이

변압기4 : 모선6과 모선10사이

변압기5 : 모선8과 모선11사이

시뮬레이션의 결과는 다음과 같다.

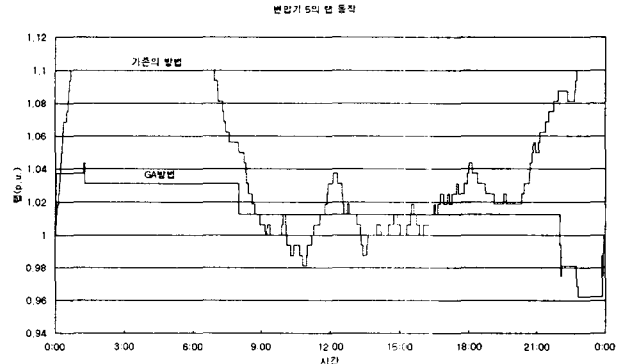


그림 6 변압기5의 동작도
Fig. 6 Operation diagram of the Transformer 5

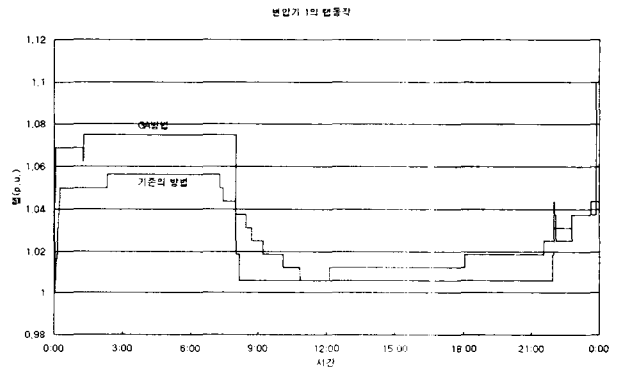


그림 7 변압기 1의 동작도
Fig. 7 Operation diagram of the Transformer 1

그림 7에서 보면 기존의 방법보다 GA방법의 탭이 더 많이 보상한 것을 볼 수 있다. 이와 같이 GA방법에서는 계통 전체의 상황을 판단하여 변압기들이 동작함으로써 하위 변압기들의 탭 동작횟수를 줄이는데 큰 몫을 함을 알 수 있다. 이렇게 함으로써 계통 전체에 대하여 전체적인 탭의 동작횟수를 줄일 수 있음을 보여준다.

그림8은 11번 모선의 전압을 제어되지 않았을 때, 변압기가 기존의 방법으로 동작되었을 때 그리고 변압기들이 GA를 통하여 협조제어되었을 경우에 대하여 나타내고 있다. 11번 모선의 기준 전압은 1.0p.u이다. 그림에서 보듯이 GA를 이용하여 제어하였을 경우 원하는 기준에 가장 잘 제어된 것을 볼 수 있다.

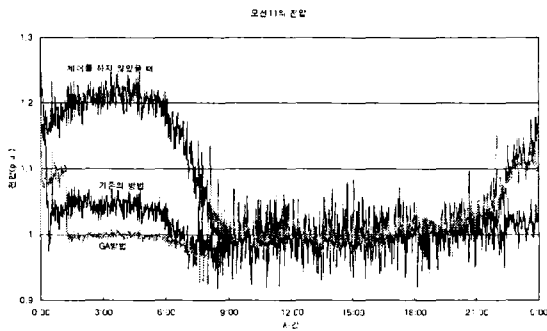


그림 8 모선11의 전압
Fig. 8 Voltage of the Bus 11

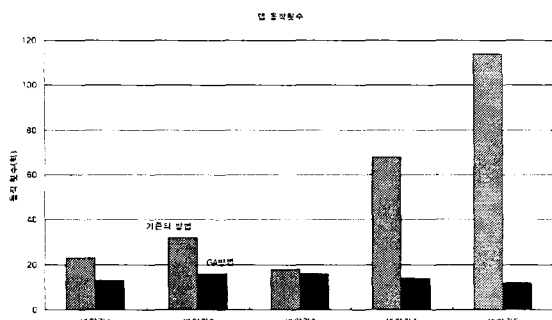


그림 9 변압기들의 탭동작횟수
Fig. 9 Operation frequency of Tap changers

탭 동작횟수를 살펴보면 변압기들이 기존의 방법으로 계통을 제어하였을 경우보다 GA를 이용하여 제어한 것이 더 효율적인 것을 볼 수 있다.

그림9에서와 같이 4번과 5번 변압기가 과도하게 동작되는 원인은 모의실험의 효과를 극대화하기 위하여 부하 전력량을 조절하여서 생긴 결과이다.

기존의 방법은 변압기 양단의 정보만으로 동작되기 때문에 모선 10과 모선11의 전압이 기준전압에서 많이 벗어났을 경우에는 이를 제어하기 위하여 과도하게 탭이 동작을 하는 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

변압기들은 지역적인 정보만으로 동작되고 있다. 그리고, 하위 변압기의 동작은 상위 변압기의 동작에 거의 영향을 미치지 못한다. 그러나 역으로 상위 변압기의 동작은 하위 변압기들에 많은 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 그러므로 상위 변압기와 하위 변압기들을 적절히 협조제어를 할 경우 전체 계통 변압기들의 탭 동작횟수를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이러한 사실을 바탕으로 계통을 수식적으로 해석을 하여야 하나 계통의 비선형성, ULTC의 이산성등이 수식적으로 해석하는 것을 매우 어렵다.

GA는 수식적으로 해석이 불가능한 문제의 최적화를 하는데 상당히 효율적이라는 것을 이 실험을 통하여 증명하였다.

이 논문에서의 결과로 지역적으로만 영향을 미치는 것으로 알았던 변압기들을 적절히 제어하였을 경우 계통의 전압을 기준 전압에 유지하면서도 계통 전체 탭 변압기의 동작 횟수를 줄일 수 있음을 모의 실험을 통하여 증명하였다.

본 논문에서는 GA를 이용하여 해석적인 방법이 아닌 다중 점 탐색 방법이어서 해석적으로 설명하는데는 어려움이 있다. 후속의 연구로는 위의 결과를 바탕으로 해석적인 연구를 시행하여야 한다고 본다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(과제관리번호 00-038) 주관에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M.S. Calovic, "Modeling and analysis of under - load tap changing transformer control system" IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, Vol. Pas-103, No. 7, July 1984, pp. 1909-1915.
- [2] M. Larsson and D. Karlsson, "Coordinated control of cascaded tap changers in a radial distribution network," Proc. of IEEE/KTH Stockholm Power Tech. Conf., Sweden, June 1995, pp. 686-691.
- [3] N. Yorino, M.Danyoshi and M. Kitagawa, "Interaction among multiple controls in tap change under load transformers," Proc. of IEEE/PES winter meeting, Jan. 1996, 96 WM 310-3 PWRs.
- [4] 김홍균, "다중 부하시 탭 절환기의 협조 제어," 서울대학교 대학원 석사학위논문, 1997.
- [5] 문경섭, "전압안정도를 고려한 SVC와 ULTC의 협조제어," 서울대학교 대학원 석사학위논문, 1998
- [6] Paul M. Anderson, "Power System Control and Stability", IEEE Pres, 1977