

유전자 알고리즘을 이용한 Multi-HVAC 시스템에 대한 Multi-Fuzzy 제어기 설계

Design of Multi-Fuzzy Controller Using Genetic Algorithms for Multi-HVAC System

정승현*, 최정내**, 오성권***
(Seung-Hyun Jung, Jeoung-Nae Choi, Sung-Kwun Oh)

Abstract- 본 논문은 HVAC(heating, ventilating, and air conditioning) 시스템의 효율성과 안정성에 기초하여, 과열도와 저압을 제어하는 Multi Fuzzy 제어기 설계를 제안한다. HVAC 시스템은 Compressor(압축기), Condenser(응축기), Evaporator(증발기), Expansion Valve(확장 밸브) 로 구성되며, 각각의 기기에 대한 제어가 독립적으로 이루어져 있다. 기존의 제어가 한 제어기를 사용한 단일방식으로 이루어지다보니 HVAC 시스템의 특성인 냉매의 상태가 달라지면 시스템 전반적으로 그 영향이 과급되는 부분까지 고려를 해 주지 못하고, 제어기의 성능이 효율적이고 안정적이지 못했다. 본 논문에서는 HVAC 시스템의 효율과 안정도에 결정적인 영향을 미치는 과열도와 저압을 제어하기 위해, 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어할 수 있는 Fuzzy 제어기를 구성하여, 3대의 Expansion Valve 와 1대의 Compressor 에서 동시에 제어하는 Multi 제어기를 설계한다. 제안된 Fuzzy 제어기는 이산형 lookup_table 방식과 연속형 간략추론 방식을 사용하여 제어기를 설계하고, 유전자 알고리즘(GAs)을 이용하여 최적의 Fuzzy 제어기의 확산계수를 구한다. 그리고 시뮬레이션 결과를 통해 이산형 lookup_table 방식과 연속형 간략추론 방식의 각각의 제어기를 사용한 결과를 비교한다.

Key Words : HVAC(heating, ventilating, and air conditioning), Genetic Algorithms(GAs), Multi-Fuzzy Controller

1. 서론

HVAC(heating, ventilating, and air conditioning) 시스템은 냉·난방 및 공기 조화를 통해 사용자가 원하는 온도 및 상태를 만들어 주는 시스템의 총칭이다. 최근 생활수준의 향상으로 인해 주거 환경에 대한 쾌적성의 요구가 높아짐에 따라 HVAC 시스템[1]의 사용이 필수화 되어지고 있으며 더 나아가 1가구 1대에서 1실 1대로 되어가고 있는 실정이다. 하지만 한 가구에 여러 대의 에어컨을 설치하는 경우 초기 비용이 많이 들 뿐만 아니라, 특히 도시지역의 경우 많은 실외기를 설치할 공간상의 문제와 운전 시 소비전력 증대 등의 문제들이 발생할 수 있다. 이러한 배경에 의해서 에너지 효율, 설치공간의 절약, 미관성, 공사비의 절감 등등 냉방능력에 대해 실외기 1대에 여러 대의 실내기를 사용한 Multi HVAC 시스템이 개발되어지고 있고, 많은 연구가 이루어지고 있다. 이에 따라 HVAC 시스템이 급속하게 발전하고 있고 또한 근래에 인버터 기술의 발전에 따라서 Multi HVAC 시스템에 사용되는 압축기의 구동에 인버터를 적용한 제품이 선진국을 중심으로 널리 사용되고 있다. 부하변동에 따라 압축기의 용량을 가변 제어하는 인버터의 도입은 ON/OFF 제어만으로 작동되던 기존의 압축기를 넓은 영역에서 가 변속 운전을 할 수 있도록 함으로써, 에너지 효율 및 제어 성능의 향상을 가져다준다. 그러나 가변요소가 다양하고 이들 사이에 많은 의존성이 존재하는 HVAC 시스템에 인버터형의 압축기를 사용하므로 사용자의 요구에 만족시키는 제어 로직의 결정이 더

욱 어려워졌다. 또한 시스템의 복잡성 및 비선형성으로 인한 시스템의 수학적 분석이 매우 복잡할 뿐 아니라 제어기의 설계에도 많은 어려움이 있어, 기존의 연구는 제어기 설계보다는 냉매에 대한 연구와 기계적인 개발에 치중되어 왔었다. 그러나 시스템이 더욱 복잡해짐에 따라 최적의 환경과 더불어 에너지 절감, 수명 연장 등의 부가적인 효과를 위해 효율적인 제어기의 설계에 많은 관심을 기울이고 있다.

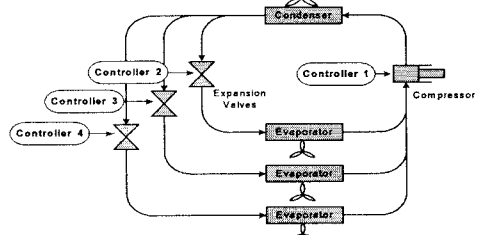


그림 1. Multi HVAC system 구성도

이에 본 논문에서는 Multi HVAC 시스템에 대해 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어할 수 있는 Fuzzy PI 제어기[2]를 설계한다. 그리고 HVAC 시스템은 어느 한 부분에서 냉매의 상태가 달라지면 시스템 전반적으로 영향을 미치기 때문에 그림 1에서 보듯이 3대의 Expansion Valve 와 1대의 Compressor 에서 동시에 제어를 하는 Multi Controller 를 설계한다. 그리고 Fuzzy 추론방법 중 Mandani 방법을 이용한 이산형 lookup_table 방식과 연속형 간략추론 방식을 사용하여 제어기의 출력을 추론하고 병

* 準 會 員 : 水原大學校 電氣工學科 碩士課程
** 正 會 員 : 水原大學校 電氣工學科
*** 正 會 員 : 水原大學校 電氣工學科 教授

렬렬색 알고리즘인 유전자 알고리즘(GAs)을 이용하여, 각 방식에 따른 Fuzzy 제어기의 최적의 환산계수들을 구한다. 마지막으로 구한 환산계수들을 적용하여 시뮬레이션 결과를 비교한다.

2. HVAC(heating, ventilating, and air conditioning)

HVAC 시스템은 냉매의 상태변화를 통한 열의 흡수 및 방출을 통하여, 실내의 온도를 사용자가 원하는 온도로 맞추주는 시스템으로 Compressor, Condenser, Evaporator, Expansion Valve 로 구성되며, 냉매가 각 장치를 통과하면서 Compressor 에서 압력조절, Condenser 에서 액화, Expansion Valve 에서는 유량조절, Evaporator 에서는 기화를 통하여 주위의 온도가 변화된다. 이러한 HVAC 시스템의 장치들은 비선형성이 매우 강한 MIMO(Multi Input Multi Output) 시스템이며 각각의 입출력 상태에 따라 설정치를 조정해주어야 하는 제어기의 연동이 매우 중요시 된다.

그림 2는 모리엘 선도 상에 HVAC 시스템의 사이클을 p-h 선도 상에 표시해 놓은 것이다. 그림에서 사다리꼴 모양이 HVAC 시스템의 사이클이고, 포물선은 냉매의 포화곡선이다. 이때 포화곡선과 Evaporator 의 출구온도 차이가 과열도이고, Evaporator 의 내부 압력이 저압이다.



그림 2. HVAC 순환 사이클 및 모리엘 선도(p-h선도)

과열도, 저압에 대해 자세히 기술하자면 액체 상태의 냉매가 Compressor 로 들어가면 압축기의 고장을 유발하고 압축 효율을 저하시키므로, 이를 방지하기 위하여 Evaporator 를 통과한 냉매가 Compressor 로 가는 과정에서 온도를 올려주어 완전한 기체 상태로 만들어 준다. 이때 올려주는 온도를 과열도(SH)라고 한다. 저압(LP)은 Compressor 에서 냉매의 유량을 조절하는 과정에서 생기는 압력 변화를 의미하는데 HVAC 시스템은 어떤 부분에서 냉매의 상태가 바뀌면 그 영향이 과급되기에 저압도 제어해야 한다. 이에 본 논문에서 제어 목표는 주위 온도보다는 시스템의 안정도에 많은 영향을 주는 과열도, 저압의 제어에 중점을 두었다. 과열도는 Expansion Valve 에서 개도 변화를 통해 제어를 하고, 저압은 Compressor 의 용량을 가변 제어하는 인버터의 주파수 변화를 통해 제어한다.

3. Fuzzy 제어기 설계

퍼지 제어기는 인간의 지식과 경험을 이용한 지적 제어 방식으로 IF-THEN 형식의 규칙으로부터 제어입력을 결정하는 병렬적 제어이다. 이는 과도상태에서 큰 오버슈트 없이 설정치에 도달하게 하는 속응성과 강인성이 좋은 제어 기법으로 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어할 수 있는 장점을 가진다.

그림 3은 퍼지 PI 제어기의 기본 구성도를 나타낸 것이다. 여기서 e는 설정치와 공정 출력의 오차, Δe는 오차의 변화분, GE 및 GD 는 표준화된 퍼지 값으로 표현하는 수치들의 의미하는 오차변화의 퍼지 환산계수이고 GC는 퍼지 추론 규칙의 출력을 공정의 차원과 일치시키는 제어 출력의 퍼지 환산계수이다.

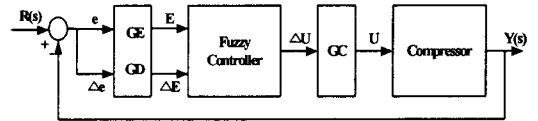


그림 3. Fuzzy 제어기

퍼지 제어의 알고리즘은 일반적으로 식 (1)의 형태를 취하는 N개의 독립적인 제어 규칙들로 구성된다.

$$R^i: \text{IF } E \text{ is } A_i \text{ and } \Delta E \text{ is } B_i, \text{ THEN } \Delta U \text{ is } C_i \quad (1)$$

R^i : i번째 제어규칙($i=1,2,\dots,N$), E : 오차값, ΔE : 오차의 변화분

ΔU : 제어출력의 변화값, A_i, B_i : 퍼지 변수, C_i : 퍼지 변수 또는 실수

본 논문에서는 Fuzzy 추론방법 중 특정입력에 대하여 출력 값을 미리 계산하여 테이블로 작성하는 Mandani 방법을 이용한 이산형 lookup_table 방식과 실시간으로 오차와 오차의 변화율에 대하여 추론하는 연속형 간략추론 방식, 이 두 가지 방식으로 각각의 Fuzzy 제어기를 설계하고 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 두 방법의 차이점은 연산방법도 틀리지만, 후반부 멤버십 함수가 Mandani 방법을 이용한 이산형 lookup_table 방식은 퍼지 변수이고 연속형 간략추론 방식은 실수라는 점이 가장 큰 차이점이다.

$$w_i = \min | \mu_{A_i}(E_i), \mu_{B_i}(\Delta E_i) | \quad (2)$$

$$\Delta U = \sum_{i=1}^n w_i \times C_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (3)$$

$$w_i = u_{A_i}(E_i) \wedge u_{B_i}(\Delta E_i) \quad (4)$$

$$u_{C_i}(z) = w_i \times u_{C_i}(z), \forall z \in C \quad (5)$$

$$\Delta U = \sum_{i=1}^n w_i \times u_{C_i} / \sum_{i=1}^n w_i \quad (6)$$

식 (2) ~ (3)은 Mandani 방법을 이용한 이산형 lookup_table 방식의 추론식이고, 식 (4) ~ (6)은 연속형 간략추론 방식의 추론식을 나타낸다.

4. 유전자 알고리즘(GAs)

유전자 알고리즘은 자연 세계의 진화과정(유전자적 특성, 적자생존)을 이용한 병렬탐색 알고리즘으로 기존의 최적화 방법들과 달리 선형, 연속, 미분가능 등의 제한이 없기 때문에 다양한 분야에 별다른 제한 없이 적용될 수 있다는 장점을 가진다. 자연계의 모든 생물은 유전자인 염색체에 의하여 생식과 유전 등 진화과정을 반복·발전해 가는데, 유전 알고리즘은 생물학적 염색체에 해당하는 스트링(String)을 가지고 생물과 같은 유전 연산자인 재생산(Reproduction), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation)를 거쳐서 다음 세대의 자손(Offspring)을 인공적으로 만들어 낸다. 탐색 및 최적화 기법

으로 사용되는 유전자 알고리즘은 파라미터 자체가 아닌 파라미터 집합을 코딩(Coding)하고, 탐색공간에서 단일해가 아닌 해집합(Schema)을 사용한다. 그리고 확률적인 규칙을 사용하기 때문에 최적화 문제에서 견실한 전역적 최적해를 구할 수 있다. 또한 미분가능성, 연속성 등과 같은 최적화 함수의 정보를 필요로 하지 않고 단지 목적함수(Fitness function)값만을 사용한다.

$$IAE = \int |E(t)| dt \quad (7)$$

이에 본 연구에서는 최적화 퍼지 제어를 설계하기 위해 목적함수를 식 (7)과 같은 IAE(Integral of the Absolute magnitude of the Error)를 사용하여 적합도를 구하였고, 제어기의 파라미터인 GE, GD, GC 환산계수를 튜닝 하였다.

5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서는 Fuzzy 추론방법 중 Mandani 방법을 이용한 이산형 lookup_table 방식과 연속형 간략추론 방식, 이 두 가지 방식으로 각각의 Fuzzy 제어를 설계하고 유전자 알고리즘을 이용하여 각각의 제어기 환산계수들을 튜닝하여 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

초기값으로는 Expansion Valve 개도를 500, Compressor 의 Hz를 70으로 주었고, 시뮬레이션 시간은 1800sec으로 하였다. 초기 목표치를 각 실내기 과열도는 5°C, 10°C, 15°C 로 설정하고, 저압은 641KPa로 설정하여 시뮬레이션 하였다. 실수코딩을 사용한 유전자의 population은 50 개체, 100 세대까지 연산하였고, 교배율은 0.65, 돌연변이율은 0.1을 주었다. 그리고 Roulette wheel 방식으로 선택 되어지고, 교배는 일점 교배를 하였으며, 돌연변이 연산은 dynamic 방식을 사용하고, Elitism 전략을 사용하여 우수한 개체들을 보존하였다.

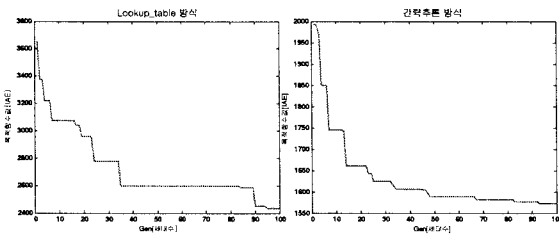


그림 5. lookup_table 방식과 간략추론 방식의 목적함수 값

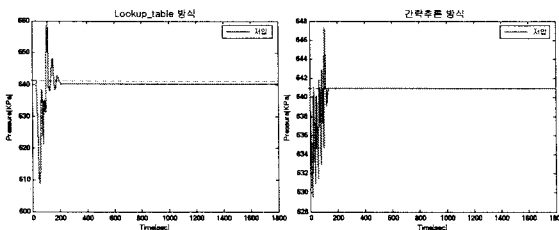


그림 6. lookup_table 방식과 간략추론 방식의 저압

그림 5 ~ 7은 시뮬레이션 결과이다. 그림 5는 세대마다 최저의 목적함수 값을 나타내는데 간략추론 방식이

lookup_table 방식보다 값이 작음을 알 수 있다. 값이 작을수록 더 최적의 값을 나타냄을 의미한다. 그림 6과 그림 7은 저압과 과열도를 나타내는데, lookup_table 방식은 250sec 이후에 수렴하는 반면 간략추론 방식은 150sec 때 수렴함을 볼 수 있다. 그리고 오버슈트, 진동 폭 등이 lookup_table 방식보다 간략추론 방식이 더 작음을 알 수 있다. 또한 lookup_table 방식은 제어가 마다 정상상태 오차가 존재하지만, 간략추론 방식은 B 과열도를 제외한 다른 제어기들은 정상상태 오차가 거의 없음을 알 수 있다.

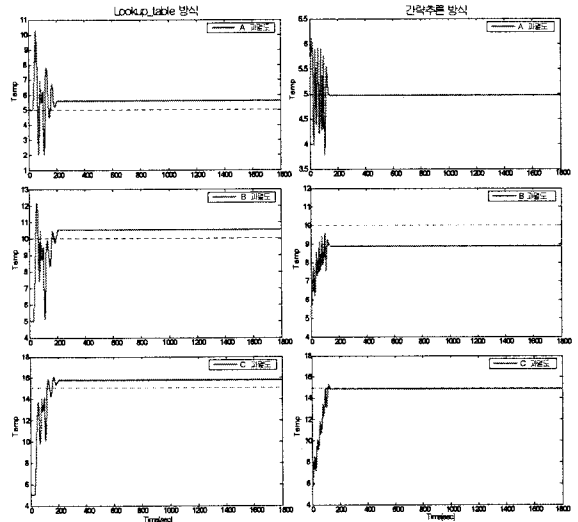


그림 7. lookup_table 방식과 간략추론 방식의 과열도

6. 결론

본 논문에서는 Multi HVAC 시스템의 안정성과 효율성에 영향을 주는 저압과 과열도를, Fuzzy 추론방법 중 Mandani 방법을 이용한 이산형 lookup_table 방식과 연속형 간략추론 방식, 이 두 가지 방식으로 각각의 Fuzzy 제어를 설계하고 유전자 알고리즘(GAs)을 통해 환산계수를 최적화한 후 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 위의 결과에서 볼 수 있듯이 목적함수 값, 수렴 속도, 오버슈트, 진동 폭, 정상상태 오차 등 연속형 간략추론 방식이 Mandani 방법을 이용한 이산형 lookup_table 방식보다 더 좋음을 알 수 있었다. 그리고 유전자 알고리즘의 세대수를 더욱 증가하거나 목적함수 부분에 하중계수를 이용한다면 수렴 시간이나 정상상태 오차부분에서 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이라 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-311-D00194)

참고 문헌

- [1] Rajat Shah, "Dynamic Modeling and Control of Single and Multi-Evaporator Subcritical Vapor Compression Systems" ACRC TR-216, Aug. 2003.
- [2] S.-K. oh, "Fuzzy Model & Control System by C-Programmin", Naeha Press, 2002.