

전력계통의 부하주파수 제어를 위한 유전 알고리즘을 사용한
최적 PID 제어기 설계

이정필 · 왕용필* · 김상효* · 허동렬* · 정형환*
* 동아대학교 전기공학과

Design of Optimal PID Controller Using Genetic Algorithm
for Load Frequency Control of Power System

J. P. Lee · Y. P. Wang* · S. H. Kim* · D. R. Hur* · H. H. Chong*
* Dept. of Electrical Engineering Dong-A University

Abstract - This paper designs the optimal PID controller for load frequency control on 2-area power system. Genetic algorithm is utilized to optimize parameters of PID controller which is applied to power system. Using two-point crossover, uniform crossover and one-point crossover, Search performance of genetic algorithm with each crossover method is considered. In case of load variation in 1-area, the dynamic characteristic of power system is considered. The simulation results show that the proposed PID controller is better control performance than PID controller using Ziegler-Nichols method.

1. 서론

최근 전력계통의 규모가 확대되고 복잡해 짐에 따라 전력계통의 주파수 제어는 고도의 제어기법을 필요로 하게 되었다. 특히, 연계된 전력 계통 전체를 안정하게 운용하기 위해서는 각 지역내의 주파수 제어는 물론, 급변하는 외란에 대해 연계 계통의 연계선 조류 편차량에 대한 제어를 신속히 행하지 않으면 상시 변동 조류가 대단히 크거나 조류의 동요가 심하게 되어 전력계통의 안정도가 저하된다. 이를 위해 종래의 자동주파수 제어(Automatic Frequency Control : AFC)에 부가하여 복잡하게 연계된 연계지역내 조류편차를 규정치 이하로 억제하기 위해 부하주파수 제어(Load Frequency Control : LFC)에 관한 많은 연구가 진행되었다.[1][2]

O. I. Elgerd[3] 등은 주파수 제어의 응답특성을 개선하기 위해 현대의 최적제어 이론을 이용한 선형 레귤레이터의 설계 기법을 제시하였다. 그후 A. Bose[4] 등은 부하주파수 조정오차에서 매개 변수의 효과에 관하여 연구하였으며, Y. Mizutani[5]는 부하주파수가 목표치에 추종하도록 PI제어 방식을 적용하였으나 속응성이 없는 단점을 보였다.

현재 산업 공정에 사용되고 있는 제어기중 PID (Proportional-Integral-Derivation) 제어기[7-8]는 간단한 구조임에도 불구하고 좋은 제어성능을 나타내고 있다. 그러나 PID 제어기의 성능은 제어대상 및 제어기의 매개변수에 크게 의존하는 단점이 있으며, 이는 제어대상 혹은 주위환경 변화에 기인한 매개변수 변화에 대하여 제어기의 파라미터가 재조정 되어야 하는 단점이 있다. 따라서 PID 제어기의 파라미터 자동동조에 관한 절실한 필요성과 함께 활발한 연구가 진행되고 있다. 대표적인 방법으로서 Ziegler-Nichols(ZN)[6]의 PID 제어기 동조법이 있으나 비선형 시스템은 매우 많은 진동 형식을 포함하고 있으므로 이 방법으로는 임계이득과 임계주기를 얻기가 곤란하다.

본 논문에서는 2지역 전력계통의 주파수 제어를 위해 PID 제어기를 설계 하였고, PID 제어기의 파라미터를 최적화 하기 위해 자연 선택(natural selection)과 자연 유전(natural

genetics)의 원리에 기초한 최적 탐색 방법인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)[9-11]을 사용하였다. 제안한 PID 제어기를 사용하여 외란이 발생한 경우의 동특성을 고찰 하였다. 또한 종래의 방법인 ZN 방법과 비교하여 제안한 PID 제어기의 설계가 매우 효과적임을 입증하고자 한다.

2. 모델 계통 방정식

본 논문에서 사용한 2지역 부하주파수 제어계의 모델은 그림 1과 같다.

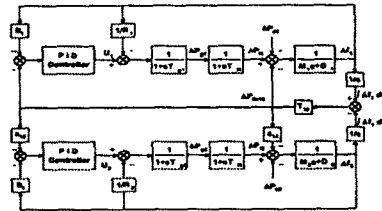


그림 1. PID 제어기를 갖는 2지역 전력계통의 블록선도

미소 외란에 의한 동특성은 선형 근사화 할 수 있고, 제어 대상 시스템은 선형 시불변이라 가정한다. 2지역으로 연계된 전력계통의 어느 한 지역에서 부하의 변동으로 전력수급의 불균형이 생기면 그 지역의 주파수가 변화하고 또한 연계된 인근지역의 주파수도 영향을 받게된다. 먼저 i지역내에 ΔP_{di} [p.u. MW]만큼의 부하변동이 발생하여 전력 수급 불평형이 생긴 경우 i지역의 전력 평형 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{2H_i}{f_0} \cdot \frac{d\Delta f_i}{dt} + D_i \cdot \Delta f_i + \Delta P_{tiei} = \Delta P_{di} - \Delta P_{di} \quad (1)$$

이때 위상각 편차는 식(2)와 같고, 연계선 조류편차 ΔP_{tiei} 는 식(3)과 같다.

$$\Delta \delta_i = 2\pi \int \Delta f_i dt \quad (2)$$

$$\Delta P_{tiei} = T_{ij} \cdot \left(\int \Delta f_j dt - \int \Delta f_i dt \right) \quad (3)$$

여기서, $T_{ij} \approx 2\pi \frac{|E_i| |E_j| \cos(\delta_i - \delta_j)}{X_{ij}}$ 이다.

또한 발전기-터빈-조속기 계통에 있어 터빈 발전기와 조속기의 관계는 각각 식(4)와 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{ui} = -\frac{1}{T_{ui}} \Delta P_{ui} + \frac{1}{T_{ui}} \Delta P_{pi} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{pi} = -\frac{1}{T_{pi}} \Delta P_{pi} - \frac{1}{T_{pi} \cdot R} \Delta f_i + \frac{1}{T_{pi}} u_i \quad (5)$$

i 지역과 j 지역내의 기준전력 비율 a_{ij} 라 하면,

$$a_{ij} = -P_{ij}/P_{ij}$$

$$\Delta P_{i,j} = a_{ij} \Delta P_{i,j}$$

로 나타낼 수 있다.

3. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 1970년대 John Holland에 의해 도입된 자연선택과 자연유전의 메커니즘에 기반을 둔 탐색 알고리즘이며, 이는 자연 세계에서 일어나는 진화현상을 모델로 하여 수학적 표현으로 만든 것이다. 이 유전 알고리즘은 최근 최적화 문제를 해결하기 위해 자연 과학이나 공학등에 많이 응용되고 있으며, 이는 종래의 최적화 방식들과 비교하여 다음과 같은 장점이 있다.

첫째, 유전 알고리즘은 탐색공간의 연속, 미분가능 또는 일정 형식과 같은 조건에 제약을 받지 않고 둘째, 유전 알고리즘의 동작이 간단하여 탐색공간의 향상이 비선형 시스템에 대하여 매우 강인하며 셋째, 탐색공간의 한 점에서 다른 곳까지 랜덤하게 탐색함으로써 국부적인 최적점을 피할 수 있게 하기 때문이다.

유전 알고리즘은 주어진 최적화 문제에 대하여 파라미터들을 유한길이의 2진 문자열로 부호화 하여 동작하며, 복제(reproduction), 교차(crossover), 돌연변이(mutation)과 같은 연산자를 사용하여 랜덤하게 동작하는데, 적합도 함수를 사용하여 적합한 문자열을 선택하고, 문자열의 비율을 변화시키며, 문자열의 비트(bit)를 변경시킨다. 마지막으로 해를 디코딩하고 평가하여 최적점을 탐색할 때 까지 반복 수행하는 것이다. 유전 알고리즘의 동작은 다음과 같다.

1) 파라미터의 부호화

유전 알고리즘에서 염색체의 유전자(gene)는 2진값을 갖는 비트 단위로 구성되며, 염색체는 유한길이의 2진 문자열로 표현된다. 이것은 초기에 길이가 M이고 N개의 문자열을 갖는 집단(population)을 발생시킨다.

2) 적합도(fitness) 평가

현재 세대에서 각 문자열은 실제 파라미터로 디코딩 되어지고 이 파라미터들로서 주어진 목적함수의 최적해에 근접하는지를 평가하는 과정으로 적합도를 구한다.

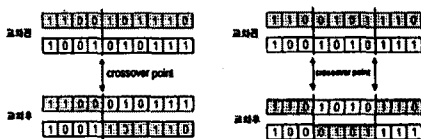
3) 복제(reproduction)

적합도에 따라 문자열을 복제하는 과정으로 적합도가 높을수록 다음 세대에 복제될 가능성이 높아진다.

4) 교차(crossover)

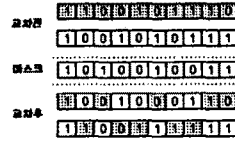
생태계에서 염색체는 각 유전자의 부분을 서로 교환하는 현상이 발생하는데 이를 교차라 하며, 교차 연산자는 현재 집단에 존재하는 정보보다 더 많은 정보를 제공하는 역할을 한다. 이것에 의해 현재대의 문자열은 상호 정보를 교환할 수 있게 된다.

최적 파라미터 탐색을 위해 사용되어진 유전 알고리즘은 교차연산자를 사용하여 각 개체간의 정보교환을 하여, 우수한 개체를 생성시키게 된다. 그러므로 어떠한 교차방식을 사용하는냐에 따라 주어진 탐색공간에서의 탐색성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 논문에서는 1점교차(one-point crossover), 2점교차(two-point crossover) 및 일점교차(uniform crossover)방식을 사용하여 유전 알고리즘의 탐색성능을 비교하였다.



(a) One-point crossover

(b) Two-point crossover



(c) Uniform crossover

그림 2. 교차 방식

5) 돌연변이(mutation)

돌연 변이는 그 집단에 새로운 정보를 제공해주는 또 다른 방식이다. 이 연산자는 돌연변이 확률에 따라 무작위로 선택된 위치의 비트상에서 0을 1로 또는 1을 0으로 바꾼다.

4. 유전 알고리즘을 사용한 최적 PID제어기 설계

4.1 PID 제어기

일반적인 PID 제어기의 전달함수 G(s)는 식(6)과 같이 표현된다.

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \quad (6)$$

여기서, K_P 는 비례이득, T_I 는 적분시간, T_D 는 미분시간을 나타낸다. $K_I = \frac{K_P}{T_I}$, $K_D = K_P T_D$ 라 두면, K_I 는 적분이득이며 K_D 는 미분이득이다.

4.2 유전 알고리즘을 사용한 PID 제어기 최적 파라미터 선정

본 논문에서는 PID 제어기의 최적동조를 위해 유전 알고리즘을 사용하였으며 성능지수가 최소화 되도록 하는 최적 PID 파라미터값을 선정한다. 그리고 최적화 하고자 하는 제어기 이득계수는 K_{P1} , K_{I1} , K_{D1} , K_{P2} , K_{I2} , K_{D2} 이며, 유전 알고리즘을 사용하기 위해서 부호 없는 2진수로 코드화 하여 그림 3과 같이 구성하였다.

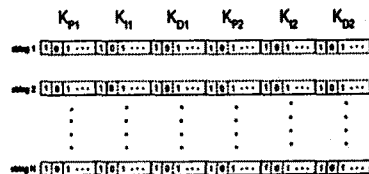


그림 3. 집단의 구조

본 논문에서 사용된 성능지수는 식 (7)과 같이 두었다.

$$J = \int_0^{t_1} (\Delta I_1^2 + \Delta I_2^2 + \Delta P_{i12}^2 + \alpha(u_1^2 + u_2^2)) dt \quad (7)$$

여기서 t_1 은 적분 시간이며, w 는 가중치이다.

또한 최적 이득계수를 결정하기 위해 사용되어진 적합도 함수는 식 (8)과 같이 두었다.

$$\text{Fitness} = \frac{1}{1 + \min J} \quad (8)$$

유전 알고리즘을 사용한 PID 제어기를 전력계통에 적용한 블록선도는 그림 5와 같다.

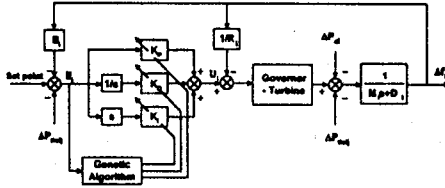


그림 4. 유전 알고리즘을 사용한 PID 제어를 갖는 전력계통의 블록선도

전력계통에 적용된 유전 알고리즘을 사용한 PID 제어기의 이득계수를 최적화 하는 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 가) $K_{P1}, K_{I1}, K_{D1}, K_{P2}, K_{D2}$ 의 초기 문자열 발생
- 나) $K_{P1}, K_{I1}, K_{D1}, K_{P2}, K_{D2}$ 디코딩
- 다) 전력계통 시뮬레이션 (성능지수 평가)
- 라) 적합도 계산
- 마) 다음세대로 문자열 복제
- 바) 교차율에 따른 교차실행
- 사) 돌연변이율에 따른 돌연변이 실행
- 아) 가장 우수한 개체 유지
- 자) 종료 조건을 만족할 때 까지 나)-아) 반복

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

2지역 전력계통의 부하주파수 제어를 위해 PID 제어기를 설계하였고, 이 PID 제어기의 파라미터를 결정하는 방법으로 유전 알고리즘을 사용하였다. 여기서 사용한 유전 알고리즘의 파라미터는 표 1과 같고, 전력 계통 파라미터는 표 2와 같다.

표 1. 유전 알고리즘 파라미터

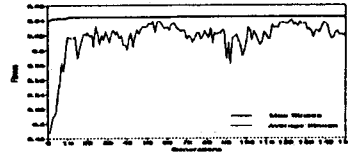
string length	population size	crossover rate	mutation rate
120	50	0.8	0.01

표 2. 시스템 파라미터

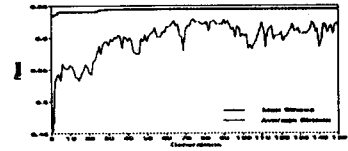
$T_{n1}=0.08$ [sec]	$T_{i1}=0.3$ [sec]
$D_{i1}=0.008$ [p.u. MW/Hz]	$M_{i1}=0.1667$ [p.u.MW · s/Hz]
$R_{i1}=2.4$ [Hz/p.u.MW]	$T_{i2}=0.545$ [p.u.MW/Hz]
$P_{limax}=0.1$ [p.u.MW]	$P_{n2}=2000$ [MW]
$\delta_{i1}=30$ [deg]	$a_{i1}=-P_{i1}/P_{n1}=-1$

본 연구에서 부하 외란은 1지역에서만 각각 $\Delta P_{d1}=0.01$, $\Delta P_{d1}=0.05$ 가 지속적으로 발생한 경우로 하였고, 1점교차 방식, 2점교차 방식, 일점교차 방식을 사용한 유전 알고리즘의 탐색 성능을 비교하였다. 이러한 각각의 방법들은 플랫 필 선택방법과 엘리트리스트 선택 방법을 기준으로 하였고, 비교를 위해서 표 1과 같이 똑같은 조건의 파라미터를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

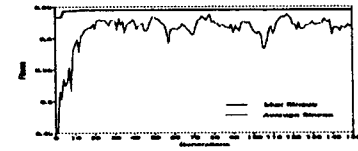
먼저 $\Delta P_{d1}=0.01$ 이 지속적으로 발생한 경우에 대하여 각 교차방식에 대한 최대 적합도와 평균적합도는 그림 5과 같으며, 일점교차 방식과 1점교차 방식을 사용한 유전 알고리즘이 대체로 평균적합도 값이 높게 나타나 우수한 해를 많이 가지고 있음을 알 수 있었고, 그림 6에 나타난 것처럼 1점교차 방식을 사용한 것과 일점교차방식을 사용하여 얻은 성능지수가 2점교차 방식을 사용한 것보다 작은 값에 수렴 하였으나 1점교차 방식을 사용한 것이 더욱 작은 성능지수를 나타 내었으며, 또한 빠른 수렴을 나타내었다.



(a) Uniform crossover



(b) Two-point crossover



(c) One-point crossover

그림 5. 각 교차방식의 최대 적합도와 평균 적합도

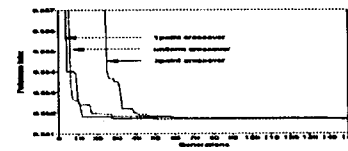
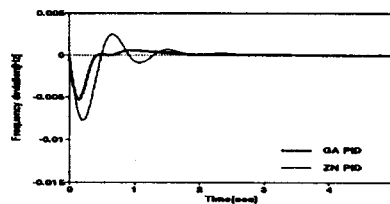


그림 6 각 교차 방식에 따른 성능지수 수렴 비교

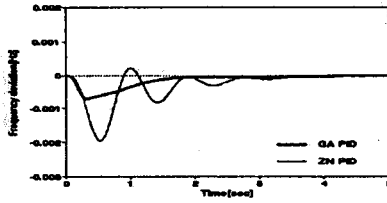
이 경우에 대하여 GA를 사용한 PID 최적 파라미터값과 ZN법을 사용하여 구한 PID 파라미터 값은 표 3과 같으며, 이때의 각 지역의 주파수 및 연계선 조류편차량에 대한 응답특성이 그림 7에 나타나 있다. GA를 이용한 방법은 ZN법을 이용한 것 보다 주파수 최대 편차량과 연계선 조류 편차량을 감소시켰으며, 또한 1, 2지역의 주파수 편차와 연계선 조류 편차량의 정정시간(settling time)이 감소 됨을 알 수 있다.

표 3. 각 지역의 최적 PID 파라미터

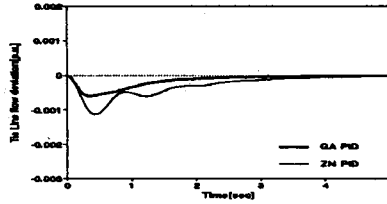
1지역	ZN	GA	2지역	ZN	GA
K_{P1}	2.072	2.987	K_{P2}	2.072	3.504
K_{I1}	3.390	7.055	K_{D2}	3.390	9.720
K_{D1}	0.316	0.745	K_{D2}	0.316	2.137



(a) Δf_1

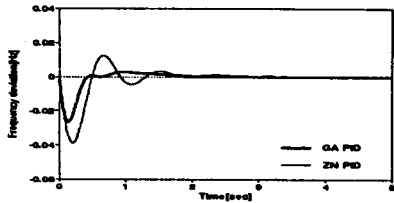


(b) Δf_2

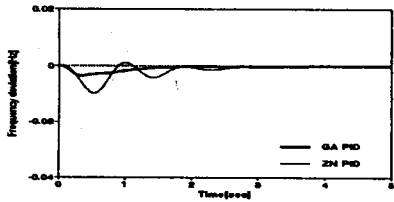


(c) ΔP_{tie12}

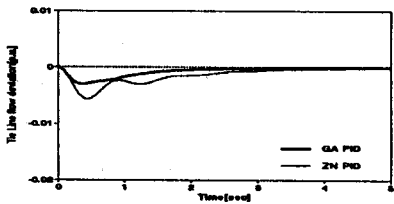
그림 7. 각 지역의 주파수 편차 및 연계선 조류편차 $\Delta P_{d1} = 0.01 [p.u.]$



(a) Δf_1



(b) Δf_2



(c) ΔP_{tie12}

그림 8. 각 지역의 주파수 편차 및 연계선 조류편차 $\Delta P_{d1} = 0.05 [p.u.]$

그림 8은 대체로 큰 외란($\Delta P_{d1} = 0.05$)이 1지역에 지속적으로 발생한 경우로써, $\Delta P_{d1} = 0.01$ 일 때 얻은 PID 이득

계수 값을 그대로 사용하여 적용한 결과 각 지역의 주파수 최대 편차량과 연계선 최대 조류 편차량 또한 종래의 ZN법 보다 현저히 감소하였고, 비교적 큰 외란에 대해서도 우수한 응답 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다. 따라서 GA를 이용한 PID제어기 파라미터 선정방법은 ZN법을 이용한 것 보다, 전력계통의 부하주파수 제어에 매우 적합함을 알 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 2지역 전력계통의 부하주파수 제어를 위해 유전 알고리즘을 이용하여 최적 PID 제어기를 설계하여, 1지역에 부하변동시 시스템의 동특성과 제어 성능을 고찰하였다. 유전 알고리즘의 교차 방식으로는 1점교차, 2점교차 및 일점교차 방식을 사용하였고, 각각에 대한 탐색성능과 성능지수를 비교하여 교차방식의 적절한 선택이 유전 알고리즘의 성능을 향상 시킬 수 있음을 확인하였다.

제안한 PID 제어기는 ZN법과 비교하여 부하변동과 같은 외란에 대해 제어성능이 우수함을 알 수 있다.

본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

1. 유전 알고리즘을 사용하여 PID 제어기의 이득계수를 최적화 함에 있어서, 1점교차 방식을 사용한 것이 2점교차와 일점교차 보다 탐색성능이 우수함을 알 수 있었다.
2. 제안한 PID 제어기는 ZN법과 비교하여 부하 변동시 주파수 편차, 연계선 조류편차량 및 정정시간을 현저히 감소시킬 수 있었다.
3. 유전 알고리즘을 사용한 최적 PID 제어기는 전력계통의 안정도에 크게 기여함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Ollei I. Elgerd, Charles E. Fosha, "Optimum megawatt-frequency control of multiarea electric energy systems", IEEE Trans., on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 4 pp. 556-563, 1970
- [2] Goro Shirai, "A method of load frequency control coordinating with conventional tie-line bias control", IEE J., Vol. 100 No. 12, pp.723-730, 1980
- [3] O. I. Elgerd, and C. E. Fosha, "Optimum megawatt-frequency control of multiarea electric energy system", IEEE Trans., PAS-92, pp.1670-1678, 1973
- [4] A. Bose, Hyas Atiyah, "Regulation error in load frequency control", IEEE Trans. on Power Apparatus systems, Vol. AC-23, pp.312-325, 1978
- [5] Y. Mizutani, "Suboptimal control for load frequency control of P-I type using area-decomposition and aggregation method", IEE J, Vol. 100, No. 1, pp.9-16, 1980
- [6] K. J. Aström, T. Hägglund, "Automatic tuning of PID controllers", Instrument Society of America, 1988
- [7] Chi-jui Wu, "Design of self-tuning PID power system stabilizer for multimachine power system", IEEE. Trans., Vol. 3, No. 3, pp.1059-1064, 1988
- [8] J. J. Grefenstette, "Optimization of control parameters for genetic Algorithm", IEEE Trans. on systems, man and cybernetic, vol. SMC-16, 1986
- [9] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithm in search, optimization, and machine learning", Addison-Wesley Publishing Co. Inc. 1989
- [10] Z. Michalewicz, "Genetic algorithm + data structure = Evolution Program", Second Edition, Springer Verlag, 1992
- [11] J. J. Buckley and Y. Hsuashi, "Fuzzy genetic algorithm for optimization", Proc. of 1993 international joint conference of neural networks, pp. 725-728, 1993