

IA를 이용한 전력시스템 고조파 상태 추정 최적 알고리즘

박인표* 왕용필* 정형환* 박희철** 안병철***
 *동아대학교 전기공학과. **한전전력연구원 ***부산울산중소기업청

An Optimal Algorithm of Harmonic State Estimation
 using Immune Algorithm on Power System

I.P. Park* · Y.P. Wang* · H.H. Chung* · H.C. Park** · B.C.Ahn***
 (* : Dong-A University, ** : KEPRI, *** : BUSMA.)

Abstract - The design of a measurement system to perform Harmonic State Estimation(HSE) is a very complex problem. In particular, the number of available harmonic instruments (Continuous Harmonic Analysis in Real Time : CHART) is always limited. Therefore, a systematic procedure is needed to design the optimal placement of measurement points.

This paper presents an optimal algorithm of HSE which is based on an optimal placement of measurement points using Immune Algorithm (IAs). This HSE has been applied to power system for the validation of an optimal algorithm of HSE. The study results have indicated an economical and effective method for optimal placement of measurement points using IAs in the HSE.

1. 서 론

최근 전력시스템에서는 비선형 부하에 의해 발생되어지는 고조파 장애 문제에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 따라서 고조파를 제거하거나 또는 제한하기 위해 전력 시스템 전역에 걸쳐서 고조파의 위치와 크기에 대한 모든 정보를 얻을 수 있는 효과적이고 능률적인 방법이 필요하다. 그러나 대규모 전력시스템에서 모든 계통에 대한 고조파 전압 및 전류 성분을 추정하기 위해서 전체 시스템을 측정하기는 불가능하고 또한 측정 장비 수량의 제한으로 인해 보다 체계적인 방법이 필요하다.

이에 전체 전력시스템의 고조파 상태를 추정하기 위한 효과적인 방법으로 측정 위치에 대한 최적 선정이 있으며, 측정 위치 최적 선정을 위해 인간의 면역 체계를 모의한 면역 알고리즘(Immune Algorithm)을 이용하여 새로운 HSE 최적 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서는 IA를 이용한 HSE 최적 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해 9도선 전력시스템에 적용하여 전체 시스템 HSE에 있어서 측약 측정위치를 선정한 경우와 IA를 이용한 최적 측정위치를 선정한 HSE에 대한 비교, 고찰을 통해 IA를 이용한 HSE 최적 알고리즘의 경제성과 유용성을 보이고자 한다.

2. 고조파 상태 추정

고조파 상태 추정은 전체 전력시스템에서 발생되어지는 고조파 성분의 상태를 추정하는 것으로 이를 통해 시스템 내의 각각의 고조파 분포를 파악할 수 있으며 나아가 시스템 각 모선의 고조파 주입원을 알 수 있는 방법이다.

전력시스템 HSE을 위한 측정 방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 측정 방정식 Z의 측정 오차벡터를 0으로 가정한다면 식(2)와 같다.

$$Z = [H]X + \varepsilon \tag{1}$$

$$Z = [H]X \tag{2}$$

$$\begin{cases} Z : n \times 1 \text{ 측정벡터} \\ H : n \times m \text{ 측정행렬} \\ X : m \times 1 \text{ 측정벡터} \\ \varepsilon : n \times 1 \text{ 측정벡터} \end{cases} \quad \text{단 } n \leq m$$

위 HSE의 측정 방정식을 풀이기 위해 특이값 분해(Singular Values Decomposition : SVD)와 널 공간 벡터(Null Space Vector)를 이용한다. HSE 순서도는 그림 1과 같다.

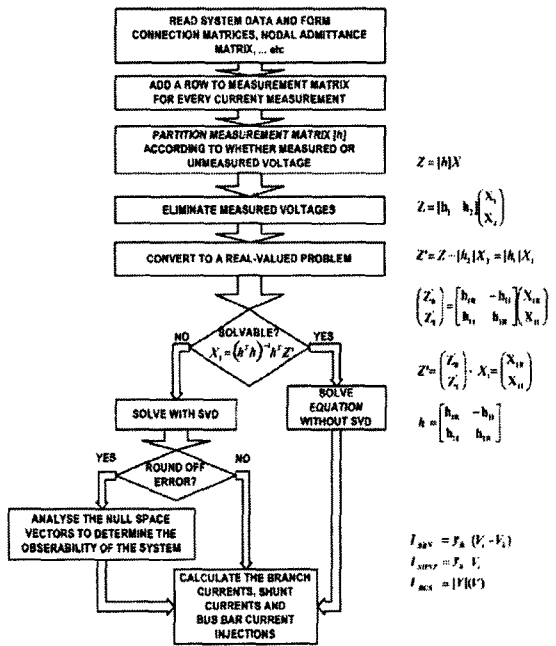


Fig 1. Flowchart of HSE

3. IA를 이용한 HSE최적 알고리즘

3.1 면역 알고리즘

면역 알고리즘은 인체 면역계에서의 다양한 항체 생성 능력을 설명하는 소매틱 이론(somatic theory)과 면역계의 자기조절능력을 설명하는 네트워크 가설(network hypothesis)을 기초하여 최적화 알고리즘 및 여러 분야에서 연구 발전되고 있다.

면역 알고리즘의 특징으로는 첫째, 다양한 항체의 생성

기구와 자기 조절 기구에 의해 다양한 항체를 생성할 수 있다. 둘째, 항원과의 친화도가 높은 항체를 보다 많이 남기는 항체 생성 기구에 의해 유효한 항체를 대량으로 생성하여 근방의 병렬 탐색이 가능하며 최적해를 고속으로 구할 수 있다. 셋째, 기억 학습 기구와 다양성이 있는 항체를 유지함으로써 인하여 조기 수렴 문제를 해결 가능하고, 고속으로 해를 구할 수 있다.

면역 알고리즘의 흐름도는 그림 2와 같다.

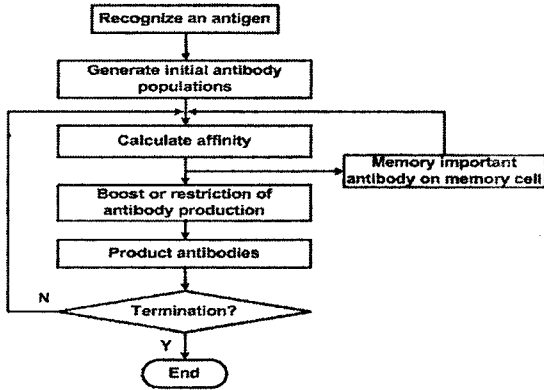


Fig 2. Flowchart of IA

3.2 IA를 이용한 최적 측정위치 선정

본 논문에서는 전력시스템 HSE에 있어서 설치 기기의 비용과 상태추정 오차를 최소화하는 최적 측정위치를 선정하기 위해 IA를 이용하여 HSE 최적 알고리즘을 제안하였다. IA를 이용한 HSE 최적 알고리즘의 목적 함수로는 식(3)과 같이 구성하였다.

또한, IA를 이용한 HSE의 최적화를 위해 항원과 항체 사이의 친화도 계산은 최적화하고자 하는 목적 함수 opt_v 가 최소일 때, 가장 큰 값인 1을 가지도록 식(4)와 같이 정의하였다.

$$opt_v = \sum_{i=1}^n Cost_i + V_{BUS\ error} + I_{BUS\ error} + I_{Branch\ error} \quad (3)$$

단, $Cost_i = \alpha + K\beta$, ($\alpha = \$20,000$, $\beta = \$2,000$)
($i=1, \dots, n$, n 은 모선 수)

$$Affinity_v = \frac{1.0}{1.0 + opt_v} \quad (4)$$

여기서 $Cost_i$ 는 각 모선에 대한 CHART의 비용, K 는 추가적인 채널 수, $V_{BUS\ error}$ 는 모선전압 오차, $I_{BUS\ error}$ 는 모선전류 오차, $I_{Branch\ error}$ 는 선로전류 오차이다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 축약 측정위치에서의 HSE

본 논문에서 전력시스템 HSE를 위해 9모선 전력시스템에 적용하였다. 그림 3은 부하 축과 인근하는 다른 모선 및 선로를 고려하여 축약 측정위치를 선정한 것이다. 전압 측정 모선은 5, 7, 8모선, 입력 전류 측정모선은 2, 4, 5, 6, 7, 8모선이다. HSE를 수행한 결과 모선 전압, 모선 전류 및 선로 전류에는 오차가 0%로 나타났다. 모선 전압과 모선 전류에 대한 실제 값과 추정 값을 비교하여 각각 표 1, 2에 나타내었다.

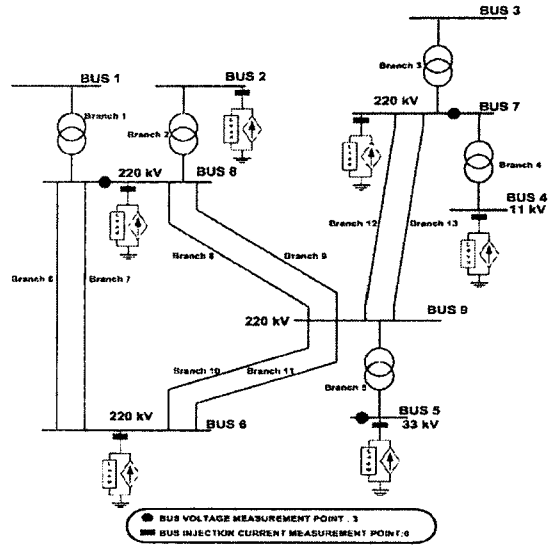


Fig 3. Reduced measurement placement

Table 1. Bus Voltage

Bus Voltage	Actual		Estimated		Error (%)
	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	
1 Bus	0.0050	27.03069	0.0050	27.03069	0.0000
2 Bus	0.0050	26.98089	0.0050	26.98089	0.0000
3 Bus	0.0050	26.48450	0.0050	26.48450	0.0000
4 Bus	0.0050	26.25757	0.0050	26.25757	0.0000
5 Bus	0.0050	27.84543	0.0050	27.84543	0.0000
6 Bus	0.0050	27.37857	0.0050	27.37856	0.0000
7 Bus	0.0050	27.71206	0.0050	26.71206	0.0000
8 Bus	0.0050	27.07196	0.0050	27.07196	0.0000
9 Bus	0.0050	27.21706	0.0050	27.21706	0.0000

Table 2. Bus current

Injection Current	Actual		Estimated		Error (%)
	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	
1 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5 Bus	0.0090	25.0000	0.0090	25.0000	0.0004
6 Bus	0.0050	10.0000	0.0050	10.0000	0.0005
7 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

축약 측정위치에 따른 CHART 비용은 2모선, 4모선, 6모선에서는 \$20,000이고 5모선, 7모선, 8모선에서는 \$22,000이므로 전체적인 CHART비용은 \$126,000으로 산출된다.

4.2 IA를 이용한 최적 측정 위치에서의 HSE

전력시스템 HSE에 있어서 IA를 이용한 HSE 최적 측정 위치 선정을 그림 4에 나타내었다. 전압 측정 모선은 5, 7, 8, 9모선, 입력 전류 측정모선은 4, 5, 7, 8, 9모선이다. IA를 이용한 HSE에서 모선 전압, 모선 전류 및 선로 전류 오차가 발생되지는데 이 오차는 수치적

오차인 라운드 오프 오차(round off error)이므로 널 공간 벡터(null space vector)를 수행하여 오차를 제거하였다. 따라서 모션 전압, 모션 전류 및 선로 전류의 오차는 0%로 나타났다. 그 결과 모션 전압과 모션 전류에 대한 실제 값과 추정 값을 비교하여 각각 표 3, 4에 나타내었다.

IA를 이용한 HSE 최적 측정위치에 따른 CHART 비용은 4모선, 9모선은 \$20,000이며 5모선, 7모선, 8모선, 9모선에서는 \$22,000이므로 전체적인 CHART 비용은 초기 측정위치보다 \$18,000 적은 \$108,000의 비용이 산출된다.

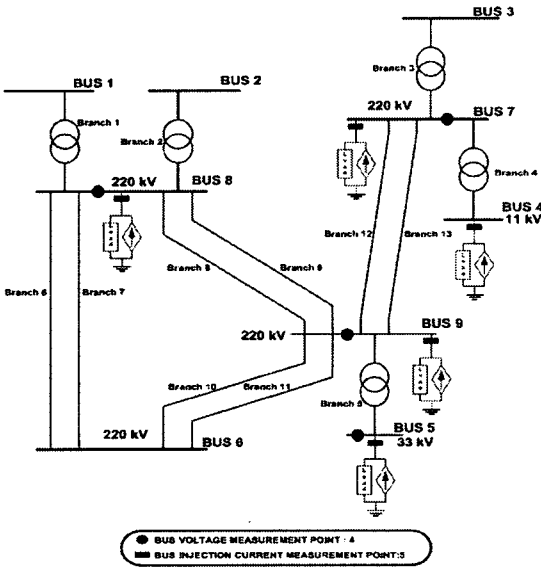


Fig 4. Optimized measurement placement using IA

Table 1. Bus Voltage

Bus Voltage	Actual		Estimated		Error (%)
	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	
1 Bus	0.0050	27.03069	0.0050	27.03069	0.0000
2 Bus	0.0050	26.98089	0.0050	26.98088	0.0000
3 Bus	0.0050	26.48450	0.0050	26.48450	0.0000
4 Bus	0.0050	26.25757	0.0050	26.25757	0.0000
5 Bus	0.0050	27.84543	0.0050	27.84543	0.0000
6 Bus	0.0050	27.37857	0.0050	27.37856	0.0000
7 Bus	0.0050	27.71206	0.0050	26.71206	0.0000
8 Bus	0.0050	27.07196	0.0050	27.07196	0.0000
9 Bus	0.0050	27.21706	0.0050	27.21706	0.0000

Table 2. Bus current

Injection Current	Actual		Estimated		Error (%)
	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	
1 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5 Bus	0.0090	25.0000	0.0090	25.000	0.0004
6 Bus	0.0050	10.0000	0.0050	10.001	0.0023
7 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

5. 결 론

본 논문에서는 전력시스템의 고조파 상태 추정에 있어서 IA를 이용하여 HSE 최적 알고리즘을 제안하였다. 제안한 HSE 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 9모선 전력시스템에 적용하여 고조파 상태 추정을 수행하였다. 이 때 측정위치를 축약한 경우와 IA를 이용하여 최적 측정위치를 선정한 경우에 고조파 상태 추정을 수행하여 비교하였다. 본 연구결과 다음과 같이 나타났다.

1. 제안한 HSE 알고리즘은 실제값과의 오차가 최소화 되었고, 신뢰성 있는 고조파 상태를 추정하였다.
2. 제안한 HSE 알고리즘은 축약 측정위치보다 측정위치가 최소화되었다.
3. 제안한 HSE 알고리즘은 고조파 상태를 추정하기 위해 사용되는 측정 장비인 CHART의 비용도 축약 측정위치보다 최소화되었다.

본 논문에서 IA를 이용한 전력시스템 HSE 최적 알고리즘은 전력시스템의 고조파 상태 추정 및 측정 위치 선정을 통하여 신뢰성 및 경제성에 있어서 매우 유용함을 나타내었다.

[참고 문헌]

- [1] G.T. Heydt, "Identification of harmonic sources by a state estimation technique", IEEE Trans, PWRD-4,(1), pp.569-576, 1989
- [2] H.M. Beides, G.T. Heydt, "Dynamic state estimation of power system harmonics using Kalman filter methodology", IEEE Trans, PWRD-6,(4), pp.1663-1670, 1991
- [3] Z.P. Du, J. Arrillaga, N.R. Watson, "Continuous harmonic state estimation of power systems", Proc. IEE, C, 143, (4), pp.329-336, 1996.
- [4] J. Arrillaga, N.R. Watson, S. Chen, "Power system quality assessment" John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- [5] D. Dasgupta, "Artificial immune systems and their applications", Springer-Verlag, 1999