論 文
53A-12-2

전력시스템 고조파 상태 추정에서 면역 알고리즘 적용

Application of Immune Algorithm for Harmonic State Estimation

王 龍 泌† · 朴 寅 杓* · 鄭 亨 煥**
(Yong-Peel Wang · In-Pyo Park · Hyeng-Hwan Chung)

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 analysis measurement instruments 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 IA-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 Immune Algorithm (IAs) in the HSE.

Key Words : Harmonic State Estimation(HSE), Optimal Placement of Measurement Point, Immune Algorithms(IAs)

1. 서 론

최근 전기·전자공학 분야의 급속한 기술혁신으로 전력용 싸이리스터나 전력용 트랜지스터를 이용한 전력 변환 및 제어기술이 다양해졌으며, 그의 응용범위는 소용량 가정·사무용기기로부터 고압 및 초고압 시스템에서의 대전력 변환 장치에까지 이르게 되었다. 이에 따라 전력 변환 장치의 비선형성에서 나타나는 고조파로 인한 여러 가지 많은 전기적 피해가 발생하였으며, 고조파 증가가 예상되는 향후에는 이와 같은 피해 사례가 증가할 것으로 우려되고 있다.[1-4]

따라서 이러한 전력시스템에서 발생하는 고조파 장애 문제에 효율적으로 대처하기 위해서는 비선형 부하로부터 시스템으로 유입된 고조파에 대해 정확한 분석이 필요하며, 나아가 전력시스템 전역에 걸쳐서 고조파의 특성에 대한 모든 정보를 얻을 수 있는 효과적이고 경제적인 방법에 관한 연구가 필요하다. 이에 전력시스템에서 모선과 선로의 부분적인 고조파 성분의 측정을 통해 전체 시스템 내의 각각의 고조파 정보를 얻을 수 있는 효과적이고 경제적인 기법인 고조파 상태 추정(Harmonic State Estimation : HSE)을 제시하였다.[5-7]

전력시스템의 고조파 상태 추정을 수행하기 위하여 측정 시스템을 설계하는 것은 매우 복잡한 문제이다. 측정 시스템은 많은 수의 측정 장치와 복잡한 통신 시스템으로 이루어져 있기 때문에 측정 과정이나 통신과정에 있어서 각종 잡음의 혼입이 문제가 될 수 있으며, 한편으로는 측정 설비 또는 통신 시스템의 고장발생으로 인하여 시스템이 관측불가능 또는 악조건 상태로 되어 상태 추정 결과가 믿을 수 없는 상황에 도달할 수도 있다. 이에 대한 대책으로 많은 수의 측정 장비를 설치하여 다량의 측정데이터를 수집하는 것도 하나의 방법이 될 수 있으나 측정 시스템의 측정 장비의 수를 증가시키면 상태추정 정확도와 신뢰도는 증가하나 반면 측정설비투자비가 증가하게 된다. 따라서 경제성을 유지하면서 고조파 상태 추정의 정확도와 신뢰도를 제고할 수 있는 최적의 측정 위치 선정에 관한 체계적인 연구가 필요하다. 이미 고조파 상태 추정을 수행함에 있어 자연의 진화과정을 모의한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 이용한 측정위치 선정이 연구되어졌으며, 보다 개선된 성능의 알고리즘이 계속 연구되고 있다.[8-13]

본 논문에서는 전력시스템의 고조파 상태 추정에 있어서 측정 위치 최적 선정을 위해 인간의 면역 체계를 모의한 면역 알고리즘(Immune Algorithm : IA)을 적용하여 새로운 IA-HSE 최적 알고리즘을 제안하였다.

비 결정론적 알고리즘인 면역 알고리즘은 다른 일반적인 최적화 알고리즘과 비교하면 다음과 같은 특징을 가진다. 첫째, IA는 하나의 가능해를 가지고 최적화 과정을 수행하는 것이 아니라, 동시에 여러 개의 가능해로써 최적화를 수행한다. 둘째, IA는 해의 값 자체를 그대로 사용하는 것이 아니라, 코드화된 수의 배열을 사용한다. 셋째, 목적 함수의 미분값과 다른 정보들의 필요없이 최적화의 목적 함수를 그대로 사용한다. 그리고 GA와 비교하여 IA의 특징을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, IA는 최적해로의 수렴을 보정하기 위하여 기억 세포군(menory cell)을 가지고 최적화를 수행하고, 실제 면역계의 다양성을 구현하기 위한 친화도 계산과정이 있으며, 항원에 대한 기대치의 계산에 의해 면역계의 자기조절기능을 수행한다.[17-20]

† 교신저자, 正會員 : 東亞大 電氣電子컴퓨터工學部 BK 敎授·工博
E-mail : ypwang@smail.donga.ac.kr
* 正 會 員 : 韓國電氣硏究員 電力硏究團 硏究員·碩士
** 正 會 員 : 東亞大 電氣電子컴퓨터工學部 敎授·工博
接受日字 : 2004年 7月 9日
最終完了 : 2004年 10月 6日

따라서, 제안한 면역 알고리즘을 적용한 고조파 상태 추정의 장점은 최적화 하고자하는 목적함수만을 통해 복잡, 대형화된 다기 시스템에 직접적으로 적용가능하며, 또한 기억 학습 기구와 다양성이 있는 항체를 유지함으로 인하여 고속으로 최적해를 구할 수 있다는 것이다.

제안한 IA-HSE 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 9모선 전력시스템에 적용하여 고조파 상태 추정을 수행하였다. 이 때 축약 알고리즘을 적용하여 측정위치를 선정한 경우와 면역알고리즘을 적용하여 측정위치를 선정한 경우에 대해 각각 고조파 상태 추정을 수행하여 그 결과를 비교·검토 하였다. 고조파 상태 추정 결과 두 경우 모두 상태 추정오차는 최소화 되었다. 그러나 면역알고리즘을 적용하여 최적 측정위치를 선정한 경우가 축약 알고리즘을 적용하여 측정위치를 선정한 경우보다 측정 장비 비용이 최소화 되었다. 이상에서 전력시스템의 고조파 상태 추정에 있어서 면역알고리즘을 적용한 최적 측정위치 선정은 매우 경제적이고 효과적인 방법임을 나타내었다.

2. 고조파 상태 추정

전력시스템에서의 상태 추정 기법은 전력시스템의 안정된 운용을 위해 사용되는 중요한 기본 기능중의 하나로, 1969년 미국의 Fred Schweppe[1]에 의해 처음 소개된 후, 다양한 연구와 개발이 이루어져 왔다. 상태 추정은 시스템내의 여러 측정점으로부터 얻어진 측정값들을 이용하여 현재 시스템의 상태 변수를 추정함으로서 시스템의 운영 상태를 감시하고, 그에 대한 정확한 데이터베이스를 구축함으로서 시스템의 안정도해석, 온라인 조류 계산 등의 시스템해석 기능을 수행하는데 사용된다. 초기 기본 주파수에 대한 연구로부터 시작된 전력시스템 상태추정은 모든 전류와 전압 파형이 일정한 주파수와 크기만을 가지는 순수한 정현파이고, 평형 3상 조건인 대칭 전력시스템에 국한하였다. 그러나 최근 산업의 발달과 전기·전자공학 분야의 급속한 기술혁신으로 전력용 싸이리스터나 전력용 트랜지스터를 이용한 전력 변환 및 제어기술이 다양해졌으며, 이에 따라 전력 변환 장치의 비선형성에서 나타나는 고조파로 인한 여러 가지 많은 문제점으로 인하여 최근에는 고조파 상태 추정 및 고조파 성분 분석에 관한 연구로 확장되어 이루어지고 있다[1-4].

그러나 대규모 전력시스템에서 모든 모선과 선로에 대한 고조파 전압 및 고조파 전류의 파형과 주파수 성분을 추정하기 위하여 전체 시스템을 측정한다는 것은 불가능하다. 따라서 최적의 측정 위치에서의 부분적 측정값들을 이용하여 전체 전력시스템의 고조파 상태를 정확히 추정할 수 있는 고조파 상태 추정이 필요하다. 고조파 상태 추정은 회로 상호결합에 의한 불평형 임피던스 및 입력전류와 같은 불평형 조건을 표현하기 위해 3상 전력시스템 모델을 사용한다. 전력시스템 고조파 상태 추정을 위한 부분적인 측정 기준은 임의의 모선전압 및 입력전류 그리고 선로전류 등으로 구성된다[5-7].

2. 1. 고조파 상태 추정의 수학적 모델

고조파 상태 추정(Harmonic State Estimation : HSE)은 전체 시스템에 대하여 고조파 전류 및 전압의 부분적인 측정 데이터로부터 전체의 전력시스템에 대한 고조파 상태를 추정하기 위한 것이다. 그리고 고조파 상태 추정에서 고조파 상태 변수를 선택하기 위해 성능평가 기준 및 측정위치 선택 그리고 측정된 수량을 모두 포함하고 있어야 한다. 고조파의 상태 변수 모델은 선택된 모선과 선로를 동기화되어진 측정장비의 측정데이터로부터 전력시스템의 고조파 정보를 추정하기 위해 시스템의 전반적인 고조파 상태 추정을 수학적으로 공식화하는 것이다. 3상 전력시스템에서 기준 모선을 배제한 모든 모선, 또는 각상에 대한 모선의 설정을 **N**이라 하고, 모든 가지의 설정을 **B**라 하며 그리고 모선에 연결된 모든 선로를 **L**이라 설정한다. 또한 $\mathbf{C}_{NL}$, $\mathbf{C}_{LB}$ 및 $\mathbf{C}_{BN}$은 각각 모선-선로 접속행렬, 선로-가지 접속행렬 그리고 가지-모선 접속행렬이다.[7-9]. 여기서 가지 모선 접속행렬은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{C}_{BN}(i,j) = (\mathbf{C}_{NL}\,\mathbf{C}_{LB})^{T} \tag{1}$$

고조파 차수n에 대해 $\mathbf{V}_N(n)$과 $\mathbf{I}_N(n)$은 모선전압과 입력전류의 위상벡터, $\mathbf{I}_L(n)$은 선로전류의 위상벡터, $\mathbf{V}_B(n)$과 $\mathbf{I}_B(n)$는 가지 전압과 가지 전류이다. 그리고 $\mathbf{V}_{BB}(n)$은 단순한 어드미턴스 행렬이다. Kirchhoff's 전압 및 전류 법칙 그리고 옴의 법칙을 기초로 식(2)처럼 나타낼 수 있으며, $\mathbf{I}_N(n)$, $\mathbf{I}_L(n)$, $\mathbf{Y}_{NN}(n)$ 및 $\mathbf{Y}_{LN}(n)$으로 나타내면 식(3) 및 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned}
\mathbf{V}_B(n) &= \mathbf{C}_{BN}\mathbf{V}_N(n)\\
\mathbf{I}_N(n) &= \mathbf{C}_{NL}\mathbf{I}_L(n)\\
\mathbf{I}_L(n) &= \mathbf{C}_{LB}\mathbf{I}_B(n)\\
\mathbf{I}_B(n) &= \mathbf{Y}_{BB}(n)\,\mathbf{V}_B(n)
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{I}_N(n) &= \mathbf{C}_{NL}\mathbf{C}_{LB}\mathbf{I}_B(n) = \mathbf{C}_{BN}^{T}\mathbf{Y}_{BB}(n)\,\mathbf{V}_B(n)\\
&= \mathbf{C}_{BN}^{T}\mathbf{Y}_{BB}(n)\,\mathbf{C}_{BN}\mathbf{V}_N(n)\\
\mathbf{I}_L(n) &= \mathbf{C}_{LB}\mathbf{Y}_{BB}(n)\,\mathbf{V}_B(n)\\
&= \mathbf{C}_{LB}\mathbf{Y}_{BB}(n)\,\mathbf{C}_{BN}\mathbf{V}_N(n)
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{Y}_{NN}(n) &= \mathbf{C}_{BN}^{T}\mathbf{Y}_{BB}(n)\,\mathbf{C}_{BN}\\
\mathbf{Y}_{LN}(n) &= \mathbf{C}_{LB}\mathbf{Y}_{BB}(n)\,\mathbf{C}_{BN}
\end{aligned} \tag{4}$$

따라서, 식(3)과 식(4)에 의해 입력전류 위상벡터 $\mathbf{I}_N(n)$과 선로전류 위상벡터 $\mathbf{I}_L(n)$을 풀이하면 식(5)과 같다.

$$\begin{aligned}
\mathbf{I}_N(n) &= \mathbf{Y}_{NN}(n)\,\mathbf{V}_N(n)\\
\mathbf{I}_L(n) &= \mathbf{Y}_{LN}(n)\,\mathbf{V}_N(n)
\end{aligned} \tag{5}$$

식(5)의 $\mathbf{Y}_{NN}(n)$와 $\mathbf{Y}_{LN}(n)$는 식(6) 및 식(7)과 같이 분해할 수 있으며 식(8)과 같이 표현되어진다.

$$\begin{pmatrix} I_{N_{MI}}(n) \\ I_{N_{UI}}(n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{N_{MI}N}(n) \\ Y_{N_{UI}N}(n) \end{pmatrix} V_N(n) \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} I_{L_M}(n) \\ I_{L_U}(n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{L_MN}(n) \\ Y_{L_UN}(n) \end{pmatrix} V_N(n) \quad (7)$$

$$I_{N_{MI}}(n) = Y_{N_{MI}N}(n)\, V_N(n)$$
$$I_{L_M}(n) = Y_{L_MN}(n)\, V_N(n) \quad (8)$$

여기서, $\mathbf{V}_{N_{MV}}(n)$, $\mathbf{I}_{N_{MI}}(n)$ 및 $\mathbf{I}_{L_M}(n)$을 측정값 벡터, $\mathbf{V}_{N_{MV}}(n)$, $I_{N_{MI}}(n)$ 및 $I_{L_M}(n)$과 측정오차 벡터, $\varepsilon_{N_{MV}}(n)$, $\varepsilon_{N_{MI}}(n)$ 및 $\varepsilon_{L_M}(n)$로 구성하면 식(9)와 같다.

$$\mathbf{V}_{N_{MV}}(n) = \mathbf{V}_{N_{MV}}(n) + \varepsilon_{N_{MV}}(n)$$
$$\mathbf{I}_{N_{MI}}(n) = I_{N_{MI}}(n) + \varepsilon_{N_{MI}}(n)$$
$$\mathbf{I}_{L_M}(n) = I_{L_M}(n) + \varepsilon_{L_M}(n) \quad (9)$$

여기서, $\mathbf{X}(n) = \mathbf{V}_N(n)$로 두고 $\mathbf{Z}(n)$ 및 $\mathbf{H}(n)$과 $\varepsilon(n)$으로 다시 나타내면 식(10)으로 나타낼 수 있으며 선형 고조파 측정 상태 변수 모델은 식(11)과 같다.

$$\mathbf{Z}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{N_{MV}}(n) \\ \mathbf{I}_{N_{MI}}(n) \\ \mathbf{I}_{L_M}(n) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{N_{MVN}} \\ \mathbf{Y}_{N_{MI}N}(n) \\ \mathbf{Y}_{L_MN}(n) \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon(n) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{N_{MV}}(n) \\ \varepsilon_{N_{MI}}(n) \\ \varepsilon_{L_M}(n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, $\mathbf{V}_{N_{MV}}(n) = \mathbf{K}_{N_{MVN}} \mathbf{V}_N(n)$, $\mathbf{K}_{N_{NMVN}} = [\mathbf{U}, \mathbf{0}]$

$$\mathbf{Z}(n) = \mathbf{H}(n)\,\mathbf{X}(n) + \varepsilon(n) \quad (11)$$

여기서, $\mathbf{H}(n)$는 n차 고조파에 대한 측정행렬이다.

각 성분의 모선표시는 시스템 방정식을 구성하는데 사용하거나, 초기 어드미턴스 행렬과 모선접속행렬에 사용한다. 따라서 기준 모선과 모든 가지 B의 설정을 제외한 모든 모선 N의 설정을 포함하는 지향된 그래프를 얻는다. 주입 전류의 측정은 식(12)이며 선로 전류의 측정은 식(13)이다.

$$I_N = [C_{BN}^T Y_{Prim} C_{BN}]\, V_N = [Y_{Nodal}]\, V_N \quad (12)$$

$$I_M = [C_{MB}] I_b = [C_{MB} Y_{Prim} C_{BN}] V_b \quad (13)$$

여기서 I_N은 모선 전류벡터, V_N는 모선 전압벡터, Y_{Prim}는 초기 어드미턴스 행렬, C_{BN}는 가지-모선 접속행렬, C_{MB}는 측정점-가지 접속행렬, I_b는 가지전류 벡터, I_M은 선로 전류 측정벡터이다.

2. 2. 고조파 상태 추정의 해석

전력시스템에 대하여 부분적으로 측정되어진 값들을 가지고 전체 시스템에 대하여 고조파 상태 추정을 수행하고자 할 때, 그 시스템의 가관측성을 확보하지 못하면 그 시스템에 대한 고조파 상태 추정 자체가 불가능하다. 가관측성 해석(Observability Analysis : OA)은 고조파 상태 추정을 수행할 수 있는지 없는지를 식별하는데 필수적인 해석이다. 가관측성 해석은 시스템의 토폴로지(topology)를 탐색함으로서 그 시스템이 관측 가능한지를 판별하고 고조파해석 측정 장비를 최적의 장소에 설치할 수 있는 방법이다.[10-12]

가. 가관측성 해석(Observability Analysis : OA)

고조파 상태 해석에 대한 수학적인 기본 개념은 선형 측정 상태 변수 모형으로 식(14)이다.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \varepsilon \quad (14)$$

여기서 Z는 M×1 측정 벡터, H는 M×S 측정 행렬, X는 S×1 상태 벡터, 그리고 ε는 M×1 측정오차 벡터이다.

상태 추정 방정식인 식(14)에서 유일 해법에 의해 해결할 수 있는 방법은 전력시스템 고조파 상태 해석을 위한 조건인 식(15)를 만족하여야한다.

$$rank\,(\mathbf{H}) = \mathbf{S} \quad (15)$$

H행렬의 차수는 측정의 성질에 영향을 받지 않는다. 그러므로 측정오차 벡터를 0으로 놓아도 가관측성 해석의 결과는 동일하다. 따라서 가관측성 해석을 위해 측정상태 변수 모형을 식(16)과 같은 선형 독립방정식으로 나타낸다.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} \quad (16)$$

나. 특이값 분해(Singular Value Decomposition : SVD)

대규모 전력시스템에서 고조파 상태 추정을 수행함에 있어 고조파 측정 장비의 비용으로 인해 측정 장비의 수량이 제한되기 때문에 모든 측정방정식이 완전한 행렬(completely-determined) 또는 과잉 행렬(over-determined)만이 될 수는 없다. 따라서 고조파 상태 추정을 위해 부분적 측정에 의한 시스템 분석이 필요하다. 일반적으로 고조파 상태 추정 기법은 h행렬에서 행(row)의 수가 열(column)의 수와 같거나 아님 더 많은 과잉 행렬일 때 수행된다. 최소 제곱법에서 측정방정식 $\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X}$을 푸는 일반적인 방정식은 식(17)과 같다.

$$[\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]\mathbf{x} = [\mathbf{H}^T]\mathbf{Z} \quad (17)$$

여기서 행렬 **R**은 대각행렬과 측정 공분산 행렬을 포함하고 있다.

미정 행렬(under-determined)의 경우, **[A]X=B**는 식(17)과 같은 일반적인 표준 기법으로 풀 수 없으므로 특이값 분해(Singular Value Decomposition : SVD)가 필요하다. 물론 미정행렬의 경우 특이값 분해만이 유일한 해법은 아니다. 그러나 특이값 분해는 가우스 소거법 및 LU 분해로 구하기 힘든 것을 수치해석적인 해답으로 풀 수 있고, 문제점을 정밀하게 분석하며 방향을 제시한다.

예를 들면, 특이값 분해는 $m\times n(m\le n)$으로 주어진 행렬 **A**를 식(18)로 분해할 수 있다.

$$\mathbf{A}=\mathbf{U}\mathbf{W}\mathbf{V}^{T} \tag{18}$$

여기서, **U**는 $m\times n$의 열 직교행렬이고, **W**는 양수 또는 0의 원소들을 대각선으로 하는 $n\times n$ 대각선 행렬이고, **V**는 $n\times n$ 직교행렬이다. 여기서, **U**와 **V**는 직교행렬이므로 식(19)로 표현된다.

$$\mathbf{U}'\mathbf{U}=\mathbf{V}\mathbf{V}'=\mathbf{I} \tag{19}$$

행렬 **A**가 $n\times n$ 정방행렬일 경우 **U**, **W** 및 **V**는 모두 $n\times n$ 정방행렬이 된다. 따라서 **C**의 역행렬은 식(20)이다.

$$\mathbf{A}^{-1}=\mathbf{V}[\mathrm{diag}(1/\mathbf{W}_{ii})]\mathbf{U}' \tag{20}$$

Wii중의 하나가 0이 되거나, 그 값이 너무 작아서 라운드 오프 오차(round off error)가 생길 경우, 행렬은 특이값 행렬이 된다. 판별값(condition number) 은, **Wii**중의 최대 값을 Wii중의 최소 값으로 나눈 값이다. 이러한 판별값이 ∞이면 특이값이고, 판별값이 대단히 큰 경우를 조건이 나쁘다고(ill-condition) 일컫는다. 따라서 수치적 오차인 라운드 오프 오차(round off error)를 제거하기 위하여 널 공간 벡터(null space vector)를 이용하였다.

특이값 분해를 이용한 또 다른 이유는 관측하지 않는 시스템에 대한 상태변수를 소거 할 수 있기 때문이다. 예로 미지수(u), 기지 측정값(k)과 요구하지 않은 주입전류(n)로 분할하면 식(21)이다.

$$\begin{bmatrix}\mathbf{Y}_{1u}\mathbf{Y}_{2u}\\ \mathbf{Y}_{1k}\mathbf{Y}_{2k}\\ \mathbf{Y}_{3u}\mathbf{Y}_{3k}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{V}_{u}\\ \mathbf{V}_{k}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{I}_{bu}\\ \mathbf{I}_{bk}\\ \mathbf{I}_{bn}\end{bmatrix} \tag{21}$$

보조 벡터 $\mathbf{I}_{bu}$은 최소 제곱법에 의해 식(22)로 풀이 할 수 있다.

$$\mathbf{I}_{bu}=\mathbf{Y}_{1u}\mathbf{Y}_{2u}^{-1}\mathbf{I}_{bk}+(\mathbf{Y}_{1k}-\mathbf{Y}_{1u}\mathbf{Y}_{2u}^{-1}\mathbf{Y}_{2k})\mathbf{V}_{k} \tag{22}$$

여기서 $\mathbf{Y}_{2u}^{-1}$는 유사 역행렬이다.

미정행렬에서는 고조파 상태 추정의 상태변수가 복잡한 값으로 나타나므로 실수값과 허수값의 구성을 분할하는 것도 문제가 된다. 따라서 특이값 분해에서 실수값과 허수값으로 분할하기위해 표준 실수치 수치 절차를 이용한다. 측정 방정식 **Z=[H]X**의 변환된 항은 식(23)이며 식(24)와 같이 구성한다.

$$\begin{aligned}\mathbf{x}&=\mathbf{x}_R+j\mathbf{x}_I\\ \mathbf{z}&=\mathbf{z}_R+j\mathbf{z}_I\\ \mathbf{h}&=\mathbf{h}_R+j\mathbf{h}_I\end{aligned} \tag{23}$$

$$\mathbf{Z}=\begin{bmatrix}\mathbf{z}_R\\ \mathbf{z}_I\end{bmatrix},\quad [\mathbf{H}]=\begin{bmatrix}\mathbf{h}_R & -\mathbf{h}_I\\ \mathbf{h}_I & \mathbf{h}_R\end{bmatrix},\quad \mathbf{X}=\begin{bmatrix}\mathbf{x}_R\\ \mathbf{x}_I\end{bmatrix} \tag{24}$$

상태 변수를 찾기 위한 고조파 상태 추정의 흐름도는 그림 1과 같다.

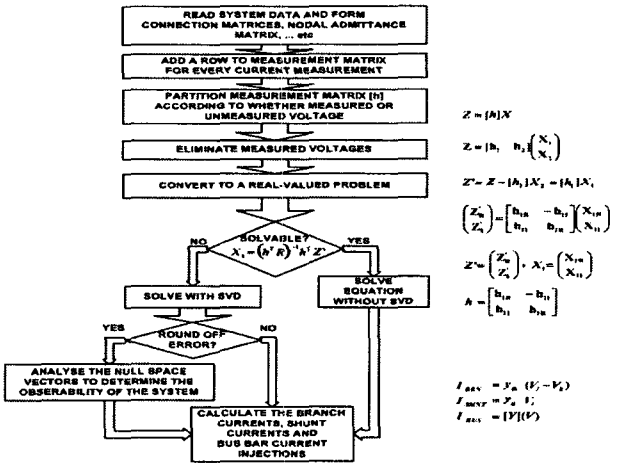


그림 1. 고조파 상태 추정 흐름도

Fig. 1 Flow chart of harmonic state estimation

3. 면역 알고리즘 적용

3.1 면역 알고리즘

면역 알고리즘의 기본이 되는 두 가지의 면역 시스템 이론은 소매틱 이론(somatic theory) 네트워크 가설(network hypothesis)이다. 소매틱 이론은 면역계의 다양한 항체 생성 능력을 설명하는 이론이며, 네트워크 가설은 면역계의 자기조절 능력을 설명하는 이론이다. 먼저 소매틱 이론이란 항체는 림프구인 B세포로부터 생산되지만 그 B세포는 림프계간 세포에서 세포분열을 반복하면서 발생 분화한 것이다. B세포는 항원에 붙어서 활성화되고 세포 분열하여 항체 생성 세포가 되어 항체를 만들어 낸다. 그리고 일부는 기억세포가 되어 면역적 기억(immune memory)이 되어 나타난다. 생체는 이러한 림프계간 세포로부터 B세포, 그리고 B세포로부터 항체 생성 세포로의 분화가 항상 내부에서 이루어지며 이 과정에서의 돌연변이에 의해 다양한 항체를 생산함을 말하는 이론이며, 네트워크 가설이란 각각의 B세포의 클론은 무관계하게 존재하는 것이 아니라 항원 수용체 서로간의 이디오 타입을

인식하여 림프구 집단은 전체로서 폐쇄적인 네트워크를 형성하고 있다는 이론이다. 이 이론에 기초하여 보면 어떤 클론이 서로 다른 항원 자극에 의해 활성화되어 증식한다. 따라서 이러한 반응이 연쇄적으로 일어나면 이들은 자기에 대해서도 면역성을 나타내고 림프구 전체가 면역 응답의 조절기구로 작용한다. 또한, 방대한 양의 병원체들을 인식하기 위해 림프구 집단은 다양한 항원 수용체를 가져야 하지만 하나의 림프구는 하나의 수용체만을 생성할 수 있기 때문에 상당히 제안된 수의 항원만을 인식할 수 있다. 그러나 다양한 항원 수용체를 만들어 내기 위해 수용체에는 항체 유전자들의 재조합(recombination), 체강 돌연변이(somatic mutation) 등으로 인해 더욱더 많은 수의 수용체를 생성할 수 있게 된다. 이를 면역 시스템의 다양성이라고 한다. 그러나 임의적으로 수용기가 생성되면 자기 자신의 세포를 인식하여 자신의 해를 입힐 수도 있다. 이를 막기 위해 자기 세포를 인식하는 과정이 이루어진다[17, 18].

3.2 면역 알고리즘의 구현

소매틱 이론과 네트워크 가설을 기초로 면역 알고리즘 수행 방법에 대해서 설명한다. 이 알고리즘을 최적화 문제의 해 탐색 알고리즘과 대응시켜 보면 항원은 최적화 문제의 제약 조건과 목적 함수이며, 항체가 최적화 문제의 해가 되며 항원과 항체의 친화도가 해의 적합도 값에 해당된다. 면역 알고리즘 각각의 계산 절차는 그림 2와 같이 나타낼 수 있고 각 단계는 다음과 같다.

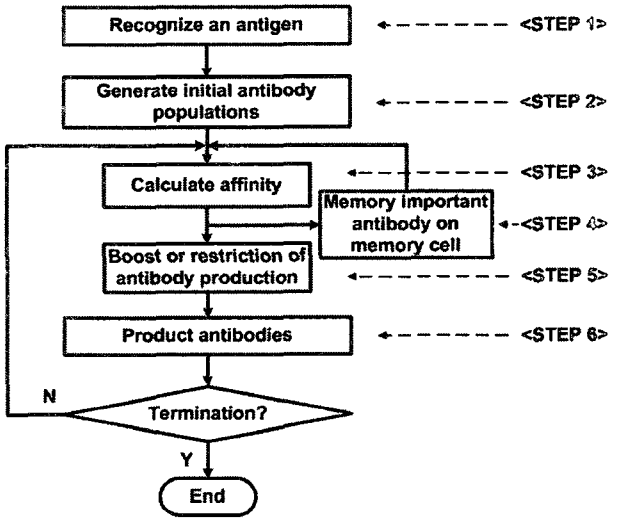


그림 2. 면역 알고리즘
Fig. 2 Flowchart of Immune Algorithm

[Step 1] 항원의 인식

면역 시스템이 항원을 입력 정보로서 인식한다. 목적함수와 제약 조건 등이 이러한 입력 정보에 해당한다. 다시 말해서 최적화 문제를 정의하는 부분이다.

[Step 2] 초기 항체집단의 생성

최초의 과정에서는 유효한 항체를 무작위로 발생시킨다. 이들 중에서 우수한 항체들을 기억 세포로 저장한다.

[Step 3] 친화도 계산

항원과 항체 v의 친화도 $\mathbf{aff}_v$와 항체 v와 항체 w의 친화도 $\mathbf{aff}_{v,w}$을 계산한다. 이는 다음 단계에서 행하는 기억 세포로의 분화를 하기 위해 필요한 과정으로 식(25)를 이용한다.

$$\mathbf{aff}_{v,w} = \frac{1}{(1+\mathbf{H}(2))} \tag{25}$$

여기서, $\mathbf{H}(2)$는 항체 v와 항체 w만의 정보 엔트로피이다. 이 친화도의 값은 0에서 1의 값을 가지며 $\mathbf{H}(2)=0$일 때 항체 v와 항체 w간의 유전자는 완전하게 일치한다.

$$\mathbf{aff}_v = \mathbf{opt}_v \tag{26}$$

여기서, $\mathbf{opt}_v$는 항체의 평가치로서 항원과 항체 v와의 결합 강도를 나타내며, $\mathbf{aff}$는 친화도로서 유전 알고리즘의 적합도에 상응한다. 본 논문에서와 같이 평가치의 최소값 탐색 문제의 경우에는 식(26)은 식(27)과 같이 된다.

$$\mathbf{aff}_v = \frac{1}{1+\mathbf{opt}_v} \tag{27}$$

[Step 4] 기억 세포로의 분화

[Step 3]에서 구한 항원과의 친화도가 높은 항체를 기억 세포에 추가한다. 기억 세포의 수에는 제한이 있기 때문에 추가하는 세포에 현재 보존 중인 기억 세포 중에서 항체와 항체간의 친화도가 가장 높은 항체를 소멸시키고 새로이 분화된 항체간 친화도가 높은 항체를 추가한다. 그러므로 항체가 항상 다양성을 지닌다. 구체적으로는 추가된 항체와 데이터베이스의 각 항체와의 친화도를 식(25)에 의해 계산하고, 가장 친화도가 높은 항체를 제거하여 추가된 항체에 바꾼다.

[Step 5] 항체 생성의 촉진과 억제

차세대에 남은 항체 i의 기대치 e_i를 식(28)에 의해 계산하고, 기대치가 낮은 항체를 소멸시킨다.

$$e_i = \frac{aff_i}{c_i} \tag{28}$$

여기서, c_i는 항체의 농도로써 식(29)와 같이 구해진다.

$$c_i = \frac{\text{항체 } i\text{와 같은 친화도를 가진 항체의 수}}{\text{항체의 총수 } N} \tag{29}$$

식(28)에 의하면 항원과 항체의 친화도가 높은 항체일수록 차세대에 남을 확률이 높고, 농도가 높은 항체일수록 차세대에 남을 확률이 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서 면역 체계는 친화도가 높은 항체의 생산을 촉진하며 면역계 전체에 차지하는 배합이 높은 항체의 생성을 억제한다. 즉, 면역계에 있어서 다양성의 조절기구로 작용한다.

[Step 6] 항체의 생성

항원에 대해서 IA는 [Step 5]에서 제거된 항체를 대신할 새로운 항체를 증식한다. 다음에 [Step 5]에 남아있는 항체와 새로이 생성된 항체에 대하여 무작위 쌍들을 선택하여 유전자의 복제 및 돌연변이 연산을 통한 교배 과정을 거쳐 새로운 항체를 거쳐 생성한다. 이는 항체의 무작위 발생보다 좀 더 효과적인 것으로 기대된다. 이 단계를 마치고 다시 Step 3으로 되돌아가면 무한의 새로운 항원에 대응하는 항체를 생성할 수 있다.

3.3 면역 알고리즘을 적용하여 최적 측정 위치 선정

본 논문에서는 전력시스템 고조파 상태 추정에 있어서 고조파해석 측정 정비의 비용과 상태추정 오차를 최소화하는 최적 측정위치를 선정하기 위해 면역 알고리즘을 이용하여 고조파 상태 추정 최적 알고리즘을 제안하였다.

면역 시스템은 다양한 항원에 대항하여 항체를 생성할 수 있는 능력을 가지고 있다. 면역 시스템의 항원·항체 반응에 기초한 면역 알고리즘은 최적화 되어지는 파라미터 선정 및 탐색 공간의 설정을 위해 다양한 항체를 생성하여 항원과의 친화도 계산을 통해 최적해를 탐색한다. 항체의 생성과정은 초기에 항원과 결합을 위한 초기 항체 생성과 소멸된 항체를 새로이 생성하는 과정으로 나눌 수 있으며, 다음과 같은 두 가지 형태의 생성 과정으로 표현할 수 있다.

(1) 초기항체의 생성 (Initial Production of Antibody from Memory Cell)

사전에 기억된 세포들로부터 항체를 생성한다. 기억세포에는 우수한 항체들이 보존되어 있으며 항원·항체 반응에서 우수한 개체는 다시 기억세포로 분화되기도 한다. 본 논문에서 최적화하고자하는 파라미터는 고조파 상태를 측정할 수 있는 측정 위치이므로 측정할 경우에는 "1"로, 측정하지 않을 경우 "0"의 항체로 구성하였다.

(2) 항체의 증식 (Proliferation of Antibody)

진화 과정에서 소멸된 항체를 새로이 생성하는 과정이로서, 본 논문에서는 유전자의 복제 및 돌연변이 연산을 통한 교배 과정을 거쳐 새로운 항체를 거쳐 생성하도록 하였다. 단, 교배, 돌연변이 조작법 및 그 확률은 임의로 설정하였다.

면역 알고리즘을 이용한 고조파 상태 추정 최적 알고리즘의 목적 함수는 측정 장비 비용과 상태 추정 오차로 식(30)과 같이 구성하고. 이 평가 함수를 최소화 하고자 한다. 또한, 면역 알고리즘을 이용하여 고조파 상태 추정의 최적화를 위한 친화도 계산은 최적화하고자 하는 목적 함수 opt_v가 최소일 때 가장 큰 값인 1을 가지도록 식(31)과 같이 정의하였다.

$$\mathbf{Min}\left\{ \mathbf{opt}_{v} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{Cost}_{i} + \mathbf{V}_{\mathbf{BUSerror}} + \mathbf{I}_{\mathbf{BUSerror}} + \mathbf{I}_{\mathbf{Brancherror}} \right\} \tag{30}$$

단, $\mathbf{Cost}_i = \alpha + \mathbf{Ch}\beta$, (α=\$20,000, β=\$2,000) (i=1,…n, n은 모선 수)

$$\mathbf{Affinity}_{v} = \frac{1.0}{1.0 + \mathbf{opt}_{v}} \tag{31}$$

여기서 $\mathbf{Cost}_i$는 각 모선에 대한 고조파해석 측정 장비의 비용, Ch는 추가적인 채널 수, $\mathbf{V}_{\mathbf{BUS\ error}}$는 모선전압 오차, $\mathbf{I}_{\mathbf{BUS\ error}}$는 모선전류 오차, $\mathbf{I}_{\mathbf{Branch\ error}}$는 선로전류 오차이다. 여기서 측정 장비의 비용은 기본적인 설치비용인 측정 장비 한대의 가격(α)와 측정 장비에 포함되어 있는 채널의 추가적인 비용(β)로 구성하였으며, 상태 추정 오차는 모선전압 오차, 모선전류 오차 및 선로전류 오차로 구성하였다. 면역 알고리즘을 이용한 전력시스템 고조파 상태 추정의 흐름도는 그림 3과 같다.

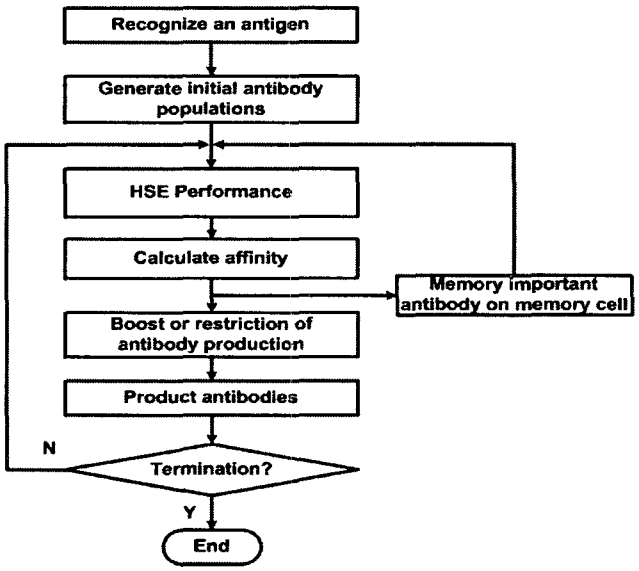


그림 3. 면역알고리즘을 이용한 고조파 상태 추정 흐름도

Fig. 3 Flowchart of harmonic state estimation using IA

4. 사례 연구

4.1 축약 HSE

본 논문에서 전력시스템 HSE를 수행하기 위해 9모선 전력시스템에 적용하였다. 그림 4는 부하 측과 인접하는 다른 모선 및 선로를 고려하여 축약 알고리즘을 적용하여 측정위치를 선정한 것이다.

그림 4에서 전압 측정 모선은 5, 7, 8모선, 입력 전류 측정 모선은 2, 4, 5, 6, 7, 8모선이다. HSE을 수행한 결과 모선 전압, 모선 전류 및 선로 전류에서 오차가 발생되어지는데 이 오차는 수치적 오차인 라운드 오프 오차(round off error)이므로 널 공간 벡터(null space vector)를 수행하여 오차를 제거하였다. 따라서 모선 전압, 모선 전류 및 선로 전류의 오차는 0%로 나타났다. 모선 전압과 모선 전류 및 선로전류의 크기와 위상에 대한 실제 값과 추정 값을 비교하여 각각 표 1, 2, 3 및 그림 5, 6, 7에 나타내었다.

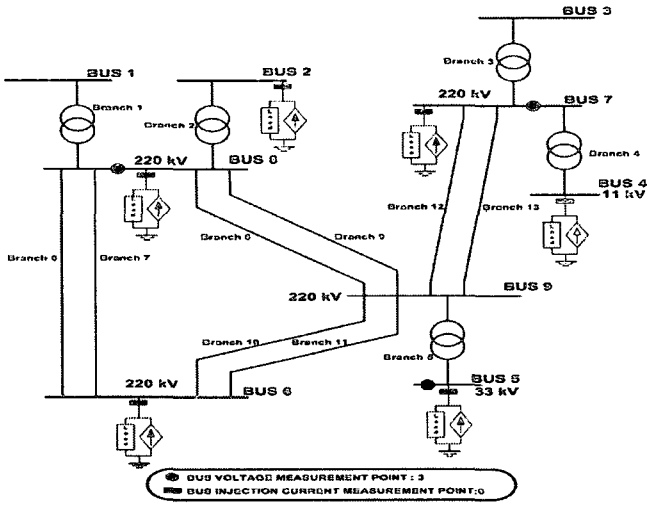


그림 4. 축약 측정위치

Fig. 4 Reduced measurement placement

표 1. 고조파 모선 전압

Table 1. Harmonic bus voltage

BUS No.	Actual		Estimated		Error (%)
	Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	
1	0.00502	27.03069	0.00502	27.03069	0.00
2	0.00502	26.98089	0.00502	26.98089	0.00
3	0.00501	26.48450	0.00501	26.48450	0.00
4	0.00500	26.25757	0.00500	26.25757	0.00
5	0.00502	27.84543	0.00502	27.84543	0.00
6	0.00504	27.37857	0.00504	27.37856	0.00
7	0.00501	26.71206	0.00501	26.71206	0.00
8	0.00503	27.07196	0.00503	27.07196	0.00
9	0.00502	27.21706	0.00502	27.21706	0.00

표 2. 고조파 주입 전류

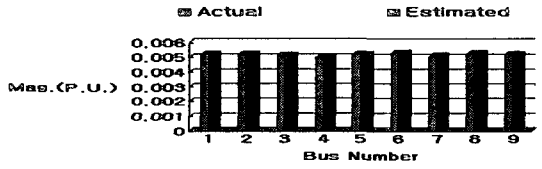
Table 2. Harmonic current injection

BUS No.	Actual		Estimated		Error (%)
	Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	
1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00
2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00
3	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00
4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00
5	0.00900	25.00000	0.00900	25.00000	0.00
6	0.00500	10.00000	0.00500	10.00000	0.00
7	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00
8	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00
9	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00

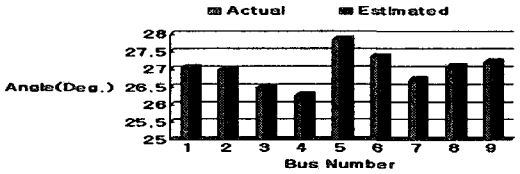
표 3. 선로 고조파 전류

Table 3. Branch harmonic currents

Branch No.		Actual		Estimated		Error (%)
		Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	
1	S	0.710E-03	162.030	0.710E-03	162.031	0.00
	R	0.710E-03	162.030	0.710E-03	162.031	0.00
2	S	0.103E-02	-167.055	0.103E-02	-167.054	0.00
	R	0.103E-02	-167.055	0.103E-02	-167.054	0.00
3	S	0.257E-02	-167.012	0.257E-02	-167.010	0.00
	R	0.257E-02	-167.012	0.257E-02	-167.010	0.00
4	S	0.515E-02	12.221	0.515E-02	12.221	0.00
	R	0.515E-02	12.221	0.515E-02	12.221	0.00
5	S	0.648E-02	-149.444	0.648E-02	-149.444	0.00
	R	0.648E-02	-149.444	0.648E-02	-149.444	0.00
6	S	0.615E-03	173.123	0.615E-03	173.123	0.00
	R	0.521E-03	-140.310	0.521E-03	-140.311	0.00
7	S	0.615E-03	173.123	0.615E-03	173.123	0.00
	R	0.521E-03	-140.310	0.521E-03	-140.311	0.00
8	S	0.245E-03	-160.927	0.245E-03	-160.927	0.00
	R	0.294E-03	-118.389	0.294E-03	-118.389	0.00
9	S	0.245E-03	-160.927	0.245E-03	-160.927	0.00
	R	0.294E-03	-118.389	0.294E-03	-118.389	0.00
10	S	0.106E-02	161.809	0.106E-02	161.808	0.00
	R	0.958E-03	168.150	0.958E-03	168.149	0.00
11	S	0.106E-02	161.809	0.106E-02	161.808	0.00
	R	0.958E-03	168.150	0.958E-03	168.149	0.00
12	S	0.386E-02	-167.522	0.386E-02	-167.522	0.00
	R	0.380E-02	-163.866	0.380E-02	-163.866	0.00
13	S	0.386E-02	-167.522	0.386E-02	-167.522	0.00
	R	0.380E-02	-163.866	0.380E-02	-163.866	0.00



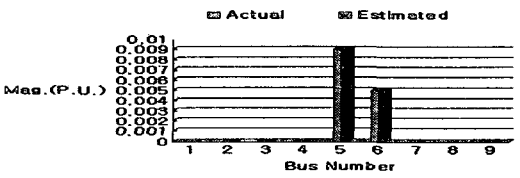
(a) Harmonic bus voltage magnitude



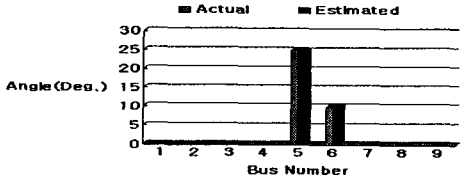
(b) Harmonic bus voltage angle.

그림 5. 고조파 모선 전압

Fig. 5 Harmonic bus voltage of Reduced measurement placement.



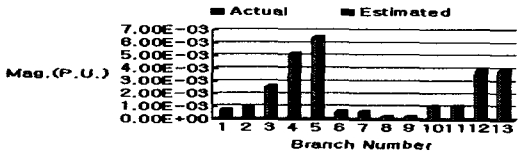
(a) Harmonic current injection magnitude



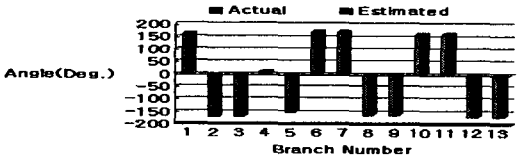
(b) Harmonic current injection angle.

그림 6. 고조파 주입 전류

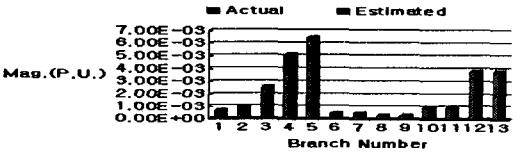
Fig. 6 Harmonic current injection of Reduced measurement placement.



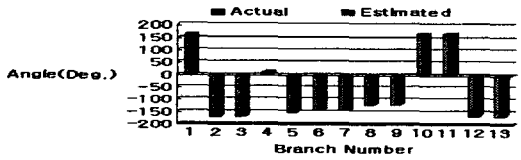
(a) Send branch harmonic current magnitude.



(b) Send branch harmonic current angle.



(c) Receive branch harmonic currents magnitude



(d) Receive branch harmonic currents angle.

그림 7. 선로 고조파 전류

Fig. 7 Receive branch Harmonic current of Reduced measurement placement.

축약 알고리즘을 적용한 경우 측정위치에 따른 고조파 해석 측정 장비의 비용은 2모선, 4모선, 6모선에서는 $20,000이고 5모선, 7모선, 8모선에서는 $22,000이므로 전체적인 측정 장비의 비용은 $126,000으로 산출된다.

4.2 IA를 적용한 HSE

전력시스템 HSE에 IA를 적용한 HSE 최적 측정 위치 선정을 그림 8에 나타내었다. 전압 측정 모선은 5, 7, 8, 9모선, 입력 전류 측정모선은 4, 5, 7, 8, 9모선이다.

전력시스템 HSE에 있어 IA를 적용하여 HSE를 수행한 경우에 모선 전압, 모선 전류 및 선로 전류에 수치적 오차인 라운드 오프 오차(round off error)가 발생되어지며 널 공간 벡터(null space vector)를 수행하여 오차를 제거하였다. 따라서 모선 전압, 모선 전류 및 선로 전류의 오차는 0%로 나타났다. 그 결과 모선 전압과 모선 전류 및 선로 전류의 크기와 위상에 대한 실제 값과 추정 값을 비교하여 각각 표4, 5, 6 및 그림 9, 10, 11에 나타내었다.

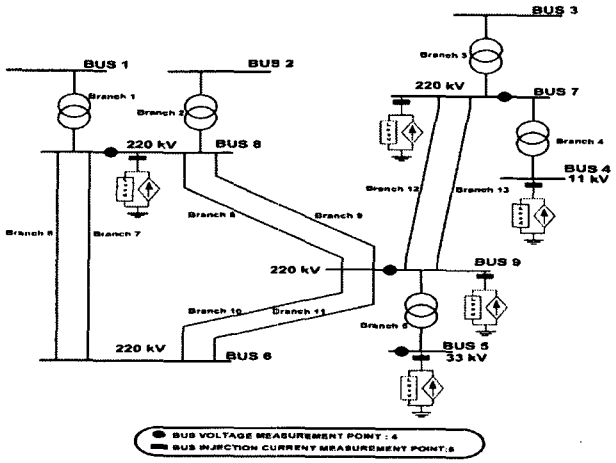


그림 8. 면역알고리즘을 이용한 최적 측정 위치

Fig. 8. Optimized measurement placement using IA

표 4. 고조파 모선 전압

Table 4. Harmonic bus voltage.

BUS No.	Actual		Estimated		Error (%)
	Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	
1	0.00502	27.03069	0.00502	27.03069	0.00
2	0.00502	26.98089	0.00502	26.98089	0.00
3	0.00501	26.48450	0.00501	26.48450	0.00
4	0.00500	26.25757	0.00500	26.25757	0.00
5	0.00502	27.84543	0.00502	27.84543	0.00
6	0.00504	27.37857	0.00504	27.37857	0.00
7	0.00501	26.71206	0.00501	26.71206	0.00
8	0.00503	27.07196	0.00503	27.07196	0.00
9	0.00502	27.21706	0.00502	27.21706	0.00

표 5. 고조파 주입 전류

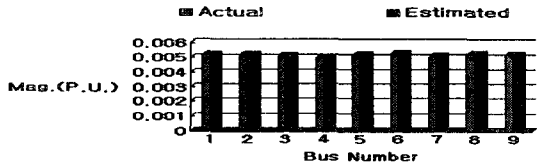
Table 5. Harmonic current injection.

BUS No.	Actual		Estimated		Error (%)
	Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
5	0.0090	25.0000	0.0090	25.0000	0.00
6	0.0050	10.0000	0.0050	10.0010	0.00
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00

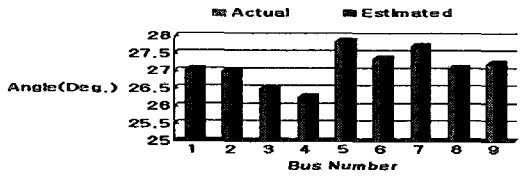
표 6. 선로 고조파 전류

Table 6. Branch harmonic current.

Branch No.		Actual		Estimated		Error (%)
		Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	Magnitude (Per Unit)	Angle (Degree)	
1	S	0.710E-03	162.030	0.710E-03	162.030	0.00
	R	0.710E-03	162.030	0.710E-03	162.030	0.00
2	S	0.103E-02	-167.055	0.103E-02	-167.052	0.00
	R	0.103E-02	-167.055	0.103E-02	-167.052	0.00
3	S	0.257E-02	-167.012	0.257E-02	-167.010	0.00
	R	0.257E-02	-167.012	0.257E-02	-167.010	0.00
4	S	0.515E-02	12.221	0.515E-02	12.221	0.00
	R	0.515E-02	12.221	0.515E-02	12.221	0.00
5	S	0.648E-02	-149.444	0.648E-02	-149.444	0.00
	R	0.648E-02	-149.444	0.648E-02	-149.444	0.00
6	S	0.615E-03	173.123	0.615E-03	173.124	0.00
	R	0.521E-03	-140.310	0.521E-03	-140.310	0.00
7	S	0.615E-03	173.123	0.615E-03	173.124	0.00
	R	0.521E-03	-140.310	0.521E-03	-140.310	0.00
8	S	0.245E-03	-160.927	0.245E-03	-160.927	0.00
	R	0.294E-03	-118.389	0.294E-03	-118.389	0.00
9	S	0.245E-03	-160.927	0.245E-03	-160.927	0.00
	R	0.294E-03	-118.389	0.294E-03	-118.389	0.00
10	S	0.106E-02	161.809	0.106E-02	161.811	0.00
	R	0.958E-03	168.150	0.958E-03	168.152	0.00
11	S	0.106E-02	161.809	0.106E-02	161.811	0.00
	R	0.958E-03	168.150	0.958E-03	168.152	0.00
12	S	0.386E-02	-167.522	0.386E-02	-167.522	0.00
	R	0.380E-02	-163.866	0.380E-02	-163.866	0.00
13	S	0.386E-02	-167.522	0.386E-02	-167.522	0.00
	R	0.380E-02	-163.866	0.380E-02	-163.866	0.00



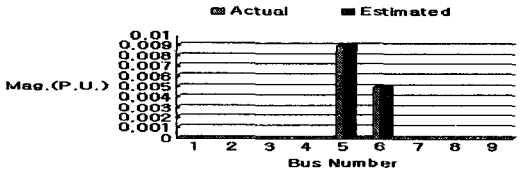
(a) Harmonic bus voltage magnitude



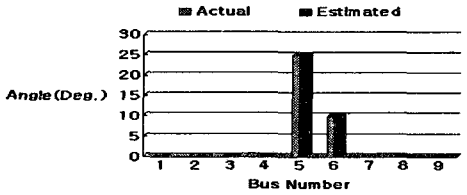
(b) Harmonic bus voltage angle.

그림 9. 고조파 모선 전압

Fig 9. Harmonic bus voltage of optimized measurement placement using IA.



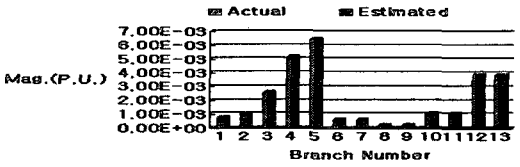
(a) Harmonic current injection magnitude.



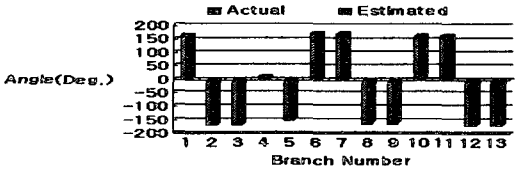
(b) Harmonic current injection angle.

그림 10. 고조파 주입 전류

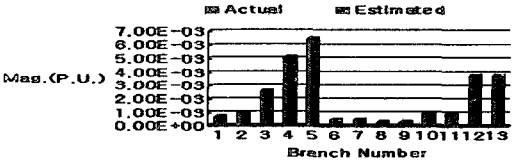
Fig. 10. Harmonic current injection of optimized measurement placement using IA.



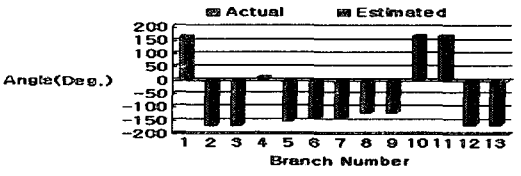
(a) Send branch harmonic current magnitude.



(b) Send branch harmonic current angle.



(c) Receive branch harmonic current magnitude.



(d) Receive branch harmonic current angle.

그림. 11. 선로 고조파 전류

Fig. 11 Receive branch Harmonic current of optimized measurement placement using IA.

IA를 적용한 HSE 최적 측정위치에 따른 고조파 해석 측정 장비의 비용은 4모선은 $20,000이며 5모선, 7모선, 8모선, 9모선에서는 $22,000이므로 전체적인 측정 장비의 비용은 초기 측정위치보다 $18,000 적은 $108,000의 비용이 산출된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소(02340-·17) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] F. C., Schweppe, J. C., Wildes, and D., Rom, "Power System Static State Estimation", Part Ⅰ,ⅡandⅢ, IEEE Trans. Power Appar. & Syst. Vol PAS-89, pp 120-135. (1970).

[2] G. T., Heydt, "Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.1, pp 569-576 (1989).

[3] M., Najjar and G. T., Heydt "A Hybrid Nonlinear - Least Squares Estimation of Harmonic Signal Levels in Power Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, No.1, pp 282-288 (1991).

[4] J. E., Farach, W. M., Grady and A., Arapostathis, "An Optimal Procedure for Placing Sensors and Estimating the Locations harmonic Sources in Power Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.3, pp 1303-1310 (1993).

[5] G. T. Heydt, "Identification of harmonic sources by a state estimation technique", IEEE Trans, PWRD-4,(1), pp.569-576 (1989).

[6] A. P. S. Meliopoulos, F, Zhang and S, Zelingher "Power System Harmonic State Estimation", Proceedings of IEEE/PES 1994 Winter Meeting, New York, USA. (1994).

[7] Z. P., Du, J. Arrillaga, N. R., Watson, "Continuous harmonic state estimation of power systems", Proc. IEE, C, 143, (4), pp. 329-336 (1996).

[8] J., Arrillaga, N. R., Watson, S., Chen, "Power system quality Assessment" (1996).

[9] S., Aam, L., Holten and O., Gjerde, "Design of the Measurement System for State Estimation in the Norwegian High-Voltage Transmission Network", IEEE Trans. Power Appar. & Syst. Vol. PAS-102, pp. 3769-3777 (1983).

[10] G. R., Krumpholz, K. A., Clements and P. W., Davis, "Power System Observability : A Practical Algorithm Using Network Topology", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 99, No. 4, pp. 1534-1542. (1980).

[11] G. C., Contaxis, and G. N., Korres, "A Reduced Model for Power System Observability Analysis and Restoration", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 1411-1417 (1988).

[12] T. L., Baldwin, L., Mili, M. B., Boisen and P., Adapa, "Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 707-715 (1993).

[13] Y. P., Wang. N. R., Watson, J., Arrillaga., H. C., Park and H. H., Chong, "Haromonic State Estimation : Optimal Placement of Measurements Using Genetic Algorithms", International Power Quality Conference, Suntec, Singapore, Vol. 2, No. 2, pp. 534-544 (2002).

[14] S., Osowski, "SVD Technique for Estimation of Harmonic Components in A Power System: A Statistical Approach", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 141, No, 5, pp. 473-479 (1994)

[15] N. R., Watson and J., Arrillaga, "Assessment of Power System Harmonics, Part Ⅰ: Overview" (1993).

[16] N. R., Watson and J., Arrillaga, "Assessment of Power System Harmonics, Part Ⅱ : The Direct Method" (1993).

[17] Dipankar dasgupta, Artificial immune system and their application, Published by Springer, 1998.

[18] K. Mori, M. Tsukiyama and T. Fukuda, "Multi-Optimization by Immune Algorithm which Diversity and Learning", 2nd Int. Conf. on Multi-Agent Systems, Workshop Notes on Immunity-Based Systems, pp. 118-123, 1996.

저 자 소 개

왕 용 필 (王 龍 泌)

1966년 8월 25일생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1999년-2001년 뉴질랜드 Canterbury University(Post- Doc). 현재 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 BK 교수. 관심분야 : 직류송전 시스템 해석 및 제어설계, 전자기 과도현상, 전력품질
Tel : 051-200-6944, Fax : 051-200-7743
E-mail : ypwang@smail.donga.ac.kr

박 인 표 (朴 寅 杓)

1977년 2월 13일생. 2002년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 한국전기연구원 전력연구단 전기환경송전연구그룹 위촉연구원. 관심분야 : 전력품질 및 전력시스템
Tel : 055-280-1344, Fax : 055-280-1390
E-mail : ippark@keri.re.kr

정 형 환 (鄭 亨 煥)

1941년 1월 19일생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 관심분야 : 직류송전 시스템 해석 및 제어설계, 전자기 과도현상, 전력품질
Tel : 051-200-7733, Fax : 051-200-7743
E-mail : hhchong@daunet.donga.ac.kr