

전력시스템 고조파 상태 추정에서 GA를 이용한 최적 측정위치 선정

論 文

52A-8-6

Optimal Placement of Measurement Using GAs in Harmonic State Estimation of Power System

鄭亨煥* · 王龍泌** · 朴熙徹*** · 安秉喆§

(Hyeng-Hwan Chung · Yong-Peel Wang · Hee-Chul Park · Byung-Chul An)

Abstract - The design of a measurement system to perform Harmonic State Estimation (HSE) is a very complex problem. Among the reasons for its complexity are the system size, conflicting requirements of estimator accuracy, reliability in the presence of transducer noise and data communication failures, adaptability to change in the network topology and cost minimization. In particular, the number of harmonic instruments available is always limited. Therefore, a systematic procedure is needed to design the optimal placement of measurement points.

This paper presents a new HSE algorithm which is based on an optimal placement of measurement points using Genetic Algorithms (GAs) which is widely used in areas such as; optimization of the objective function, learning of neural networks, tuning of fuzzy membership functions, machine learning, system identification and control.

This HSE has been applied to the Simulation Test Power System for the validation of the new HSE algorithm. The study results have indicated an economical and effective method for optimal placement of measurement points using Genetic Algorithms (GAs) in the Harmonic State Estimation (HSE).

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

1. 서 론

최근 전력시스템에서 고조파 문제에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 이는 전력시스템에 연결된 비선형 부하들의 증가로 인한 정상상태의 전류와 전압이 비정현 전류와 전압으로 구성된 고조파의 발생으로 인해 정현과가 왜곡되기 때문이다. 전력시스템에서 고조파 왜곡은 전기 설비의 과열과 파괴, 보호 장치의 오동작 그리고 통신 회로들의 간섭과 같은 연속된 문제점을 발생시켜 소비자들에게 공급되는 전기의 품질을 저하시킨다. 이와 같은 고조파를 제거하거나 또는 제한하기 위해 전력시스템의 전역에 걸쳐서 고조파 위치와 크기에 대한 모든 정보를 얻을 수 있는 효과적이고 능률적인 방법에 관한 연구가 필요하다.

전력시스템에서 고조파 상태 추정(Harmonic State Estimation : HSE)은 모선과 선로의 부분 혹은 전체를 선택하여 고조파를 측정함으로써 실제시스템의 고조파 정보를 얻을 수 있는 효과적이고 경제적인 기법이다[1,2]. 그러나 전력시스템에서 고조파 상태 추정을 수행하기 위해 측정 시스템을 설계하는 것은 매우 복잡한 문제이다. 이런 복잡한 문제는 시스템의 크기, 측정기에 필요한 정확성의 불일치, 데이터

통신고장과 변환기에 존재하는 잡음, 네트워크 위상 변화의 적응성과 비용의 최소화에 의존한다. 또한 고조파 측정 장비 비용의 감소에 따른 추정을 신뢰할 수 있어야 한다.

고조파 추정을 위해 사용가능한 측정 장비인 연속 실시간 고조파 해석 장비(Continuous Harmonic Analysis in Real Time : CHART)의 수량은 비용으로 인해 제한되어 있다. 그러므로 고조파 상태 추정을 수행하기 위한 최적 측정위치를 선정하는 체계적인 방법이 필요하다[1-9].

본 논문에서는 전력시스템의 고조파 상태 추정에 있어서 최적 탐색기법인 유전알고리즘(Genetic Algorithms : GAs)을 이용해서 최적 측정위치를 선정하는 새로운 GA-HSE를 제안하였다. 유전알고리즘은 자연선택과 진화적인 유전학의 메카니즘을 토대로 한 확률적인 최적화 알고리즘으로서, 기존의 경사(gradient)에 기초로 한 탐색 알고리즘과 달리 유전알고리즘은 미분 가능성 및 연속성과 같은 탐색공간을 필요로 하지 않으며, 다수의 극대점을 병렬로 탐색하는 최적 탐색기법이다[10].

제안한 GA-HSE 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 전력시스템에 적용하여 고조파 상태 추정을 수행하였다. 이때 측정위치를 축약한 경우와 유전알고리즘을 이용하여 최적 측정위치를 선정한 경우에 고조파 상태 추정을 수행하여 비교 검토 하였다. 고조파 상태 추정 결과 두 경우 모두 상태 추정오차는 최소화 되었다. 그러나 유전알고리즘을 이용하여 최적 측정위치를 선정한 경우가 측정위치를 축약한 경우보다 측정 장비 비용이 최소화 되었다. 이상에서 전력시스템의 고조파 상태 추정에 있어서 유전알고리즘을 이용한 최적 측정위치 선정은 매우 경제적이고 효과적인 방법임을 나타내었다.

* 正 會 員 : 東亞大 電氣電子컴퓨터工學部 教授 · 工博

** 正 會 員 : 東亞大 電氣電子컴퓨터工學部 BK 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 韓國電力研究院 配電技術그룹 研究員 · 碩士

§ 正 會 員 : 釜山蔚山地方 中小企業廳 工業研究士 · 工博

接受日字 : 2003年 4月 18日

最終完了 : 2003年 6月 23日

2. 고조파 상태 추정

전력시스템에서의 상태 추정은 1960년대부터 기본 주파수에서 전력조류에 대한 연구로부터 시작되었다. 초기의 상태 추정은 모든 전류와 전압 파형이 일정한 주파수와 크기만을 가지는 순수한 정현파이고, 평형 3상조건인 대칭 전력시스템에 국한하였다. 그러나 최근에는 그림 1에 기술된 것과 같이 고조파 상태 추정(HSE) 및 고조파 성분 식별(identification)에 관한 연구로 확장되어 이루어지고 있다. 그러나 대규모 전력시스템에서 모선 선로에 대한 전압 및 전류 파형과 주파수 성분을 추정하기 위하여 전체 시스템을 측정한다는 것은 불가능하다. 따라서 전력시스템 상태 추정을 위한 부분적 측정에 의해 시스템 분석이 필요로 한다.

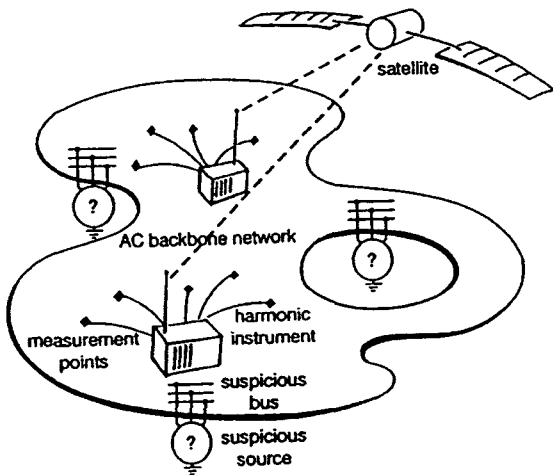


그림 1 고조파 상태 추정
Fig. 1 Harmonic state estimation

고조파 상태 추정의 구조는 그림 2와 같다. 고조파 상태 추정은 회로 상호 결합에 의한 불평형 임피던스 및 입력 전류와 같은 불평형 조건을 표현하기 대칭 좌표법을 이용하여 3상 전력시스템 모델을 사용한다.

전력시스템 고조파 상태 추정을 위한 부분적인 측정기준은 각상의 임의의 모선전압 및 입력전류 그리고 선로전류 또는 모선 입력전압과 선로전압으로 구성된다.

2.1 고조파 상태 모델

고조파 상태 추정(Harmonic State Estimation : HSE)은 한정되어 있는 측정된 고조파 전류 및 전압의 데이터로부터 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 고려하여야 한다.

고조파 상태 변수 모델은 선택된 모선과 선로를 동기화되어진 측정 장비의 측정데이터로부터 전력시스템의 고조파 정보를 추정하기 위해 시스템의 전반적인 고조파 상태 추정을 수학적으로 공식화하는 것이다.

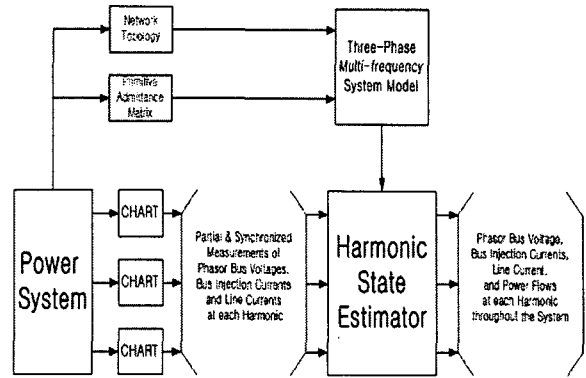


그림 2. 고조파 상태 추정의 구조
Fig. 2 Framework of harmonic state estimation

고조파 상태 변수 모델은 선택된 모선과 선로를 동기화되어진 측정 장비의 측정데이터로부터 전력시스템의 고조파 정보를 추정하기 위해 시스템의 전반적인 고조파 상태 추정을 수학적으로 공식화하는 것이다.

3상 전력시스템에서 기준 절점을 배제한 모든 절점, 또는 각상에 대한 모선의 설정을 N이라 하고, 모든 가지의 설정을 B라 하며 그리고 절점에 연결된 모든 선로를 L이라 설정한다.

그 예를 그림 3에 지향된 그래프와 같다. 여기서 C_{NL} , C_{LB} 그리고 C_{BN} 은 각각 절점-선로 접속행렬, 선로-가지 접속행렬 그리고 가지-절점 접속행렬이다.

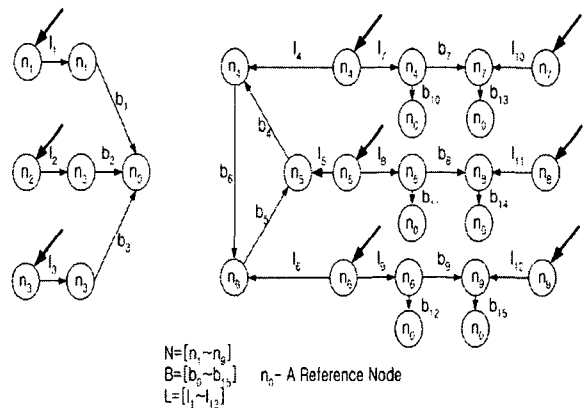


그림 3 지향된 전력시스템 그래프
Fig. 3 An oriented graph of a power system

$$C_{NL}(i, j) = \begin{cases} +1 & \text{만약 선로 } j \text{가 절점 } i \text{에서 주입되면} \\ -1 & \text{만약 선로 } j \text{가 절점 } i \text{로 주입되면} \\ 0 & \text{다른 경우} \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{LB}(i, j) = \begin{cases} +1 & \text{만약 가지 } j \text{가 선로 } i \text{에서 나오면} \\ -1 & \text{만약 가지 } j \text{가 선로 } i \text{로 들어가면} \\ 0 & \text{다른 경우} \end{cases} \quad (2)$$

$$C_{BN}(i, j) = \begin{cases} +1 & \text{만약 가지 } j \text{가 절점 } i \text{에서 주입되면} \\ -1 & \text{만약 가지 } j \text{가 절점 } i \text{로 주입되면} \\ 0 & \text{다른 경우} \end{cases} \quad (3)$$

식(1),(2),(3)에서 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{BN}(i, j) = (C_{NL} C_{LB})^T$$

여기서 T 는 벡터 연산자 또는 행렬의 전치라 한다.

고조파 차수 n 에 대해 $V_N(n)$ 과 $I_N(n)$ 은 절점전압과 입력 전류의 위상벡터, $I_L(n)$ 은 선로전류의 위상벡터, $V_B(n)$ 과 $I_B(n)$ 은 가지 전압 및 전류이다. 그리고 $Y_{BB}(n)$ 은 단순한 어드미턴스 행렬이다.

Kirchhoff's 전압과 전류 법칙 그리고 옴의 법칙을 기초로 식(5)처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_B(n) &= C_{BN} V_N(n) \\ I_N(n) &= C_{NL} I_L(n) \\ I_L(n) &= C_{LB} I_B(n) \\ I_B(n) &= Y_{BB}(n) V_B(n) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)를 $I_N(n)$ 과 $I_L(n)$ 및 $Y_{NN}(n)$ 과 $Y_{LN}(n)$ 으로 나타내면 식(6) 및 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} I_N(n) &= C_{NL} C_{LB} I_B(n) = C_{BN}^T Y_{BB}(n) V_B(n) \\ &= C_{BN}^T Y_{BB}(n) C_{BN} V_N(n) \\ I_L(n) &= C_{LB} Y_{BB}(n) V_B(n) = C_{LB} Y_{BB}(n) C_{BN} V_N(n) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Y_{NN}(n) &= C_{BN}^T Y_{BB}(n) C_{BN} \\ Y_{LN}(n) &= C_{LB} Y_{BB}(n) C_{BN} \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 식(6)과 식(7)에 의해 입력전류 위상벡터 $I_N(n)$ 과 선로전류 위상벡터 $I_L(n)$ 을 다시 풀이하면 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} I_N(n) &= Y_{NN}(n) V_N(n) \\ I_L(n) &= Y_{LN}(n) V_N(n) \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)의 결과를 바탕으로 벡터 $V_N(n)$, $I_N(n)$, $I_L(n)$ 의 요소들이 측정되었던 안 되었던 간에 설정된 N 의 절점은 측정된 전압 N_{MV} 와 측정하지 않은 전압 N_{UV} 절점의 두 부분 집합으로 나누어지거나, 혹은 측정된 입력전류 N_{MI} 와 측정하지 않은 입력전류 N_{UI} 의 두 부분 집합으로 나누어진다. 그리고 설정된 선로 L 은 측정된 전류 선로 L_M 과 측정하지 않은 전류 선로 L_U 로 각각 나눌 수 있다. 즉

$$\begin{aligned} N_{MV} \cup N_{UV} &= N \text{ and } N_{MV} \cap N_{UV} = \emptyset \\ N_{MI} \cup N_{UI} &= N \text{ and } N_{MI} \cap N_{UI} = \emptyset \\ N_M \cup L_U &= L \text{ and } N_M \cap L_U = \emptyset \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 \emptyset 은 공집합이다. 따라서 벡터 $V_N(n)$, $I_N(n)$, $I_L(n)$ 은 각각 측정된 것과 측정하지 않는 두 부분 벡터로 나누어진다. 즉,

$$V_N(n) = \begin{pmatrix} V_{N_{MV}}(n) \\ V_{N_{UV}}(n) \end{pmatrix}, I_N(n) = \begin{pmatrix} I_{N_{MI}}(n) \\ I_{N_{UI}}(n) \end{pmatrix}, I_L(n) = \begin{pmatrix} I_{L_M}(n) \\ I_{L_U}(n) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$V_{N_{MV}}(n) = K_{N_{MV}N} V_N(n) \quad (11)$$

$$K_{N_{MV}N} = [U, 0] \quad (12)$$

U 는 적당한 차원의 단위행렬이다. 식(8)의 $Y_{NN}(n)$ 과 $Y_{LN}(n)$ 은 식(13) 및 식(14)와 같이 분해 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} I_{N_{MI}}(n) \\ I_{N_{UI}}(n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{N_{MI}N}(n) \\ Y_{N_{UI}N}(n) \end{pmatrix} V_N(n) \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} I_{L_M}(n) \\ I_{L_U}(n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{L_MN}(n) \\ Y_{L_UN}(n) \end{pmatrix} V_N(n) \quad (14)$$

$$I_{N_{MI}}(n) = Y_{N_{MI}N}(n) V_N(n) \quad (15)$$

$$I_{L_M}(n) = Y_{L_MN}(n) V_N(n)$$

$V_{N_{MV}}(n)$, $I_{N_{MI}}(n)$, $I_{L_M}(n)$ 을 측정값 벡터 $V_{N_{MV}}(n)$, $I_{N_{MI}}(n)$, $I_{L_M}(n)$ 와 측정오차 벡터 $\varepsilon_{N_{MV}}(n)$, $\varepsilon_{N_{MI}}(n)$, $\varepsilon_{L_M}(n)$ 로 각각 두자. 즉

$$\begin{aligned} V_{N_{MV}}(n) &= V_{N_{MV}}(n) + \varepsilon_{N_{MV}}(n) \\ I_{N_{MI}}(n) &= I_{N_{MI}}(n) + \varepsilon_{N_{MI}}(n) \\ I_{L_M}(n) &= I_{L_M}(n) + \varepsilon_{L_M}(n) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_{N_{MV}}(n) &= K_{N_{MV}N} V_N(n) + \varepsilon_{N_{MV}}(n) \\ I_{N_{MI}}(n) &= Y_{N_{MI}N}(n) V_N(n) + \varepsilon_{N_{MI}}(n) \\ I_{L_M}(n) &= Y_{L_MN}(n) V_N(n) + \varepsilon_{L_M}(n) \end{aligned} \quad (17)$$

이 때, $X(n)$ 및 $V_N(n)$ 은 식(18)과 같다.

$$X(n) = V_N(n) \quad (18)$$

따라서

$$Z(n) = \begin{bmatrix} V_{N_{MV}}(n) \\ I_{N_{MI}}(n) \\ I_{L_M}(n) \end{bmatrix}, H(n) = \begin{bmatrix} K_{N_{MV}N} \\ Y_{N_{MI}N}(n) \\ Y_{L_MN}(n) \end{bmatrix}, \varepsilon(n) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{N_{MV}}(n) \\ \varepsilon_{N_{MI}}(n) \\ \varepsilon_{L_M}(n) \end{bmatrix} \quad (19)$$

즉, 선형 고조파 측정 상태 변수 모델은 식(20)과 같다.

$$Z(n) = H(n)X(n) + \varepsilon(n) \quad (20)$$

여기에서 $H(n)$ 은 측정행렬이라 부른다.

2.2 고조파 상태 해석

관측성 해석(Observability Analysis : OA)은 고조파 상태 추정을 실행할 수 있는지 없는지를 식별하는데 필수적인 해

미정행렬의 경우, $[A]X=b$ 는 식(27)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 분해(lower triangular & upper triangular Decomposition)로 구하기 힘든 것을 수치해석적인 해답으로 풀 수 있고, 문제점을 정밀하게 분석하며 방향을 제시한다. 또한, 대부분의 선형 최소제곱법의 해를 얻는데 이 용되는 선택방법으로 사용된다.

예를 들면 특이값 분해는 주어진 $m \times n(m \leq n)$ 행렬 A 를 식(28)로 분해할 수 있다.

$$A=UWV^T \tag{28}$$

여기서, U 는 $m \times n$ 의 열 직교행렬이고, W 는 양수 또는 0의 원소들을 대각선으로 하는 $m \times n$ 대각선 행렬이고, V 는 $n \times n$ 직교행렬이다. 즉,

$$U^T U=V V^T=I \tag{29}$$

행렬 A 가 $n \times n$ 정방행렬일 경우 U, W 및 V 는 모두 $n \times n$ 정방행렬이 된다. 따라서 C 의 역행렬은,

$$C^{-1}=V[\text{diag}(1/W_{ii})]U^T \tag{30}$$

이 된다. W_{ii} 중의 하나가 0이 되거나, 그 값이 너무 작아서 라운드 오프 오차(round off error)가 생길 경우, 행렬은 특이값 행렬이 된다. 판별값(condition number)은, W_{ii} 중의 최대 값을 W_{ii} 중의 최소값으로 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), 기저 측정값(k)와 요구하지 않은 주입전류(n)로 분할하면.

$$\begin{bmatrix} Y_{1u} & Y_{1k} \\ Y_{2u} & Y_{2k} \\ Y_{3u} & Y_{3k} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_u \\ V_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{bu} \\ I_{bk} \\ I_{bn} \end{pmatrix} \tag{31}$$

보조벡터 I_{bu} 는 최소 제곱법에 의해 해결된다.

$$I_{bu} = Y_{1u} Y_{2u}^{-1} I_{bk} + (Y_{1k} - Y_{1u} Y_{2u}^{-1} Y_{2k}) V_k \tag{32}$$

여기서 Y_{2u}^{-1} 는 미정행렬에서의 유사 역행렬이다.

미정행렬에서 고조파 상태 추정의 상태변수가 복잡한 값으로 나타나므로 실수값과 허수값의 구성을 분할하는 것도 문제가 된다. 따라서 특이값 분해에서 실수값과 허수값으로 분할하기위해 표준 실수치 수치 절차를 이용하였다.

측정 방정식 $Z=[H]X$ 의 변환된 항은

$$\begin{aligned} x &= x_R + jx_1 \\ z &= z_R + jz_1 \\ h &= h_R + jh_1 \end{aligned} \tag{33}$$

식(33)에서 식(34)와 같이 나타난다.

$$Z = \begin{bmatrix} z_R \\ z_1 \end{bmatrix}, \quad [H] = \begin{bmatrix} h_R & -h_1 \\ h_1 & h_R \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_R \\ x_1 \end{bmatrix}, \tag{34}$$

3. 유전알고리즘을 이용한 고조파 상태 추정

3.1 유전알고리즘

유전알고리즘은 자연선택과 진화유전학의 메카니즘을 토대로 한 확률적인 최적화 알고리즘으로서 1962년 Holland에 의해 처음으로 도입되었고, 이후 Goldberg등에 의해 광범위하게 연구되었다. 유전알고리즘은 다양한 문제에 적용가능하며 최근에는 최적화 문제를 해결하는데 많이 이용되고 있으며 종래의 최적화 방법과 비교할 때 몇 가지 큰 차이가 있다. 첫째, 유전알고리즘은 변수 그 자체의 값을 직접 사용하지 않고 변수의 값을 나타내는 코드형태의 문자열(string)을 사용한다. 이러한 문자열 형태의 변수 사용은 생명체의 외적인 성질을 나타내는 유전인자가 염색체(chromosome) 상에 배열되는 것과 같은 형태로서 유전자간의 교차(crossover)와 돌연변이(mutation)연산을 수행하기 쉽게 된다. 둘째, 기존의 방법들이 한 개체만을 이용하여 최적화를 수행하는데 반해서 유전알고리즘은 개체의 집단(population)을 이용해서 최적화를 수행한다. 셋째, 기존의 최적화 방법들의 대부분은 최적화 하고자 하는 목적 함수의 값 이외의 목적함수의 미분가능 및 연속성과 같은 다른 정보들을 요구하게 되는데 유전알고리즘은 단지 목적함수(objective function)만을 필요로 한다. 넷째, 효율적인 탐색을 위하여 확률론적인 변환 규칙을 이용한다. 그림 5는 단순 유전알고리즘의 구조를 보여준다.

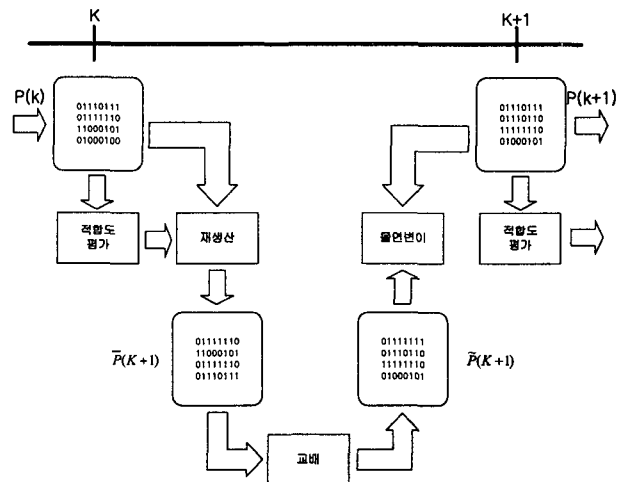


그림 5 단순 유전알고리즘의 구조
Fig.. 5 Simple genetic algorithm structure

3.1.1 변수의 표현

유전알고리즘은 문자열 집단으로서 동작한다. 그러므로 최적화 문제를 풀기 위하여, 최적화 하고자 하는 변수 벡터들은 부호 없는 2진 문자열로 부호화 되어진다.

3.1.2 적합도 평가

적합도는 각 세대에서의 문자열들이 평가기준에 얼마나 적합한지를 평가하는 것이다. 적자생존의 원리에 의해 적합도 값이 높을수록 다음 세대에 자손으로 분포할 가능성이 더욱 높다.

3.1.3 복제

복제과정은 비교적 높은 적합도를 가지는 염색체들을 선택하여 생산하는 것이다. 이는 자연계에서의 적자생존의 원리와도 유사하다. 평가된 각 염색체들은 복제과정에서 높은 적합도를 가지는 값들이 선정되어 다음 세대에 전해지게 된다.

3.1.4 교배

교배 연산자는 확률적인 방법에 의해 선택된 2개의 문자열 중에 일부분을 교환하여 새로운 문자열을 발생시키는 역할을 한다. 이 연산자는 현재 집단에서 문자열간의 상호 정보를 교환하여 존재하는 정보보다 더 많은 정보를 제공하는 역할을 한다.

3.1.5 돌연변이

돌연변이는 유전알고리즘에서 중요한 위치를 차지한다. 평가, 복제, 교배 과정에서 계속적으로 생성되어지는 염색체들은 세대가 지남에 따라 새로운 염색체가 생성되지 못하는 국부 최소치에 빠질 가능성이 높다. 돌연변이는 세대와 무관하게 돌연변이 확률에 따라 염색체의 스트링의 임의 위치에 돌연변이 값을 만들어서 전혀 새로운 염색체를 생성시킨다. 따라서 돌연변이는 탐색 공간의 폭을 넓히며, 지역 최소화를 방지하여 보다 최적값을 찾을 수 있도록 한다.

3.2 유전 알고리즘을 이용한 최적 측정위치 선정

전력시스템에서 고조파 상태 추정은 모선과 선로의 부분 혹은 전체를 선택하여 고조파를 측정함으로써 실제시스템의 고조파 정보를 얻을 수 있는 효과적이고 경제적인 기법이다. 그러나 전력시스템에서 고조파 상태 추정을 수행하기 위해 측정 시스템을 설계하는 것은 매우 복잡한 문제이다. 이런 복잡한 문제는 시스템의 크기, 측정 장치에 필요한 정확성의 불일치, 데이터 통신고장과 변환기에 존재하는 잡음, 네트워크 위상변화의 적응성과 비용의 최소화에 의존한다. 이러한 복잡한 측정 시스템을 설계하기 위하여 측정위치 선정을 최적화하는데 유전알고리즘을 이용하였다.

유전알고리즘을 이용하기 위해서는 최적화 되어지는 파라미터를 선정하여 탐색공간을 설정한 후 이를 염색체로 표현하여야 한다. 유전알고리즘을 이용하여 최적해를 탐색하는 경우 상대적으로 환경에 잘 적응하는 개체를 평가하기 위한 수단으로서 평가함수를 선정해야 하는데 이는 최적화의 목적

이 무엇이냐에 따라 달라지게 된다.

본 논문에서 고찰되는 최적화 목적은 고조파 상태 추정에 있어서 고조파 측정 장비의 비용과 상태 추정 오차를 최소화 할 수 있는 측정위치를 최적화시키는 것이다. 따라서 최적화 하고자 하는 파라미터는 고조파 상태를 측정할 수 있는 측정위치이므로 측정할 경우에는 "1"로, 측정하지 않을 경우 "0"로 염색체를 구성한다. 따라서 유전알고리즘을 이용한 최적 위치선정을 위한 평가 함수는 측정 장비의 비용과 상태 추정 오차로 식 (3.4)와 같이 구성하고, 이 평가 함수를 최소화 하고자 한다.

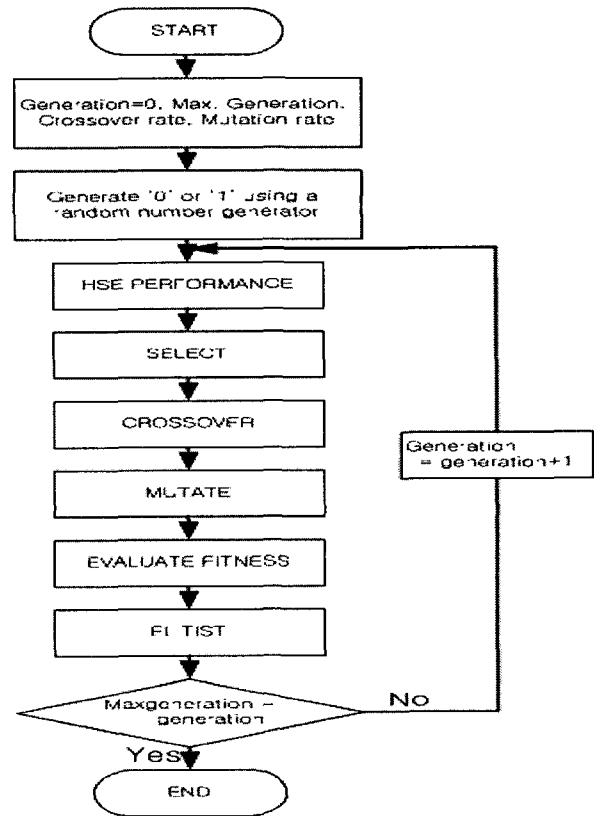


그림 6 유전알고리즘을 이용한 최적 측정위치 선정 알고리즘

Fig. 6 The algorithm for optimization of measurement placement using GA

시스템을 모니터링 할 수 있도록 데이터를 측정하는 CHART장비는 주입되는 고조파 전압 및 전류를 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 36개 이상의 채널과 50차까지의 고조파를 실시간으로 측정 가능하다. 여기서 CHART장비의 비용은 기본적인 설치비용인 CHART장비 한대의 가격(α)와 측정 장비에 포함되어 있는 채널의 추가적인 비용(β)으로 구성하였다. 모선전압, 모선전류 및 선로전류의 오차는 시스템의 전체를 고조파를 측정된 성분과 상태 추정된 고조파 성분을 비교하여 구성하였다.

$$Min J = \sum_{i=1}^n Cost_i + V_{error} + I_{error} + B_{error} \quad (35)$$

여기서, $(i=1, \dots, n, n$ 는모선수)

$$\text{단, } Cost_i = \alpha + K\beta, \quad (\alpha = \$20,000, \beta = \$2,000)$$

여기서 $Cost_i$ 는 i 번째 모선의 측정 장비 비용, K 는 추가적인 채널 수, 측정치 값을 경우에 $Cost_i$ 는 \$0가 된다.

V_{error} 는 모선전압 오차, I_{error} 는 모선전류 오차, B_{error} 은 선로전류 오차이다. 적합도는 식(36)과 같이 선정하여 수행하였다.

$$Fitness = \frac{1.0}{1.0 + \text{Min}[J]} \quad (36)$$

4. 사례 연구

본 논문에서는 전력시스템의 고조파 상태 추정에 있어서 유전알고리즘을 이용한 최적 측정위치 선정에 대한 유용성을 확인하기 위해 그림 7과 같은 전력시스템에 적용하였다. 이 전력시스템은 모선 9개, 선로 8개, 변압기 5개로 구성된 시스템이다. 이 시스템에 있어서 고조파 상태 추정의 수행을 위한 측정 가능한 위치는 고조파 전압 및 입력전류가 각각 9곳이다. 그리고 가지 고조파 전류는 총 26곳이다. 따라서 총 측정 가능한 곳은 44곳이 된다. 단, CHART장비의 설치는 각 모선에만 설치 가능하다.

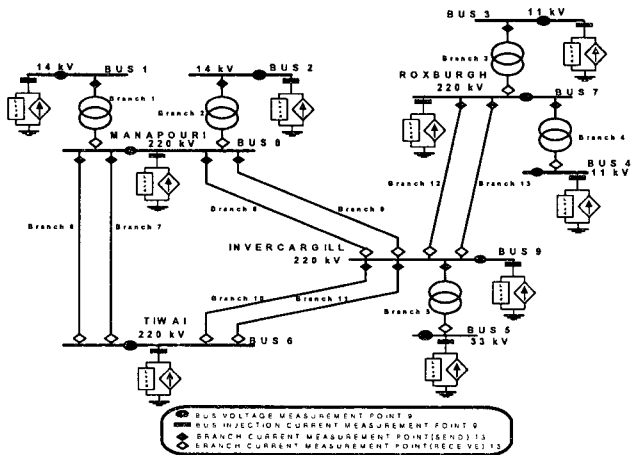


그림 7 테스트 시스템
Fig. 7 Test System

측정 가능한 위치 선정은 부하측과 인근하는 다른 모선 및 선로를 고려하여 그림 8과 같이 선정하였다. 고조파 상태 추정의 수행을 위한 측정 가능한 위치를 선정한 곳은 전압 측정 모선에서 5모선, 7모선, 8모선이고, 입력 전류측정 모선은 2모선, 4모선, 5모선, 6모선, 7모선, 8모선이다. 고조파 상태 추정을 수행한 결과 모선전압, 모선전류 및 선로 전류에서 오차가 0%로 발생하였다. 그 결과를 표 1과 2에 실제 값과 추정 값의 모선 전압과 전류를 비교하여 나타내었다. 그림 9에서 고조파 전류가 5모선과 6모선에서 발생한다는 것을 보여주고 있다. CHART장비의 비용은 2모선, 4모선, 6모선에 CHART장비를 설치해야 하므로 각각 \$20,000씩과 5모선, 7모선, 8모

선에서는 CHART장비의 설치비용과 그리고 설치한 CHART장비의 채널 증가로 인한 추가비용 \$2,000을 포함한 \$22,000씩의 비용이 각각 든다. 즉 추가 채널의 경우 일반적으로 설치되어 있는 CHART장비에서 증가시키는 것이므로 CHART장비를 설치하는 비용보다는 적게 든다. 따라서 그림 8과 같이 전력시스템의 측정 측정위치를 선정한 곳에 대한 고조파 상태 추정을 위해 사용되는 전체적인 측정 장비의 비용은 \$126,000으로 나타났다.

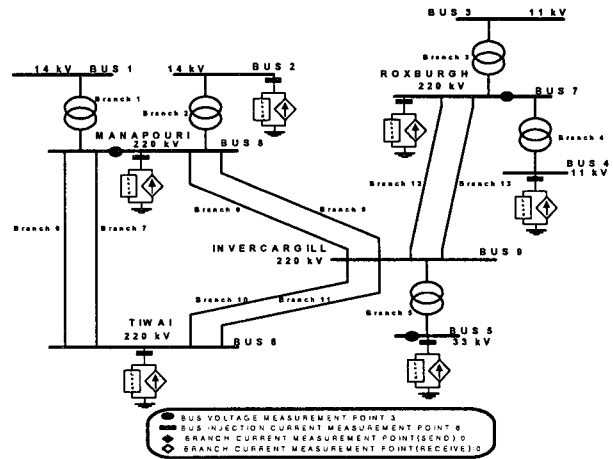


그림 8 측정 위치
Fig. 8 Reduced measurement placement

표 1 고조파 모선전압

Table 1 Harmonic bus voltage

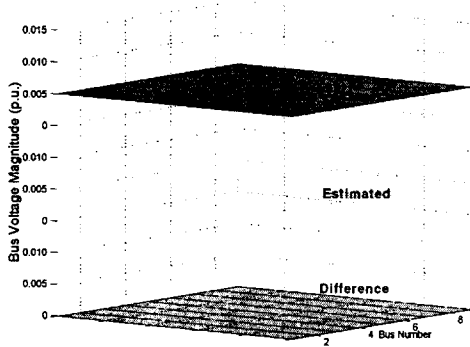
Bus No.	Actual		Estimated		Error (%)
	Magnitude (P.U.)	Angle (Deg.)	Magnitude (P.U.)	Angle (Deg.)	
1	0.00502	27.03069	0.00502	27.03069	0.00
2	0.00502	26.98089	0.00502	26.98089	0.00
3	0.00501	26.48450	0.00501	26.48450	0.00
4	0.00500	26.25757	0.00500	26.25757	0.00
5	0.00502	27.84543	0.00502	27.84543	0.00
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 2 고조파 주입전류

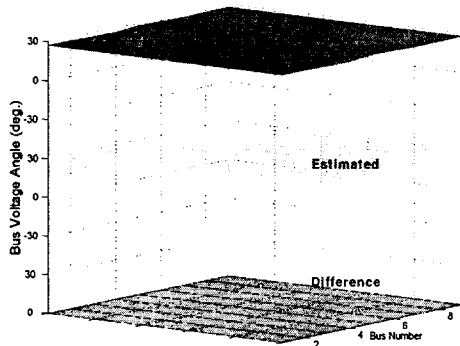
Table 2 Harmonic current injection

Bus No.	Actual		Estimated		Error (%)
	Magnitude (P.U.)	Angle (Deg.)	Magnitude (P.U.)	Angle (Deg.)	
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

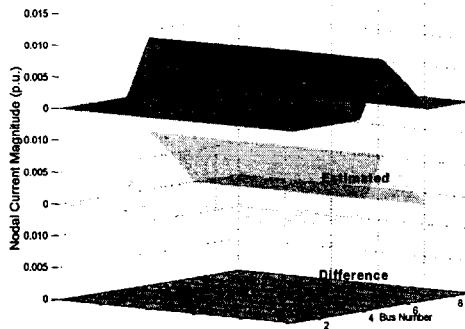
그림 10은 전력시스템에서 고조파 상태 추정을 수행하기 위해 유전알고리즘을 이용하여 최적 측정 위치선정을 한 경우이다. 이 때 유전알고리즘의 목적함수는 측정 장비비용과 상태 추정오차를 최소화하는 데에 목적을 두고 위치를 선정한 경우이다. 유전알고리즘을 이용하여 최적 측정 위치를 선정한 측정 위치는 5모선, 7모선, 8모선, 9모선의 전압을 측정하였고, 입력전류의 측정은 4모선, 5모선, 7모선, 8모선, 9모선으로 선정되었다. 유전알고리즘을 이용한 고조파 상태 추정에서 상태 추정 오차인 모선 전압오차, 모선 전류오차 선로 오차에서 오차가 발생하였다.



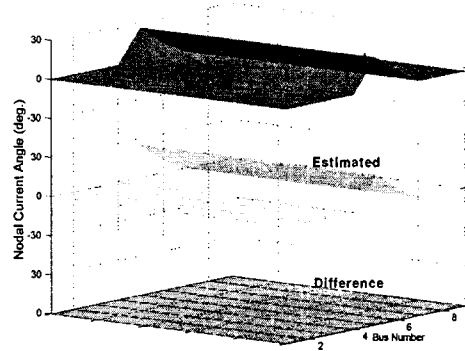
(a) Harmonic bus voltage magnitude



(b) Harmonic bus voltage angle



(c) Harmonic current injection magnitude



(d) Harmonic current injection angle

그림 9 고조파의 실제 값과 추정 값의 비교

Fig. 9 Comparison of estimated and simulated levels of harmonic

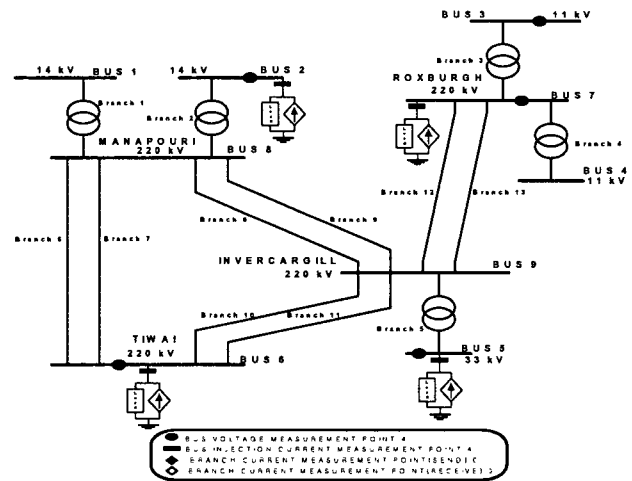


그림 10 유전알고리즘을 이용한 최적 측정 위치 선정

Fig. 10 Optimized Measurement placement using GA

이는 수치적 오차인 라운드 오프 오차(round off error)가 발생하였기 때문에 널 공간 벡터(null space vector)를 이용해 수치적 오차를 제거하였다. 따라서 상태 추정 오차인 모선 전압오차, 모선 전류오차, 선로 오차가 0%로 나타났다. 그 결과를 표 3과 4에 실제 값과 추정 값의 모선 전압과 전류를 비교하여 나타내었다. 또한 그림 11에서 고조파 전류가 5모선과 6모선에서 발생한다는 것을 보여주고 있다. 그리고 CHART장비의 비용은 4모선에 CHART장비를 설치해야하므로 \$20,000과 5모선과 7모선, 8모선 및 9모선에서는 CHART장비의 설치비용과 그리고 CHART장비의 채널 증가로 인한 추가비용을 \$2,000씩 더 추가하여 \$22,000의 비용이 든다. 따라서 전체적인 CHART장비의 비용은 \$108,000로 나타났다. 전력시스템의 시뮬레이션 결과를 비교하면 측약 측정위치선정의 측정 개수는 9개이고, 사용한 CHART장비의 수는 6대이며, 추가된 채널은 3개이다. 그래서 총 비용은 \$126,000

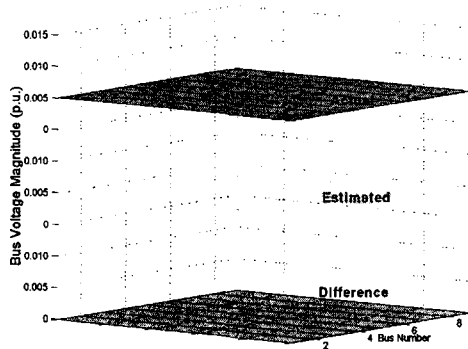
로 나타났다. 유전알고리즘을 이용하여 선정한 측정위치의 측정 개수는 8개이고, 사용한 CHART장비의 수는 5대이며, 추가된 채널의 수는 3개이다. 따라서 총 비용은 \$108,000이다. 물론 상태 추정오차는 0%로 같았다.

표 4 고조파 모션전압
Table 4 Harmonic Bus Voltage

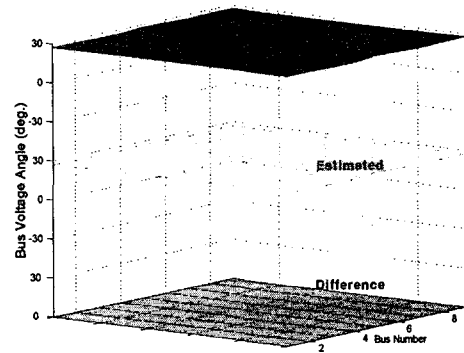
Bus No.	Actual		Estimated		Error (%)
	Magnitude (P.U.)	Angle (Deg.)	Magnitude (P.U.)	Angle (Deg.)	
1	0.00502	27.03069	0.00502	27.03069	0.00
2	0.00502	26.98089	0.00502	26.98089	0.00
3	0.00501	26.48450	0.00501	26.48450	0.00
4	0.00500	26.25757	0.00500	26.25757	0.00
5	0.00502	27.84543	0.00502	27.84543	0.00
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 주입전류
Table 5 Harmonic Current Injection

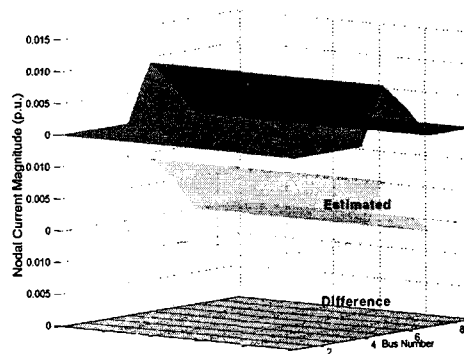
Bus No.	Actual		Estimated		Error (%)
	Magnitude (P.U.)	Angle (Deg.)	Magnitude (P.U.)	Angle (Deg.)	
1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00
2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00
3	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00
4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00
5	0.00900	25.00000	0.00900	25.00000	0.00
6	0.00500	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



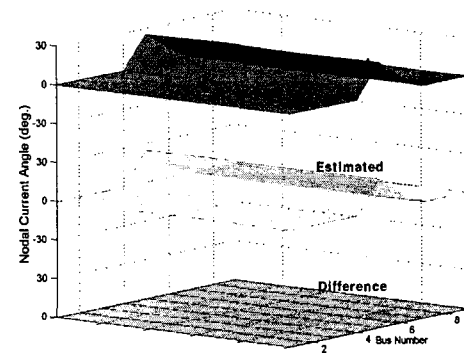
(a) Harmonic bus voltage magnitude



(b) Harmonic bus voltage angle



(c) Harmonic current injection magnitude



(d) Harmonic current injection angle

그림 11 고조파의 실제 값과 추정 값의 비교

Fig. 11 Comparison of estimated and simulated levels of harmonic

5. 결 론

본 논문에서는 전력시스템의 고조파 상태 추정(Harmonic State Estimation : HSE)에 있어서 최적 측정위치 선정을 위하여 유전알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 이용한 GA-HSE 알고리즘을 제안하였다. 제안한 GA-HSE 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 전력시스템에 적용하여 고조파 상태 추정을 수행하였다. 이 때 측정위치를 축약한 경우와 유전알

고리관을 이용하여 최적 측정위치를 선정한 경우에 고조파 상태를 추정을 수행하였다. 본 연구결과는 다음과 같이 나타났다.

1. 제안한 HSE 알고리즘은 실제값과의 오차가 최소화 되었다. 따라서 신뢰성 있는 고조파 상태를 추정했다.
2. 제안한 HSE 알고리즘은 축약 측정위치보다 측정위치가 최소화되었다.
3. 제안한 HSE 알고리즘은 고조파 상태를 추정하기 위해 사용되는 측정 장비인 연속 실시간 고조파 해석 장비 (Continuous Harmonic Analysis in Real Time : CHART) 의 비용도 축약 측정위치보다 최소화되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 전력시스템의 고조파 상태 추정에 있어서 유전알고리즘을 이용한 최적 측정위치 선정은 매우 경제적이고 효과적인 방법임을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] Schweppe, F.C., Wildes, J.C. and Rom, D "Power System Static State Estimation", *Part I, II and III, IEEE Trans. Power Appar. & Syst.* Vol PAS-89, 1970, pp 120-135.
- [2] Lewis, T.O. and Odell, P.L. "Estimation in Linear Models", *Prentice-Hall, Inc.* 1971
- [3] Fetzer, E.E. and Anderson, P.M. "Observability in the State Estimation of Power Systems", *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-94, 1975, pp 1981-1988.
- [4] Heydt, G.T. "Identification of harmonic sources by a state estimation technique", *IEEE Trans, On Power Delivery*, 4, no 1, 1989, pp.569-576
- [5] BEIDES, H.M. Heydt, G.T. "Dynamic state estimation of power system harmonics using Kalman filter methodology", *IEEE Trans, On Power Delivery*, 6, no.1 pp 4, 1991, pp 663-1670
- [6] Najjar, M and Heydt G.T. "A Hybrid Nonlinear - Least Squares Estimation of Harmonic Signal Levels in Power Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.6, No.1, 1991, pp 282-288.
- [7] Lin, S.-Y. "A Distributed State Estimation for Electric Power Systems", *IEEE T-PWRS*, Vol.7, No.2, 1992, pp 551-557.
- [8] DU, Z.P. ARRILLAGA, J. WATSON, N.R. "Continuous harmonic state estimation of power systems", *Proc. IEE*, C, 143 Pt.C, no.4, 1996, pp.329-336
- [9] J. Arrillaga, N.R. Watson, S.Chen, "Power system quality Assessment". *Jhn wiley & sons. Inc* 1996.
- [10] Goldberg, D.E. "Genetic algorithms in search optimization & machine learning", *Addison-Wesley Publishing Co. Inc*, 1989.

[11] Wang.Y.P, Watson. N.R, Arrillaga. J, Park H.C and Chong H.H. "Harmonic State Estimation : Optimal Placement of Measurements Using Genetic Algorithms", *International Power Quality Conference, Suntec, Singapore*, Vol. 2 of 2, October 2002, pp 534-544.

저 자 소 개



정형환 (鄭亨煥)

1941년 1월 19일생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 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



왕용필 (王龍泌)

1966년 8월 25일생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 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



박희철 (朴熙徹)

1975년 1월 19일생. 2001년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 한국전력연구원 배전기술그룹 연구원. 관심분야 : 전력품질, 전자기 과도현상
Tel : 042-865-5983, Fax : 042-865-5804
E-mail : hchpark@kepri.re.kr



안병철 (安秉喆)

1963년 6월 2일생. 1988년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 부산울산지방 중소기업청 공업연수사. 관심분야 : 직류송전 시스템 해석 및 제어설계, 전력품질
Tel : 051-601-5148, Fax : 051-341-4204
E-mail : bcan33@smba.go.kr