

PSO 기반 동기발전기 시스템 모델정수 추정에 관한 연구

A Study on Parameter Estimation of the Synchronous Generator System based on the Modified PSO

최형주* · 김인수** · 이흥호†
 (Hyung-Joo Choi · In-Soo Kim · Heung-Ho Lee)

Abstract - This paper includes a method for estimating the parameter of a synchronous generator and exciter using the modified particle swarm optimization. A solid round rotor synchronous generator and exciter have been modeled with the saturation function. They are regarded as state of being cooperative to a infinite bus. The behavior characteristic of all particles assigned to a parameter needs to be reflected in the PSO algorithm to fine out more close result to the optimal solution. The results of the simulation to estimate the parameters of the synchronous generator and exciter in the modified PSO algorithm are described

Key Words : Parameter estimation, Particle swarm optimization, Modified PSO, Synchronous generator, Static exciter, Power System modeling, Constriction factor

1. 서론

전력계통의 동요에 따른 동기발전기의 응동 특성은 동기발전기 시스템이 갖고 있는 제정수의 영향에 따른 결과로서 발전기의 단자전압, 여자시스템의 계자전압과 계자전류는 전력계통의 동요 현상을 잘 나타내는 성분이 된다. 이러한 특성은 정의된 동기발전기 시스템의 시정수를 포함하는 전달함수로 설명될 수 있으며, 수치 해석적인 방법으로 풀이될 수 있다. 그러나 발전기의 포화에 따른 비선형 특성과 2차 미분방정식의 풀이는 쉽지 않다.

다른 한편으로 전력계통의 특성을 반영하고 있는 동기발전기 시스템에서 실측된 신호와 일치할 수 있는 정의된 모델의 출력을 얻는 것은 전력계통의 동요 현상을 잘 표현하고 있음을 의미하므로 모든 조합의 모델정수를 탐색함으로써 최적화된 모델정수를 추정할 수 있다. 하나의 시스템에서 입력과 출력은 명확한 반면, 내부 설정 상태가 부정확한 시스템(Gray System)에서 최적화된 모델정수를 탐색하는 기법으로 사회적 행동 양식에 기반한 확률적 최적화 이론인 입자군집최적화(Particle Swarm Optimization, PSO) 알고리즘을 활용한 최적화 연구가 활발히 진행되고 있다. PSO 알고리즘(Algorithm)은 다 변수 최적해를 구하는데 다른 최적화 기법에 비해 수행 속도가 빠른 장점을 갖고 있어 신속한 결론을 얻는데 유리하므로 동기발전기 시스템의 모델정수 추정에 유용하게 활용

될 수 있다. 최적화 알고리즘을 이용한 새로운 해석 기법의 개발은 전력계통의 취약점을 실시간으로 분석하여 중요 해석 자료를 얻을 수 있을 뿐 아니라 제어시스템의 최적 조정을 위한 기준 자료를 확보할 수 있어 전력계통의 안정도 향상에 중요한 의미를 갖는다.

본 논문에서 동기발전기 시스템이 무한대 모선에 연계된 조건으로 모델링하고, 운전조건과 일치하는 등가위치(Equilibrium Point)를 구하기 위해 고유치 해석(Eigenvalue Analysis)하여 모델의 상태변수를 초기화하고 모의시험을 수행하였다. 실측 자료를 기준신호로 하여 이와 일치하는 정의된 모델의 출력이 발생되도록 모델정수의 해석공간을 탐색하여 최적해를 추정하였으며, 해석기법과 추정결과의 성능평가에 대한 연구결과를 기술하였다.

2. 본론

2.1 시스템 모델링

동기발전기 시스템에 사용되는 모든 모델은 PSS/E, Siemens

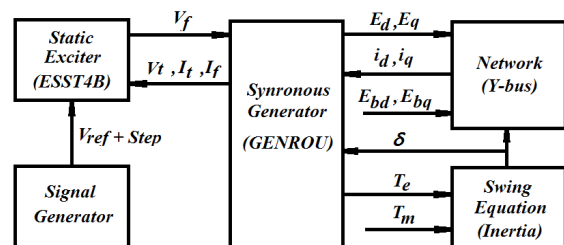


그림 1 동기발전기, 여자기와 네트워크 모델 구성

Fig. 1 Synchronous Generator, Static Exciter and Power Network System Model

* Dept. O&M, TSC., SK E&S Co., Ltd
 E-mail : hj.choi@sk.com

** Dept. Ele., Kwater Co., Ltd

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
 Chung-Nam National University, Korea.

E-mail : leehh@cnu.ac.kr

Received : July 12, 2014; Accepted : December 02, 2014

Energy Inc.,에서 제공하는 표준모델을 적용하고, MATLAB SIMULINK™ 공학 수치해석 프로그램을 사용하여 모델링한다. 원통형 동기발전기, 정지형 여자시스템(Static Excitation System), 전력계통 및 터빈-조속기 장치와의 신호전달 구조는 그림 1과 같이 표현된다.

(a) 원통형 동기발전기

500MW급 수소-수 냉각형 동기발전기(Hydro-Water Cooled Synchronous Generator)의 모델은 종류가 다양하나 표준모델은 초기과도 리액턴스 기반의 원통형 회전자를 가진 동기발전기로서 그림 2와 같이 상태 공간 모델은 GENROU가 사용된다[1].

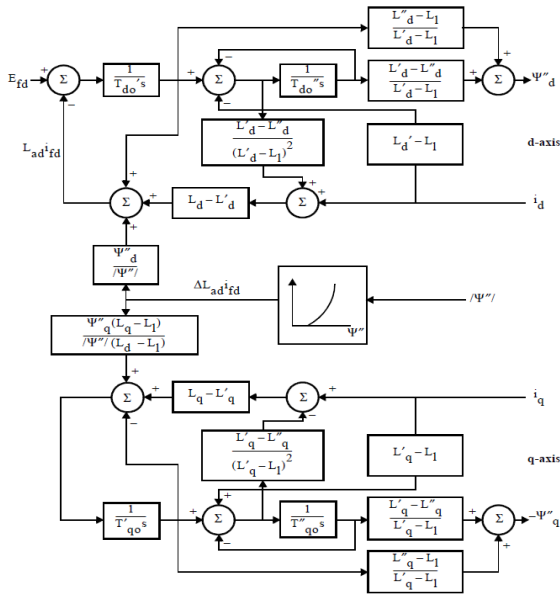


그림 2 원통형 동기발전기 모델 (GENROU)
Fig. 2 Round Rotor Synchronous Generator Model (GENROU)

동기발전기의 무부하 포화곡선은 정격전압과 정격전압의 1.2배에 위치하는 계자전압의 관계로서 그림 3에 나타난 두개의 위치를 지나는 이차방정식으로 가정한다.

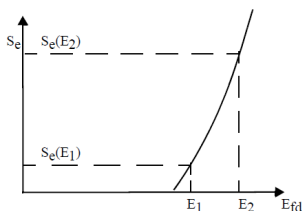


그림 3 무부하 포화곡선에서 포화계수
Fig. 3 Saturation Coefficient under No-load condition

포화계수 A 와 B 는 포화곡선 위에 놓여있는 $(1.0, S_{1.0})$, $(1.2, S_{1.2})$ 위치에 해당되므로 입력 E 에 대한 두 개의 쌍 (E_1, S_{E1}) 와 (E_2, S_{E2})

으로 정의되고 식(1)-(3)과 같이 표현된다[2].

$$S = \frac{D(E-A)^2}{E} \tag{1}$$

$$A = \frac{(\pm E_2 \sqrt{S_{E1} E_1} - E_2 \sqrt{S_{E2} E_2})}{(\pm \sqrt{S_{E1} E_1} - \sqrt{S_{E2} E_2})} \tag{2}$$

$$B = \frac{S_{E1} E_1}{(E_1 - A)^2} \tag{3}$$

(b) 정지형 여자기 (Static Exciter)

동기발전기 단자전압에서 여자변압기와 정류기를 통해 계자관선에 전류를 공급하는 직접여자(Bus-fed Excitation System) 방식을 사용하는 1,850kW 급 정지형 여자기의 상태 공간 모델은 ESST4B 규격으로 그림 4와 같다[1, 8].

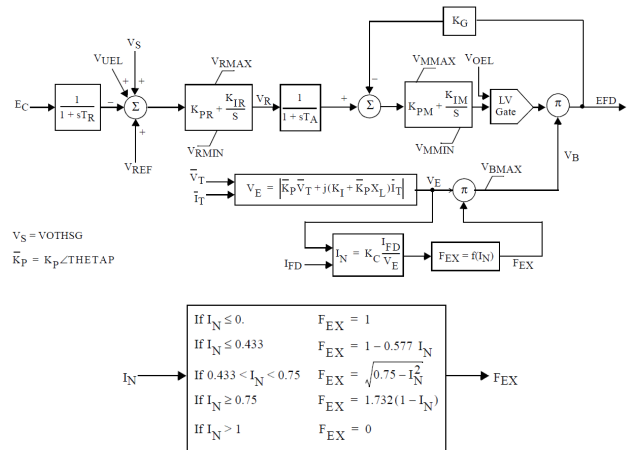


그림 4 정지형 여자기 모델 (ESST4B)
Fig. 4 Static Exciter Model (ESST4B)

(c) 1기 무한대 모선 (Single Machine Infinite Bus)

동기발전기는 송전선로를 통해 전압과 주파수가 일정한 무한대 모선(Infinite Bus)에 연계된 상태를 가정한다.

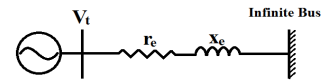


그림 5 1기 동기발전기와 무한대 모선
Fig. 5 Single Machine and Infinite Bus

전력계통의 모선전압과 전류는 폐로방정식(Loop Equation)이나 절점방정식(Node Equation)으로 나타낼 수 있다. 독립적인 절점방정식의 수가 회로방정식에 비해 작기 때문에 일반적으로 선호된다. 절점 어드미턴스 행렬(Node Admittance Matrix) 형태의 계통방정식은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다[3].

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

- 여기서 n : 절점의 총 숫자
- Y_{ii} : 절점 i 의 자기 어드미턴스
- Y_{ij} : 절점 i 와 j 간의 상호 어드미턴스
- V_i : 절점 i 에 대지간 전압
- I_i : 절점 i 에서 계통으로 유입되는 전류

동기발전기의 유기기전력 E_i 과 내부 임피던스에 따른 단자전압 V_1 , 무한대 모선전압 V_2 와 송전선로의 계통전압 V_3 그리고 각 절점에서 정상과 영상 어드미턴스(Positive and Zero Sequence Admittance, Y_{30})에 의한 부하 또는 고장전류 i_3 를 고려한 관계식은 식(5)~(7)과 같이 표현되고, 전압과 전류의 직축과 횡축 성분은 식(8)와 같이 정리된다. 계통 어드미턴스 행렬의 모델은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_1 = i_{12} - (i_{12} + i_{23} + i_{30}) \frac{Y_{12}}{Y_{12} + Y_{23} + Y_{30}} \quad (5)$$

$$I_2 = i_{23} - (i_{13} + i_{23} + i_{30}) \frac{Y_{23}}{Y_{12} + Y_{23} + Y_{30}} \quad (6)$$

$$V_3 = (i_{13} + i_{23} + i_{30}) \frac{1}{Y_{12} + Y_{23} + Y_{30}} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_{q1} - j\dot{i}_{d1} \\ i_{q2} - j\dot{i}_{d2} \\ v_{q3} - jv_{d3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} - \frac{Y_{13}Y_{31}}{Y_{33}} & Y_{12} - \frac{Y_{13}Y_{32}}{Y_{33}} & \frac{Y_{13}}{Y_{33}} \\ Y_{21} - \frac{Y_{23}Y_{31}}{Y_{33}} & Y_{22} - \frac{Y_{23}Y_{32}}{Y_{33}} & \frac{Y_{23}}{Y_{33}} \\ -\frac{Y_{31}}{Y_{33}} & -\frac{Y_{32}}{Y_{33}} & \frac{1}{Y_{33}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{q1} - jE_{d1} \\ V_{q2} - jV_{d2} \\ i_{q3} - j\dot{i}_{d3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

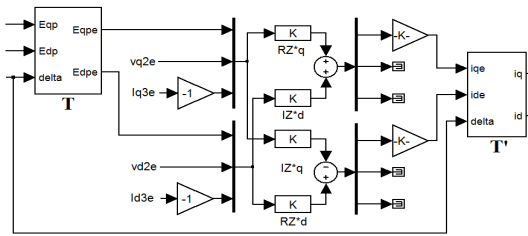


그림 6 계통 어드미턴스 행렬 모델
Fig. 6 Admittance Matrix Model of Power Network

전력계통과 동기발전기간 기준단위 환산은 계통 표준용량과 동기발전기간 비율(1000MVA/612MVA)로 계산되며, 식(9),(10)에 나타난 회전좌표계의 변환을 통해 동기발전기와 전력계통간 전달되는 신호를 보정할 수 있다.

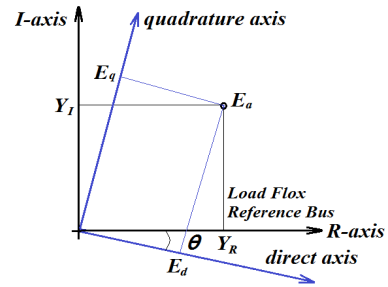


그림 7 동기발전기와 전력계통간 기준 좌표변환
Fig. 7 Convert to reference coordinate between Synchronous Generator and Power Network

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\sin\delta \\ \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad (10)$$

(d) 터빈 발전기 동요방정식

부하의 증가로 인한 발전기 출력의 변화는 회전자 질량의 관성으로 결정되는 비율로 회전자 속도는 감소하지만 조속기를 통해 터빈의 기계적인 출력이 증가되어 주파수는 정상으로 복귀된다. 터빈-발전기의 관성정수는 주파수의 초기 변화를 억제하는 요소로 회전 질량의 운동에너지(Kinetic Energy, KE)와 기기의 정격용량(Rated Capacity, MVA)의 비율로서 시간(sec)으로 표현된다.

$$H = \frac{\text{Kinetic energy of the rotating masses}(W_k)}{\text{Machine rating}(P_a)} \quad (11)$$

$$W_k = \frac{1}{2} J\omega_m^2 = \frac{1}{2} M\omega_m \quad [kgm^2] \quad (12)$$

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (13)$$

터빈의 축 동력(Shaft Power)과 동기발전기의 출력 간 편차로 인해 가속 토크(Acceleration Torque)가 발생하고, 관성정수(Inertia Constant, H)와 제동계수(Damping Coefficient, D)로 인한 부하각(Load Angle)의 변화는 터빈-발전기 동요방정식

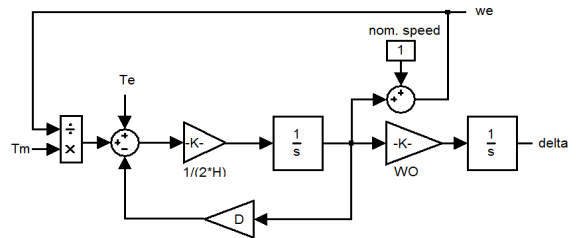


그림 8 터빈 발전기 동요방정식 모델
Fig. 8 Swing Equation Model of Turbine-Generator

(Swing Equation)으로 그림 8과 같이 표현할 수 있다. 모의시험에서는 AVR의 스텝 응답시험을 고려하므로 터빈 출력은 일정한 상태로 가정한다.

2.2 Modified Particle Swarm Optimization (MPSO)

PSO 알고리즘은 진화형 계산기법의 일종으로 1995년 Eberhart와 Kennedy 에 의해 제안되었다. 새, 벌 또는 물고기와 같은 군집(Swarm)에서 사회적 행동 특성을 기반으로 하여 최적해를 탐색하는 알고리즘이다. 즉, 무리가 먹이를 찾아가는 과정에서 무리 전체가 정보를 공유한다는 가설과 무리 내부의 각 개체가 지금까지 자기의 경험과 무리 전체에서 공유하고 있는 정보에 기초하여 행동한다는 개념을 최적화 과정에 도입한 기법이라 할 수 있다. 이 기법은 알고리즘이 단순하고, 계산 시간이 짧으며 대량의 메모리가 필요하지 않다. 또한 연속형과 비연속형의 문제에 적용이 가능하다.

군집 내에서 각각의 개체(Particle)는 다중 탐색 공간에서 하나의 벡터(Vector)로 표현되며, 다음에 위치할 속도벡터(Velocity)를 어떻게 갱신할 것인가를 결정한다. 각각의 개체는 현재의 속도, 지금까지 탐색된 최적해와 군집에서 탐색된 전역 최적해 방향으로 자신의 속도를 갱신한다. PSO 알고리즘은 고정된 횟수나 요구되는 평가지수(Performance Index)에 따라 목적함수(Objective Function)가 만족될 때 까지 반복 수행하게 된다. 탐색공간의 차원(d)과 군집의 개체는 위치벡터 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 와 속도벡터 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 로 표현된다. 개체가 탐색한 지역적인 최적해 $P_{i,best} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ 와 지금까지 탐색된 전역 최적해 $P_{g,best} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 로 정의되며, 개체의 위치와 속도벡터는 식(14),(15)에 의해 갱신되어 진다[4-6].

$$V_{k+1}^i = wv_k^i + c_1r_1(pbest^i - x_k^i) + c_2r_2(gbest - x_k^i) \quad (14)$$

$$x_{k+1}^i = x_k^i + V_{k+1}^i \quad (15)$$

개체가 탐색 공간을 벗어나지 않도록 각 차원 마다 개체의 제한치가 설정되어야 하며 이는 모델정수가 가질 수 있는 범위가 된다. 각 개체는 군집으로 지정된 모든 개체가 서로 정보를 공유하는 전체적인 위상 특성(Fully Topology)을 가지며, PSO 알고리즘의 매 처리 단계에서 지역적 최적해인 $pbest$ 와 전역적 최적해인 $gbest$ 방향으로 자신의 위치를 갱신하게 된다. 2004년 Haupt 에 의해 제안된 관성계수(Inertia Coefficient, ω)는 모든 개체를 효과적으로 수렴시키기 위해 정해진 최대 반복 횟수 까지 선형적으로 감소하는 값으로 식(16)과 같이 정의하였다. 일반적으로 관성계수는 “1”에서 “0”까지 감소하는 값을 갖는다.

$$w = [w_{max}] - \left[\frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \right] \times iter \quad (16)$$

여기서 w_{max} : 초기 관성계수
 w_{min} : 최종 관성계수
 $iter_{max}$: 최대 반복 횟수
 $iter$: 현재 반복 횟수

PSO 알고리즘은 다음에 기술한 7단계로 수행되며, 탐색 영역의 한계로 인해 실행 가능한 영역이 제한되므로 갱신된 새로운 위치벡터 x_k 가 해석 공간을 벗어나는 제약 위반시 해석 공간의 경계에 고정시키거나, 해석 공간의 경계에서 반사시키는 등의 조치가 필요하다.

Step 1: PSO의 다양한 변수를 설정한다.

Step 2: 무작위로 위치와 속도를 갖는 개체를 초기화

Step 3: 최적화 목적함수를 평가

Step 4: 지역 최적해인 $pbest$ 의 개체 적합도 비교

Step 5: 최적해를 가진 개체를 전역 최적해 $gbest$ 로 인식

Step 6: 식(14),(15)에 따라 새로운 속도와 위치를 계산

Step 7: 정지 기준치가 만족할 때까지 3~6 단계 반복 수행

상태 공간 방정식의 고유치 해석을 통해 속도와 위치벡터를 갱신할 수 있도록 Clerc는 긴축지수(Constriction Factor, χ)를 제안하였다. 기본적으로 PSO 알고리즘은 전역 최적해를 구하기 위해 목적함수를 최소화 하는 방향으로 모든 개체가 자연적으로 수렴되도록 동작된다. 관성계수 ω 를 적용하는 경우 일정한 비율로 개체의 탐색 범위를 강제하여 감소시킬 수 있으므로 보다 빠르게 개체를 수렴시킬 수 있다. 그러나 모델의 특성에 따라 수렴 속도가 빠른 경우에는 지역적인 최적해에 고립될 수 있다. 따라서 개체의 자연적인 수렴 특성에 개체의 탐색 범위의 감소 비율을 적절하게 적용하는 방식의 긴축지수를 식(17)-(19)와 같이 적용하였다[5-8].

$$V_{k+1}^i = \chi(v_k^i + c_1r_1(pbest^i - x_k^i) + c_2r_2(gbest - x_k^i)) \quad (17)$$

$$x_{k+1}^i = x_k^i + V_{k+1}^i \quad (18)$$

$$\chi = \frac{2}{|2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}|} \quad (19)$$

여기서 $\phi = \phi_1 + \phi_2$, $\phi > 4$

모든 개체는 목적함수에 의해 평가된 적합치(Fitness Values)의 오차에 따라 속도벡터가 갱신된다. 여기서 목적함수는 적분된 오차제곱을 최소화 하는 값(Q)으로 식(20)과 같이 정의하였다. 기준신호는 현장시험을 통해 실측된 동기발전기의 단자전압과 여자시스템의 계자전압, 계자전류이며, 정의된 모델에서 추정된 각 신호와의 편차를 구하여 계산한다. 해석의 정밀도를 위해 모든 평가치는 동일한 가중치(Weighted Factor)가 적용되어야 하며, 신호의 과도 기간 동안 곡선적합(Curve Fitting)의 정밀도를 높이기 위해 식(24)와 같이 추가의 가중치가 부여할 수 있다[9, 10].

$$Q = \int_0^{Ts} (e_{vt}^2 + e_{vf}^2 + e_{if}^2 + ke_{ext}^2) dt \quad (20)$$

$$e_{vt} = (V_{t_measured} - V_{t_estimated}) \quad (21)$$

$$e_{vf} = (V_{f_measured} - V_{f_estimated}) \quad (22)$$

$$e_{if} = (I_{f_measured} - I_{f_estimated}) \quad (23)$$

$$e_{ext} = (V_{t_transient_measured} - V_{t_transient_estimated}) \quad (24)$$

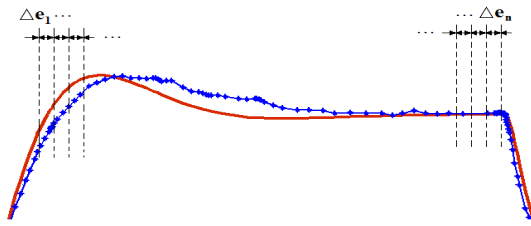


그림 9 목적함수의 오차 계산

Fig. 9 Deviation Calculation of Objective Function

$$+ (V_{f_transient_measured} - V_{f_transient_estimated})$$

$$+ (I_{f_transient_measured} - I_{f_transient_estimated})$$

여기서

- e_{vt} : 실측된 신호와 추정된 신호간 동기발전기 단자전압 오차
- e_{vf} : 실측된 신호와 추정된 신호간 여자시스템 계자전압 오차
- e_{ift} : 실측된 신호와 추정된 신호간 여자시스템 계자전류 오차
- e_{ext} : 과도 기간 동안 실측된 신호와 추정된 신호간 전압 오차
- k : 감도 계수(Sensitivity Coefficient)

목적함수에서 오차의 계산은 그림 9에 나타난 것과 같이 단위 시간에서 발생한 두 신호간 편차의 제곱을 한 주기 동안 적분한 값을 적용한다.

하나의 개체는 d -차원의 변수(Parameter)를 가지며, 각 변수가 모델의 결과에 미치는 영향에는 차이가 있다. 하나의 개체가 포함하고 있는 각 변수에 할당되는 개체와 목적함수에 의해 평가된 적합치와 상관관계를 살펴보면, 발전기 단자전압, 여자시스템의 계자전압 또는 계자전류에 대해 강한 관계성을 갖는 변수들이 확인된다. 약한 상관 특성을 갖는 개체는 지역해(Local Solution)의 탐색 범위를 제한하고, 전역해(Global Solution)의 가중치를 높여 탐색 범위가 증가되도록 하고, 강한 상관 특성을 갖는 변수에는 지역해의 속도벡터가 가중되도록 식(25)-(28)과 같이 수정된 PSO를 적용하였다[8-10].

$$V_{k+1}^i = \chi(v_k^i + corr_k c_1 r_1 (pbest_k^i - x_k^i) + c_2 r_2 (gbest - x_k^i)) \quad (25)$$

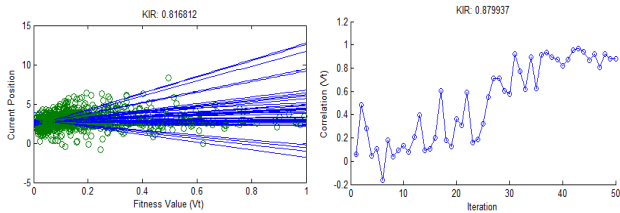
$$corr_k = corr_t / \max(corr_t) \quad (26)$$

$$corr_t = \sum [corr(fitness_m, x_k^i)]_{m=vt,vf,ift} \quad (27)$$

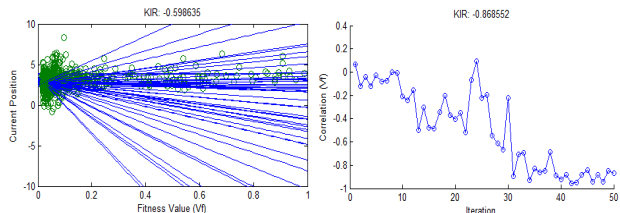
$$\begin{cases} corr_t = corr_t & \text{for } corr_t < 0 \\ corr_t = 0 \parallel corr_t & \text{for } corr_t \geq 0 \end{cases} \quad (28)$$

하나의 변수에 할당되는 모든 개체는 목적함수의 결과에 따라 상관계수(Correlation Coefficient)는 다르게 나타난다. 여자시스템 변수(KIR)의 경우 적합치를 최소화하는데 발전기 전압에 비해 계자전압과 계자전류와 상관계수는 더 높게 나타난다[7]. 이러한 특성은 표 1과 같이 가중치로 계산될 수 있으며, 매 해석 단계에서 파라미터에 할당되는 모든 개체의 지역해에 가중하여 관계성이 높은 개체의 탐색 범위를 크게 할 수 있고 식(28)과 같이 다양한 조정이 가능하다.

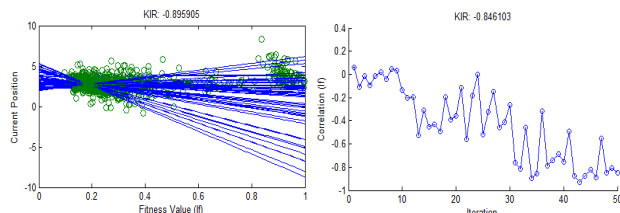
PSO 알고리즘에 의해 개체는 새로운 위치로 갱신되므로 목적함수에 의해 평가된 적합치와 상관계수는 동일한 값으로 계산되지는 않는다.



(a) KIR 변수와 발전기 전압 평가치의 상관관계



(b) KIR 변수와 여자기 전압 평가치의 상관관계



(c) KIR 변수와 여자기 전류 평가치의 상관관계

그림 10 모델정수와 평가치의 상관관계

Fig. 10 Correlation between Model Parameter and Fitness Value

표 1 여자시스템 변수와 평가치의 상관관계

Table 1 Correlation between Static Exciter Parameters and Fitness Value

Parameter	Gen. Volt (V_t)	Exciter Volt (V_f)	Exciter Current (I_f)	Weighted Factor
KPR	-0.395761	0.692410	-0.073758	0.502705
KIR	0.816812	-0.598635	-0.895905	1.000000
KPM	-0.064958	0.028826	0.074740	0.072911
TA	-0.097926	0.152932	0.074471	0.140753
KIM	-0.136070	0.006446	0.081943	0.097112
KG	-0.014162	-0.045809	-0.041983	0.044110
TR	0.053509	-0.050604	-0.120362	0.097118

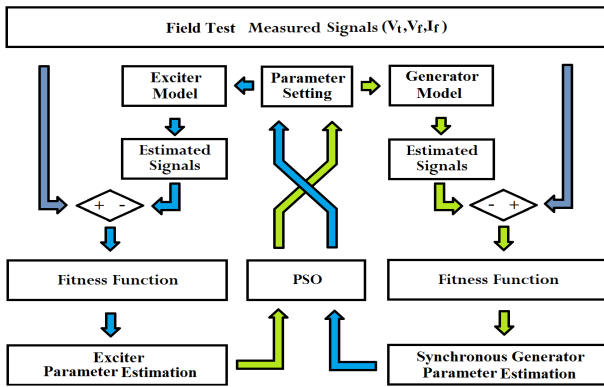


그림 11 동기발전기 시스템 모델정수 추정 흐름도
 Fig. 11 Flow Diagram of Estimating Model Parameters

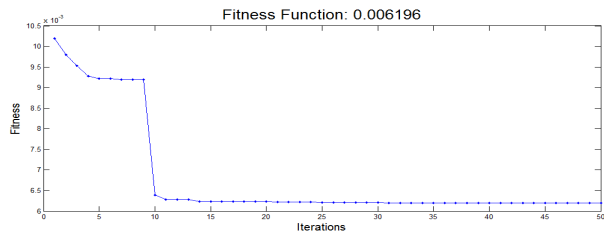


그림 12 목적함수의 변화 이력
 Fig. 12 History Trend of Fitness Function

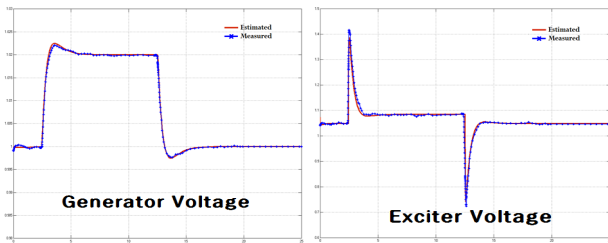


그림 13 무부하 2% AVR Step 응답 신호 비교결과
 Fig. 13 2% AVR Step Response under No-load Conditions

3. 동기발전기 시스템 모델정수 추정

3.1 모델정수 추정결과

일반적으로 발전기 무부하 운전 특성은 계통안정화장치(Power System Stability, PSS)가 Off 된 조건에서 $\pm 2\%$ AVR 스텝 응답시험 결과로서 포화특성을 포함하는 동기발전기의 제정수를 구할 수 있다[3].

현장시험에서 실측한 자료를 기준신호로 하여 정의된 모델에서 출력된 신호와 오차가 최소화되는 최적해에서 모델정수를 추정한다. 무부하 운전조건에서는 여자시스템의 일부 모델정수와 포화계수를 구할 수 있으며, 부하 운전조건에서 등가운전 상태와 일치하도록 고유치 해석을 통해 정의된 모델의 상태변수를 초기 설정하고, 그림 11과 같이 동기발전기와 여자시스템의 모델정수

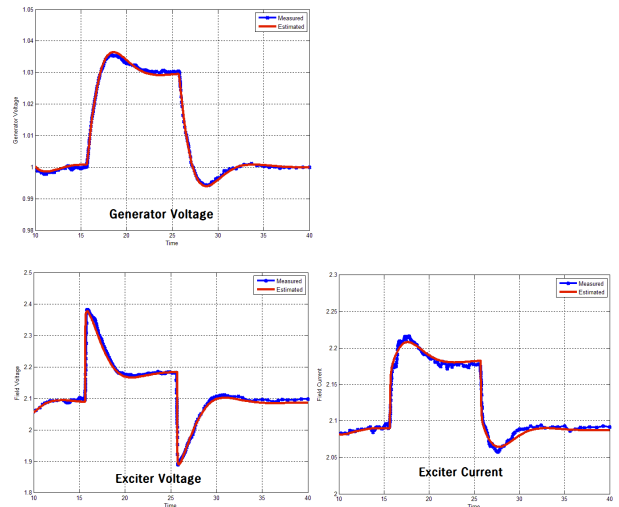


그림 14 부하 2% AVR Step 응답 신호 비교결과
 Fig. 14 2% AVR Step Response Results under load Conditions

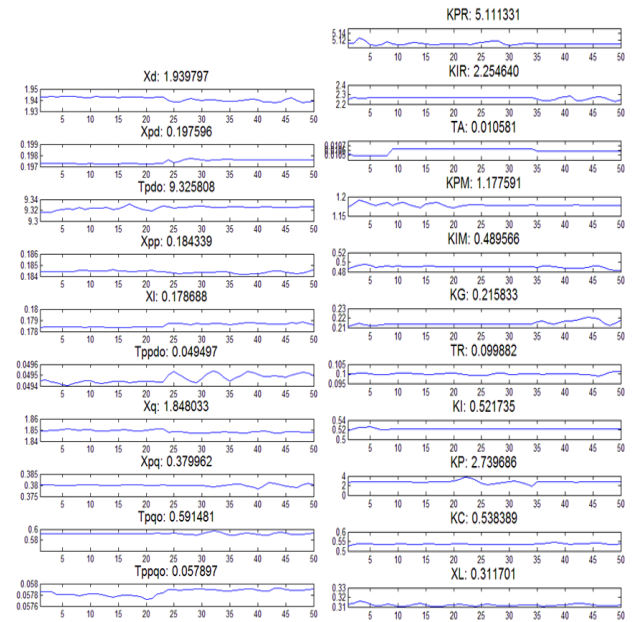


그림 15 동기발전기 시스템 모델정수 추정 이력
 Fig. 15 History Trend of Model Parameters

를 상호 보정하면서 최종적으로 최적해를 구하는 기법을 적용하였다[9-11].

PSO 모의시험은 정지 기준까지 반복적으로 수행되며, 목적함수는 그림 12와 같이 일정 수준으로 점차적으로 감소된다. 이는 해석 과정을 정량적으로 보여주는 지표로서 상대적으로 추정결과에 대한 정밀도의 정도를 확인할 수 있다[6].

무부하 2% AVR 스텝 응답시험에서 실측된 단자전압과 계자전압을 기준신호로 하여 정의된 모델에서 출력된 추정된 신호와 곡선적합을 통해 비교한 결과는 그림 13과 같이 매우 근사적으

표 2 동기발전기 모델정수 추정결과 비교

Table 2 Comparison of Synchronous Generator's Estimated Parameters

Parameter	Maker (Set value)	Field Test	Estimated (PSO)
X_d	1.980	2.199	1.939797
X_d'	0.250	0.257	0.197596
T_{do}'	4.161	7.500	9.325808
X_d''	0.197	0.228	0.184339
X_f	0.142	0.142	0.178688
T_{do}''	0.031	0.048	0.049497
X_q	1.890	1.597	1.848033
X_q'	0.443	0.393	0.379962
X_q''	0.197	0.228	0.184339
T_{qo}'	0.600	0.915	0.591481
T_{qo}''	0.060	0.050	0.057897
$S_{1.0}$	0.097	0.100	0.048073
$S_{1.2}$	0.304	0.238	0.292551

표 3 여자시스템 모델정수 추정결과 비교

Table 3 Comparison of Static Exciter's Estimated Parameters

Parameter	Maker (Set value)	Field Test	Estimated (PSO)
KPR	3.97	4.50	5.111331
KIR	3.97	4.50	2.254640
TA	0.01	0.01	0.010581
KPM	1.00	1.00	1.177591
KIM	0.00	0.00	0.489566
KG	0.00	0.00	0.215833
TR	0.00	0.00	0.099882
KP	5.04	5.04	2.739686
KI	0.00	0.00	0.521735
KC	0.17	0.17	0.538389
XL	0.00	0.00	0.311701

로 일치하고 있다. 두 신호의 오차가 최소가 되는 개체의 위치에서 모델정수가 구해진다[9, 10].

무부하 시험조건에서는 부하전류와 계자전류에 따른 정류 손실과 누설 리액턴스의 영향이 감안되지 않으므로 여자시스템의 추정된 모델정수는 제한적이다. 그러나 포화계수는 동기발전기 정격전압과 1.2배의 정격전압에서 계자전압의 기준 변화치를 가지므로 유효한 의미를 갖는다. 따라서 추정된 포화계수를 적용하여 부하 조건에서 모델정수를 재 추정하였으며, 두 신호의 곡선 적합 결과는 그림 14와 같이 확인할 수 있다.

모델정수 추정결과 최적해는 소수점 이하 6자리까지 구해지며 그림 15와 같이 변화 이력이 확인된다.

제작사에서 제시한 설정치, 현장시험으로부터 계산한 결과와 PSO 알고리즘에 의한 추정된 결과의 비교는 표 2와 3에 나타내었다. 동기발전기 모델정수 추정치 대부분 제작사에서 제시한 설

정치와 유사하지만 과도 개로시정수(T_{do}')는 차이가 있다. 이는 현장시험으로 부터 얻어진 결과와도 유사하다[9, 10, 12].

3.2 성능평가

PSO 알고리즘을 통한 모델정수 추정결과에 대한 평가는 실측된 신호와 정의된 모델에서 출력된 신호간 곡선적합 정도를 정량적으로 계산하여 확인할 수 있다. 상대오차의 평균치(Mean Magnitude of Relative Error, $MMRE$), 일부분에서 오차가 평균치에 크게 반영되는 현상을 고려한 지정된 백분율 지수로서 표시하는 예측수준(Predictions within level, $PRED$)과 신호의 상대오차(Relative Error Deviation)의 상관 관계성을 나타내는 피어슨 상관계수(Pearson correlation, r)를 사용하여 평가할 수 있다.

$$MMRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Measured(x_i) - Estimated(\hat{x}_i)|}{Measured(x_i)} \quad (29)$$

$$PRED(\sigma) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{|x_i - \hat{x}_i|}{x_i} \leq \frac{\sigma}{100} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (30)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (31)$$

- 여기서 x_i : 단자전압 또는 계자전압 측정치
- \hat{x}_i : 단자전압 또는 계자전압 추정치
- \bar{x} : 단자전압 또는 계자전압 평균치
- σ : 요구 수준 평가치

최종적으로 실측된 신호와 추정된 신호간 평가결과는 표 4와 같이 상대오차의 평균치($MMRE$)는 작은 값으로 계산되고, 예측수준($PRED$) 5%에서 90% 이상 일치하는 것으로 확인된다. 또한 두 신호의 상관 관계성을 나타내는 피어슨 상관계수는 0.92 이상 일치하는 것으로 분석되어 PSO 알고리즘을 사용한 동기발전기 시스템 모델정수의 추정결과는 매우 우수하다.

표 4 동기발전기 시스템 모델정수 추정결과 성능평가

Table 4 Performance Evaluation of Parameter Estimator Results of Synchronous Generator System Models

Performance Index	Generator Voltage	Exciter Voltage	Exciter Current
$MMRE$	0.000696	0.012024	0.003996
$PRED$	(25)	100	100
	(5)	100	91.70
	(2)	100	84.58
Correlation Coefficient(r)	1.000000	0.925092	0.964794

4. 결 론

예기치 않은 동기발전기의 불시정지 또는 대응량 부하탈락으로 발생하는 전력계통의 과도현상은 동기발전기 시스템이 갖고 있는 제정수의 영향으로 나타나며, 이러한 정보를 포함하고 있는 동기발전기 시스템의 출력 신호를 기준신호로 하여 이와 일치하는 정의된 모델정수의 출력 신호로 부터 모델정수를 추정하였다. 무부하 운전조건에서 포화특성을 포함하는 여자시스템의 모델정수를 추정하고, 1기 무한대 모선에 연계된 부하조건에서 등가 위치를 고유치 해석하여 표준모델의 초기치를 설정하고 동기발전기와 여자시스템의 모델정수를 반복적으로 상호 보정하는 방식으로 모델정수의 최적해를 재 추정하였다.

최적화 알고리즘은 사회적 행동 양식에 기반한 확률적 최적화 이론인 PSO 알고리즘을 적용하였으며, 해석공간에서 개체의 탐색 범위를 넓히고 전역해의 방향으로 모든 개체가 수렴할 수 있도록 간축지수를 사용하였다. 목적함수를 최소화하는데 기여도가 높은 개체의 특성이 반영될 수 있도록 상관계수를 적용한 MPSSO 알고리즘으로 모의시험을 수행한 결과 성능평가에서 우수한 해석결과를 얻을 수 있었다.

PSO 알고리즘은 구현이 쉽고 빠른 결과를 얻을 수 있어 온-라인 또는 실시간으로 발전기의 안정도를 해석하는데 적합한 기법으로서 전력계통의 취약점을 사전에 발굴할 수 있고, 발전기 제어계 시스템의 최적 조정을 통해 전력계통의 안정도 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 기존에 많은 시간이 소요되었던 수치 해석이나 시행착오법의 한계를 벗어나 새로운 접근 방법으로 최적화 알고리즘을 사용한 모델정수의 추정 기법을 실증함으로써 이를 통해 다양한 기종의 동기발전기 시스템 뿐 아니라 계통안정화장치 (Power System Stabilizer)와 터빈-조속기(Governor)를 포함하는 모델정수를 추정할 수 있는 기반이 마련되었다. 동기발전기 시스템의 모델정수를 추정할 수 있는 최적화 알고리즘의 구현은 전력시스템을 해석하기 위한 유용한 도구를 확보하는 것이며, 계통안정도의 제고를 위한 고급 정보를 창출할 수 있는 기회도 얻을 수 있다. 다양한 기종과 조건에서 정밀도 높은 향상된 모델정수 추정 기법에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

References

[1] Power Technologies Inc., "PSS/E 30, Volume II : Program Application Guide", 2005Power Systems
 [2] Xiaopeng LIU,"Power System Dynamic Vulnerability under Extreme Transmission Line Contingencies",2007
 [3] Pedro Rafael Barros Martins Araujo, "Dynamic Simulation in Realistic-Size Networks", 2010
 [4] J.Kennedy and R.Eberhar, "Particle Swarm Optimization", in proceeding, IEEE International Conference on Neural Networks(ICNN), vol. 4, Nov 1995, pp. 1942-1948
 [5] Venkata Swaroop Pappala, "Application of PSO for Optimization Power Systems under Uncertainty", 2009
 [6] R.Shivakumar and Dr.R.Lakshminpathi, "Implementation of an Innovative Bio Inspired GA and PSO Algorithm

for Controller design considering Steam GT Dynamics", IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 7, Issue 1, No. 3, January 2010

[7] Vorgelegt von, Sabine Helwig, "Particle Swarms for Constrained Optimization", Erlangen, 2010
 [8] Chin-Chu Tsai, "PMU-based parameter identification for the synchronous generator dynamic model", 2011
 [9] HyungJoo Choi, HeungHo Lee, "Parameter Estimation of the Synchronous Generator Exciter based on PSO", IEEE-ICIT International Conference, 2014
 [10] HyungJoo Choi, HeungHo Lee, "Parameter Estimation of the Synchronous Generator with Modified PSO", ICEE International Conference, 2014
 [11] J.G. Sootweg, J. Persson, A.M Van Voordern, GC. Raap, W.L. Kling "A study of the eigenvalue analysis capabilities of power system dynamics simulation software", 14th PSCC, Sevilla, 24-28, June 2002
 [12] D.J Kim, Y.H. Moon, J.M Jung, "Parameter derivation of synchronous generator", KERI, 2006

저 자 소 개



최형주(Hyung-Joo Choi)

1967년 9월 15일생. 1999년 청운대 전자계산학과 졸업. 2010년 충남대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 충남대학원 전기공학과(박사수료), 현재 SK E&S 부장
 E-mail : hj.choi@sk.com



김인수(In-Soo Kim)

1967년 12월 8일생. 1990년 홍익대 전기제어공학 졸업. 2010년 충남대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 충남대학원 전기공학과(박사수료), 현재 한국수자원공사 부장
 E-mail : kinsoo@kwater.or.kr



이흥호(Heung-Ho Lee)

1950년 10월 28일생. 1973년 서울대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1977년 동 대학원 공업교육과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 충남대학교 전기공학과 교수
 E-mail : leehh@cnu.ac.kr