

퍼지제어를 이용한 비선형 2기 5모선 전력계통의 안정화

Stabilization of Nonlinear Two-Generator Five-Bus Power Systems Using Fuzzy Control

문 윤 철
(Un-Chul Moon)

Abstract : This paper presents the application of a FARMA (Fuzzy Auto-Regressive Moving Average) controller to stabilization of nonlinear Two-Generator Five-Bus Power Systems. The control rules and the membership functions of the FARMA controller are generated automatically without using any plant model. High complexity and severe nonlinearity of power systems are introduced and Two-Machine Five-Bus Power System stabilization problem is formulated. The simulation results demonstrate the effectiveness and application possibility of the FARMA controller to the control problem of high order and nonlinear plants.

Keywords : fuzzy control, power system stabilization, nonlinear two-machine five-bus system.

I. 서론

계통의 안정화 문제는 전력계통 운용의 중요 문제들 중의 하나로 인식되어 왔다. 이는 정상적인 운전 상태하에서 부하변동이나 선로상태의 변화 등 계통조건이 변하였을 때 특정 발전기에 발생하는 주파수 동요현상을 말한다 [1] [2]. 이에 따라, 전력계통의 안정도를 개선하기 위한 전력계통 안정화(Power System Stabilizer, PSS)에 관한 연구가 1960년대 후반부터 진행되어 왔으며, 그 결과 많은 종류의 제어방법들이 제시되었다. 위상보상 회로를 구성하여 감쇄크기의 조절을 PSS의 이득으로 조절하는 방법 [1] [2], 위상보상회로의 시정수에 따른 근궤적을 구하여 PSS의 계수를 구하는 방법 [3], 동요모드의 고유치를 지정하는 극배치방법 [4], 고유치의 감도를 이용하는 방법 [5] 등이 발표된 바 있다. 이러한 방법들은 계통모형의 기계적입력을 고정시킨 후 특정한 동작점을 기준으로 PSS의 이득(gain)을 고정하는 방법이다. 따라서 다양한 계통상황들을 절충하여 이득을 결정하기 때문에 각 동작점마다 최상의 제어를 실행하는 것은 기대하기 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 자기동조제어기법(Self-Tuning Regulator, STR)을 이용하여 각 동작점을 추적하는 방식들이 제시되었다 [6] [7] [8].

전통적으로 위와 같은 제어기들은 대상시스템의 수리적 모델링 기법을 바탕으로 한 선형화된 모형을 이용하여 설계되었다. 따라서 전력계통 분야와 같이 복잡하고 비선형인 시스템에 대해서는 이러한 제어기를 설계하기가 용이하지 않은 실정이다 [9]. 1970년대 후반부터는 모델링이 불가능한 미지 계통의 자동제어를 위한 한가지 접근방식으로 Zadeh에 의해 제안된 퍼지논리(Fuzzy Logic) [10]를 이용한 제어방법이 Mamdani에 의해 소개되었다 [11] [12]. 이러한 퍼지논리제어기는 여러 다양한 시스템에 대하여 성공적으로 적용되었다 [13].

전력계통 분야에서는 M. A. M. Hassan와 O. P. Malik, 그리고 G. S. Hope 가 발전기의 상태변수들을 근거로 한 표준소속함수(Standard Membership Function)를 이용하여 퍼지 PSS의 제어입력을 계산하였다 [14]. T. Hiyama와 M. Kugimiya, 그리고 H. Satoh 등은 오프라인으로 퍼지제어기의 변수들을 계산하는 방식을 제시하였다 [15]. 박영문 등은 퍼지 자동회귀 이동평균(Fuzzy Auto-Regressive Moving Average, FARMA) 모형을 이용한 자동학습 퍼지제어기(Self-Organizing Fuzzy Logic Controller)를 제시한 후 [16] 이를 PSS설계에 응용하는 방식을 제시하였다 [17].

기존의 퍼지논리제어기가 제어규칙을 형성하기 위한 인간 전문가가 필요한 반면, FARMA 제어기는 인간의 학습방법을 모방하여 스스로 제어규칙을 형성하는 알고리즘이다. [17]에서 저자는 저주파 진동을 해석하기 위한 대상 계통으로써, 선형화된 1기 무한모선(One Machine-Infinite Bus) 모형을 대상으로 하여 FARMA PSS의 특징을 확인하였다. 그러나 선형화된 1기 무한모선 모형은 복잡한 전력계통을 묘사하는데 그 한계를 가질 수 밖에 없다. 일반적인 퍼지 제어기의 특성이 비선형성으로부터 기인함을 감안할 때, 복잡한 고차 비선형 모형에 직접 적용하여 실제 전력계통에의 적용 특성을 파악할 필요가 있다.

본 논문에서는 [17]에서 제시된 FARMA PSS를 실제적인 전력계통의 비선형 2기 5모선(Two Machine - Five Bus) 모형에 적용하여 FARMA PSS의 특성을 분석하였다. 전력계통의 일반적인 특징 및 안정화 문제를 소개한 후, 모의실험에서 사용될 비선형 2기5모선 시스템의 구체적인 모형을 제시하였다. 발전기와 조속기 그리고 여자기 등은 IEEE의 표준화된 화력발전기와 수력발전 모형을 사용하였고, 매 순간 비선형 방정식인 전력조류(Load Flow)를 풀어서 네트워크의 전압과 전력 및 주파수의 변화를 계산하였다. 전력조류방정식은 일관적

으로 해석적인 방법이 존재하지 않기 때문에 주어진 조건하에서 반복적인 수치계산으로 해를 구하게 된다. 따라서, 이산 시간 모의 실험을 위하여 발전기, 조속기, 여자기 등의 방대한 양의 미분방정식과 이와 연동되는 전력조류 방정식을 매 시간 구간마다 반복적으로 계산하였다. 이와 같은 과정을 통하여, 다변수, 비선형성을 포함으로써, 실제 전력계통에 근접한 모의 실험이 가능하도록 하였다. 또한 제시된 2기5모선 모형에 FARMA PSS를 적용함으로써, 다변수, 비선형 플랜트에 대한 FARMA 제어기의 적용 가능성을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 기술된다. 2장에서는 FARMA PSS에 대한 내용을 간략하게 소개한다. 3장에서는 전력계통의 일반적인 특성을 소개한 후, 2기 5모선 발전계통의 모형을 구체적으로 설명한다. 4장에서는 모의 실험 결과를, 그리고 최종적인 결론을 5장에 기술하였다.

II. FARMA 제어기[16]

2장에서는 저자들이 제시했던 FARMA 모형 제어 알고리즘의 대략적인 내용을 소개한다. FARMA제어기에서는 전문가의 지식을 이용하지 않고 플랜트의 입출력들로부터 퍼지제어규칙을 정의한다. 또한, 새롭게 정의된 제어규칙에 부합하도록 퍼지추론과 역퍼지화 과정을 수정하였다. 생성된 제어규칙은 적절히 분할된 제어규칙 공간(Rule Space)에서의 갱신 과정을 통해 대상 플랜트를 학습하게 된다.

1. FARMA 제어규칙

일반적으로 플랜트의 출력은 과거의 플랜트 입출력의 함수로 표시된다. 하나의 입력과 하나의 출력을 가진 이산시간 플랜트에 대해, 과거의 입력과 출력에 의해 현재의 출력은 다음과 같은 비선형 방정식에 의해 표시된다.

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), y(k-2), \dots, u(k), u(k-1), u(k-2), \dots) \quad (1)$$

여기서, $y(k)$ 와 $u(k)$ 는 각각 k 번째 시간에서의 출력과 입력이 된다. 선형 시스템인 경우 $f(\cdot)$ 는 y 와 u 들의 선형 결합인 ARMA (Auto-Regressive Moving Average) 모형의 형태로 표현될 수 있다.

(1)을 제어 목적에 맞게 다시 쓰면 k 번째 시간에서 제어입력 $u(k)$ 를 결정하기 위한 식은 다음과 같다.

$$u(k) = g(y(k+1), y(k), y(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots) \quad (2)$$

이 식은 (1)의 역함수(Inverse mapping)로 볼 수 있다. 즉, (1)에 의해 표현되는 플랜트는 $y(k+1), y(k), y(k-1), y(k-2), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots$ 이 주어지면 입력 $u(k)$ 가 결정된다. 이는 다음 스텝의 기준값(Reference)이 $y(k+1)$ 일 때, 출력 $y(k+1)$ 이 $y(k+1)$ 을 내도록 입력 $u(k)$ 를 결정한다는 것을 의미한다. 즉, (1)과 같은 플랜트의 입출력을 이용하여, (2)와 같은 제어규칙을 도출할 수 있다. 이러한 사실을 바탕으로 FARMA 제어규칙은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} & \text{IF } y_i(k+1) \text{ is } A_i \text{ AND } y(k) \text{ is } A_j \text{ AND } y(k-1) \text{ is } A_k \\ & \text{AND } y(k-n) \text{ is } A_{n+2}, \text{ AND } u(k-1) \text{ is } B_l \text{ AND } u(k-2) \text{ is } \\ & \text{AND} \dots \text{AND } u(k-m) \text{ is } B_m, \end{aligned} \quad (3)$$

THEN $u(k)$ is C_i , (i -번째 제어규칙)

이때, $y_i(k+1)$ 은 $(k+1)$ 시간에서의 기준값이다. FARMA 제어기는 전문가에 의해 미리 만들어진 제어규칙을 사용하지 않고, 매 시구간마다 (1)과 같은 과거의 입력과 출력쌍을 사용하여 (2)와 같은 제어규칙을 형성한다. 예를 들어, 선형1차 시스템의 경우에 대해서는, " $y(k+1) = ay(k) + bu(k)$ "로 표현되기 때문에 제어규칙은 "If $y_i(k+1)$ is A AND $y(k)$ is B Then $u(k)$ is C "와 같이 정해진다. 이와 같은 FARMA 제어규칙은 플랜트의 입출력 쌍으로부터 형성되기 때문에 퍼지제어규칙을 형성하기 위한 소속함수를 정의해 주어야 한다. 각 언어적 변수, $A_j (1 \leq j \leq n+2)$, $B_l (1 \leq l \leq m)$, C_i 의 소속함수(Membership Function)들은 적절히 가정된 입력과 출력 범위를 바탕으로 통일된 방식으로 지정된다. 예를 들어, 플랜트의 출력 x_1 의 퍼지집합을 A_1 이라고 한다면 그 소속함수는 다음과 같이 지정된다.

$$\mu_{A_1}(x) = \begin{cases} 1 + (x - \underline{x}_1) / (\bar{x}_1 - \underline{x}_1) & \text{if } \underline{x}_1 \leq x < \bar{x}_1 \\ 1 - (x - \underline{x}_1) / (\bar{x}_1 - \underline{x}_1) & \text{if } \underline{x}_1 \leq x < \bar{x}_1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

이때, \underline{x}_1 과 \bar{x}_1 는 각각 x_1 의 하한과 상한을 나타낸다.

(3)과 같은 FARMA 제어규칙은 매 시구간마다 형성되어, 새로운 상황이 학습됨에 따라 제어 규칙의 수는 증가하게 된다. 제어규칙베이스 (Rule Base)의 자동구성 과정은 3절에서 구체적으로 설명된다.

2. 추론과 역퍼지화

매 스텝의 플랜트 상태는 퍼지 싱글톤(singleton)을 사용하여 퍼지제어기의 입력으로 전환된다. 일반적인 퍼지제어에서는 제어기의 입력과 각 제어규칙과의 연산을 통해 적합도(Truth Value)를 생성한다. 이 때, FARMA 제어기에서는 유클리디언 거리(Euclidean Distance)와 유사함수(Similarity Function)를 이용한 적합도의 계산 방식을 사용한다. 이는 플랜트의 상황과 관련이 떨어지게 되는 제어규칙은 추론에 영향을 주지 않도록 하는 방식으로서, 비선형 함수의 학습이라는 관점에서 기존의 방식보다 더 정확한 추론 방식이다[16].

각 적합도들로부터 높은 가능성을 갖는 출력 퍼지집합 C_i 의 소속함수는 ϕ -연산[18]을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$\mu_{C_i} = \bigcap_i (\omega_i \phi \mu_{C_i}) \quad (5)$$

$$\omega_i \phi \mu_{C_i} = \begin{cases} 1 & \text{if } \omega_i \leq \mu_{C_i} \\ \mu_{C_i} & \text{if } \omega_i > \mu_{C_i} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 ω_i 는 i 번째 제어규칙의 적합도이고, μ_{C_i} 는 i 번째 제어규칙의 후건부의 소속정도(Membership Degree)이다.

ϕ -연산은 각 제어규칙에 대하여 출력 퍼지집합 C_i

를 구성하고, 이 출력 퍼지집합 중에서 소속정도가 1인 범위를 각 제어규칙의 “제어범위(Control Range)”로 생성한다. 또한, 각 제어범위의 공통된 부분을 “순수 제어 범위 (Net Control Range, NCR)”로 결정하면, 이는 (5)에서 출력퍼지집합 C , 중에서 소속정도가 1이 되는 부분이다. 순수제어 범위는 시스템의 출력을 $y_r(k+1)$ 로 만들기 위한 가장 높은 가능성을 갖는 제어량들의 집합이라는 물리적인 의미를 갖는다.

역퍼지화는 퍼지 추론을 통해 얻어진 퍼지집합으로부터 보통값을 선택하는 것이다. 따라서 FARMA모형에서 역퍼지화는 퍼지추론을 통해 얻어진 순수제어범위로부터 보통값을 결정하는 것이 된다. 순수제어범위에 속하는 어떠한 값들도 제어값으로의 잠재성을 가지고 있다. 그러나, 어떤 값들은 오버슈트(overshoot)를 일으키고 어떤 값은 느리게 수렴하도록 한다. 이 문제는 역퍼지화 과정에 예측과정을 포함시킴으로써 해결한다. 즉, 먼저 아래와 같이 매 스텝에서의 “잠정적인 기준값 (Temporary reference)” $y_r(k+1)$ 을 다음과 같이 설정한다.

$$y_r(k+1) = y(k) + \alpha(y_{ref} - y(k)) \quad (7)$$

이때 α 는 원하는 응답을 얻기 위하여 0과 1사이에서 적절히 선정한다. 따라서 한 스텝에 바로 기준값 y_{ref} 를 따라가지않고 적절한 제적 $y_r(k+1)$ 을 추종하도록 한다. 또한, 아래와 같이 최근의 플랜트의 출력값들로부터 Newton의 역차분공식 [19]을 이용하여 $y(k+1)$ 의 값을 추정한다. Newton의 역차분공식은 간단한 산술식으로 계산되기 때문에 이를 실시간으로 계산하는 것은 거의 부담이 되지 않는다.

Newton의 역차분공식을 이용하여 $y(k+1)$ 의 값을 추정 후, (8)에서와 같이 플랜트의 ARMA 모형의 $u(k)$ 계수의 부호를 가정하여 순수제어범위를 조정하였다.

$$sign(\Delta u(k)) \equiv sign(b_1)sign(y_r(k+1) - \hat{y}(k+1)) \quad (8)$$

여기에서, b_1 은 플랜트 ARMA모형에서 $u(k)$ 의 계수이며, $\hat{y}(k+1)$ 은 $(k+1)$ 시간에서의 추정값이다. 최종적인 제어량은 조정된 순수제어범위의 중앙값으로 선정한다.

3. 제어규칙 베이스의 자동구성

FARMA 제어규칙은 매 시간구간마다 생성된다. 각각의 규칙들은 $(n+m+2)$ 차원의 제어규칙공간(즉, $x_1, x_2, \dots, x_{(n+m+2)}$)에서는 한 점으로 나타내어진다. 제어규칙 베이스를 개선시키기 위해서는 다음과 같은 평가함수를 설정한다.

$$J = |y_r(k+1) - y(k+1)| \quad (9)$$

$(k+1)$ 번째 시간에서 k 번째 제어의 결과로 나타나는 실제 플랜트의 출력 $y(k+1)$ 을 사용하여 평가함수 J 를 계산할 수 있다. 그리고 제어규칙 베이스를 적절하게 부분공간으로 분할한 후, 각 부분공간에 평가함수가 적은 제어규칙 하나만을 저장한다. 다시 말해서, 주어진 영역에서 목표값을 더 잘 따라가는 규칙을 선택하도록 한다. 그림 1은 이와 같은 과정을 나타낸다. 이러한 규칙 베이스의

갱신과정과 자동학습과정을 통하여 FARMA 제어기는 대상플랜트에 대한 학습을 하게 된다.

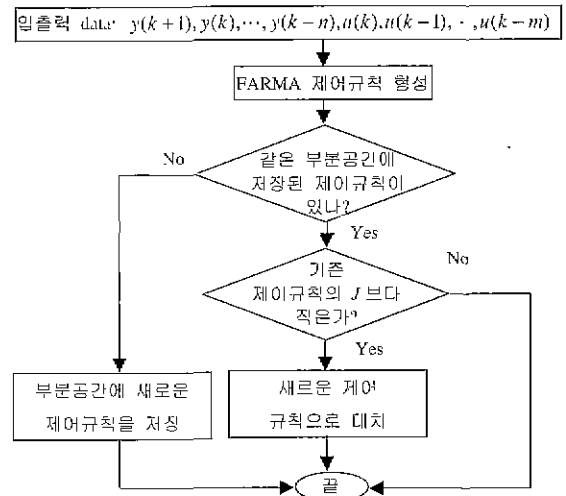


그림 1. 제어규칙 베이스의 개선과정.

Fig. 1. Self-organizing procedure of the rule base.

4. 전력계통 안정화 장치에의 적용[17]

(2)에 의하면, 학습된 제어규칙은 학습이 완전하게 이루어진 후에는 대상 플랜트의 역동역학(Inverse Dynamics)을 학습하는 것으로 이해될 수 있다. 그러나, 비최소위상 영점(Nonminimum Phase Zero)을 갖는 플랜트에 대하여 직접 극점-영점 소거(Pole-Zero Cancellation)를 할 수 없음이 알려져 있다[20]. 즉, 그림 2에서와 같이 전체적인 폐루프 시스템은 안정하지만, 시스템의 내부 상태인 제어량 u 가 불안정하게 되는 문제가 발생한다.

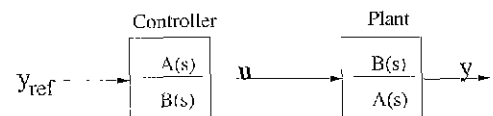


그림 2. 비최소위상 플랜트에 대한 극점-영점소거.

Fig. 2. Pole-zero cancellation with nonminimum plant.

따라서 FARMA제어기를 이러한 비최소위상 플랜트에 직접 적용할 경우 제어량이 발산하는 문제가 발생하게 된다. 선행 연구자들에 의하여, 전력계통의 안정화 문제의 경우에도 시스템의 동작점 부근에서 비최소 위상 플랜트의 특성을 갖는 것이 확인되었다[1].

이러한 전력계통의 특성을 감안하여, FARMA제어기에 케환 루프를 추가함으로써 이러한 문제를 해결하였다. 즉, 그림 3와 같이 출력오차값에 따라 제어량을 직접 제한하도록 함으로써 제어량이 발산하는 것을 방지할 수 있도록 하였다. (10)은 개선된 제어량을 나타낸다.

$$u(k) = K \cdot (y_{ref} - y(k)) \cdot u'(k) \quad (10)$$

단, $u(k)$ 는 개선된 제어량,

K 는 케환 루프의 이득,

$u'(k)$ 는 FARMA제어기의 출력.

제한 루프의 이득인 K 값은 대상 플랜트의 입출력 범위를 고려하여 선정한다. K 값을 아주 작게 하면 제어량이 지나치게 제한되어 개루프(open loop)의 특성을 나타내게 된다. 또한 K 값을 아주 크게 하면 $u'(K)$ 의 값이 오히려 과장되어 물리적으로 구현 불가능한 제어량이 될 뿐 아니라, 큰 이득으로 인하여 전체시스템의 안정도를 깨트리게 된다. 따라서, $u'(k)$ 를 제한하는 항인 $K \cdot (y_{ref} - y'(k))$ 이 1근처의 값이 되도록 출력 오차의 최대값을 고려하여 K 값을 선정한다.

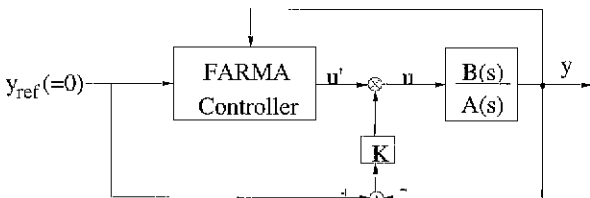


그림 3. 비최소위상 플랜트를 대상으로 적용된 FARMA제어기.

Fig. 3. Modified FARMA controller for a nonminimum phase plant.

III. 비선형 2기 5모선 모형에의 적용

1. 전력 시스템

일반적인 전력 시스템은 크게 발전과 송배전으로 구분될 수 있다. 발전은 화력, 원자력, 수력 등의 에너지를 전기에너지로 변환하는 부분이고, 송배전은 전력부와 송전 라인 등을 포함하는 부분이다.

그림 4는 전형적인 발전 시스템을 나타낸다. 발전 시스템 내부는 크게 터빈(Turbine), 동기기(Synchronous Generator)와 이를 제어하기 위한 여자기(Exciter), 조속기(Governor)등을 포함한다. 즉, 발전기는 전압(v)과 주파수(ω)를 계통에 공급하며, 이때, 전압을 제어하기 위한 전압제어 제환루프(Voltage Control Feedback Loop)인 VR (Voltage Regulator)과 여자기, 그리고 주파수를 제어하기 위한 주파수 제환루프(Frequency Control Feedback Loop)인 조속기를 포함한다. VR 및 여자기는 발전기의 출력 전압을 입력받아 여자전압을 조절함으로써, 발전시 필요한 자기장의 세기를 조절하여 출력 전압을 제어하는 역할을 하며, 조속기는 주파수를 입력받아 터빈의 기계적인 입력의 세기를 조절함으로써 계통의 주파수를 조절하는 역할을 하게 된다. 발전기의

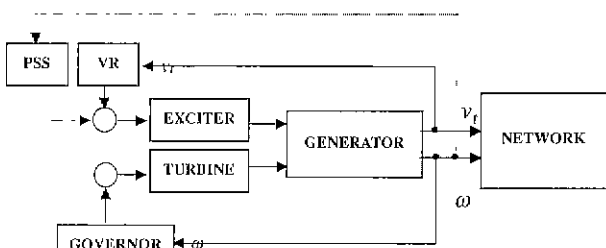


그림 4. 발전 제어 시스템.

Fig. 4. Generation control system.

동적특성은 동기기, 여자기, 계통, 부하 등의 기본 요소들에 의해서 결정되며, 모든 요소들은 계통의 부하 특성에 영향을 미치게 된다.

한편, 발전된 전력에너지를 전송, 소비하는 계통부하 네트워크는 그 구조 및 특성에 따라 각 지점에서의 전압, 전류, 위상 및 유효전력, 무효전력이 정해진다. 이는 생산된 전력과 연관된 전력조류방정식(Load Flow Equation)을 풀어서 계산된다. 비선형 정적방정식인 전력조류방정식은 수치적인 방법으로 풀게 된다. 따라서 전력 시스템의 이산시간 모의 실험을 위해서는 동적방정식인 발전부분과 정적방정식인 전력조류 방정식을 매 시간주기 마다 상호 연동하여 풀어야 한다.

정상상태에서 발전기의 터빈은 전기적인 출력과 기계적인 입력이 균형을 이루어 회전속도의 변화는 일어나지 않는다. 그러나 외란이 발생하면 그런 균형상태는 깨지게 되고, 회전속도는 가속되거나 감속되게 된다. 만일 계통이 안정하다면 주파수는 계통과 발전기의 특성에 따라, 감속과 가속을 반복하다가 평형을 유지하는 주파수에서 새로운 정상상태를 유지하게 된다. 그러나 때때로 발전기의 기계적 댐핑(Damping)의 부족으로 말미암아, 저주파수 대역의 진동이 계속 유지되는 현상이 관찰되었다. 이러한 저주파 진동 현상은 여자기의 전압을 추가로 제어하는 제한 루프를 첨가함으로써 효과적으로 제어 될 수 있음이 밝혀졌다[1][2].

그림 4에서 동기기의 출력주파수를 제환하여 여자기에 보조입력을 인가하는 PSS는 이러한 저주파 진동을 억제하기 위하여 추가된 부분이다. 따라서 외란이 발생하였을 경우, 조속기는 정상상태의 주파수를 제어하는 역할을 하는 반면에, PSS는 주파수의 동요를 억제하는 보조적인 역할을 하게 된다.

2. 2기-5모선 시스템

이번 장에서는 본 연구에 사용된 전력계통 2기 5모선 모형의 구체적인 내용을 각 부분별로 제시한다. 적용된 2기 5모선 발전 계통은 그림 5과 같다. 대상 시스템은 크게 2기의 발전기 G1, G2와 5개의 모선(Bus)

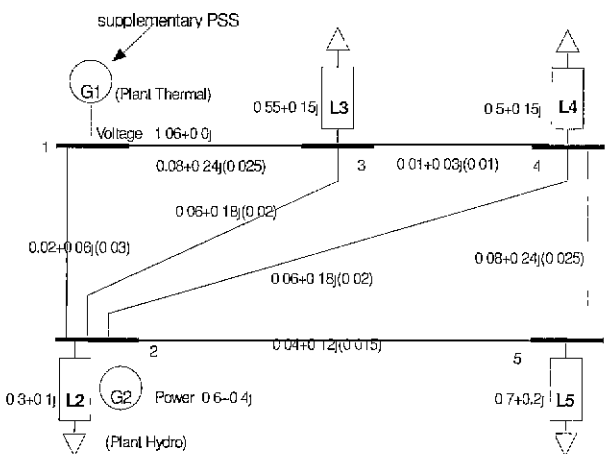


그림 5. 2기 5모선 전력 계통 시스템.

Fig. 5. Two-machine five-bus system.

으로 구성되어 있다. 1번 모션에는 화력발전기 G1, 2번 모션에는 수력발전기 G2와 부하 L2 그리고 3, 4, 5번 모션에는 부하 L3, L4, L5가 각각 연결되어 있다. 또한 각 모션들을 연결하는 7개의 송전 라인과 그 등가 임피던스가 표시되어 있다. 저주파 진동을 감쇄시키기 위한 안정화 장치는 화력발전기 G1에 추가하는 것으로 가정하였다.

A. 동기 발전기 및 전력부하 : 동기발전기는 기계적에너지에서 전기적 에너지로의 변환이 이루어지는 부분이다. 본 논문에서 전력계통의 저주파 진동 연구를 위한 모의 실험에서의 동기기들은 로터회전수(w), 로터 각(δ), 그리고 과도 리액턴스 전압(e'_q)의 3개의 상태변수로 표현되는 비선형 3차 모델이다. 이때, 과도리액턴스 전압은 필드 와인딩의 플렉스 리키지 변화가 고려되었다. 이러한 모델은 아래와 같은 수식으로 표현된다[21].

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{M}(T_m - T_e + D(\omega_o - \omega)), \quad (11)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_b(\omega - \omega_o), \quad (12)$$

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} [E_{FD} - e'_q - \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d} \cdot (e'_q - v_i \cos(\delta - \theta_i))], \quad (13)$$

여기서, w : 로터 회전수

δ : 로터 각

e'_q : 과도 리액턴스 전압

$$T_m = P_m / \omega, T_e = P_e / \omega, \omega_b = 2\pi f_o, \omega \approx 1.$$

이때, (11)에서 기계적인 입력 부분인 T_m 은 상수로 가정되는데, 이는 본 논문에서 다루고자 하는 저주파 진동의 여자 시스템에 비하여 응답속도가 현저하게 늦기 때문이다. (13)에서, e'_q 는 여자기의 출력인 여자 전압 E_{FD} 에 의하여 조절됨을 알 수있다. 각 발전기에 사용된 상수값들은 표1에 나타내었다.

표 1. 발전기 상수값.

Table 1. Parameters of generators.

	T'_{do}	D	H	x_d	x'_d	x_q	x'_q	Selfbase [MVA]
G1	4.0	1.	4.5	1.25	.6	.9	.6	150
G2	6.3	1.	5.5	0.94	.4	.65	.4	150

한편, 발전된 전력은 다음과 같은 평형식을 항상 만족하게 된다.

$$P_{ei}(e_q, v_i, \delta, \theta_i) + P_i(v_i, \theta_i) = P_{Mi}(\vec{v}, \vec{\theta}), \quad (14)$$

$$Q_{ei}(e_q, v_i, \delta, \theta_i) + Q_i(v_i, \theta_i) = Q_{Mi}(\vec{v}, \vec{\theta}), \quad \text{for } i=1,2$$

여기서 P_{ei} 와 Q_{ei} 는 각각 i 번째 발전기의 유효 및 무효전력이고, P_{Mi} 과 Q_{Mi} 은 i 번째 버스의 유효, 무효전력이다. 그리고 P_i 와 Q_i 는 i 번째 버스의 부하이다.

각 부하들은 상태변수들의 비선형 함수로서 표현된다. 각 버스의 유효, 무효 전력들은 다음과 같은 구체적인 수식으로 표현된다.

$$P_{ei}(e_q, v_i, \delta, \theta_i) = \frac{e'_q v_i}{x_d} \sin(\delta - \theta_i) + \frac{v_i^2(x_d - x_q)}{2x_d x_q} \sin(2(\delta - \theta_i)) \quad (15)$$

$$Q_{ei}(e_q, v_i, \delta, \theta_i) = \frac{e'_q v_i \cos(\delta - \theta_i)}{x'_d} - \frac{v_i^2(x_q \cos^2(\delta - \theta_i) + x'_d \sin^2(\delta - \theta_i))}{2x'_d x_q}$$

$$P_k(v_i, \theta_i) = P_{i0} \left(\frac{v_i}{v_{i0}}\right)^{\alpha_p} \cdot (1 + \beta_p \cdot \Delta f_i), \quad (16)$$

$$Q_k(v_i, \theta_i) = Q_{i0} \left(\frac{v_i}{v_{i0}}\right)^{\alpha_Q} \cdot (1 + \beta_Q \cdot \Delta f_i),$$

$$P_{Ni}(\vec{v}, \vec{\theta}) = \sum_{k=1}^2 v_i v_k (g_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + b_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)), \quad (17)$$

$$Q_{Ni}(\vec{v}, \vec{\theta}) = \sum_{k=1}^2 v_i v_k (g_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - b_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)),$$

여기서, α , β 와 g_{ik} , b_{ik} 는 부하특성과, i 번째 버스에 k 번째 버스로의 선로 어드미턴스를 나타낸다.

B. 조속기 및 터빈 : 조속기는 스팀 또는 물의 양을 조절하여 터빈-발전기의 속도를 조절하는 역할을 한다. 본 연구에서 사용된 모형은 전력계통 모의실험에서 일반적으로 사용되는 전형적인 모델들로 선정하였다. 화력발전기에는 다음의 그림의 TGOV1이, 그리고 수력발전기에는 IEEEG2가 사용되었다[21]. 그림 6와 표 2에는 TGOV1의 블록도 및 상수값들을, 그림 7과 표 3에는 IEEEG2의 블록도 및 상수값들을 나타내었다.

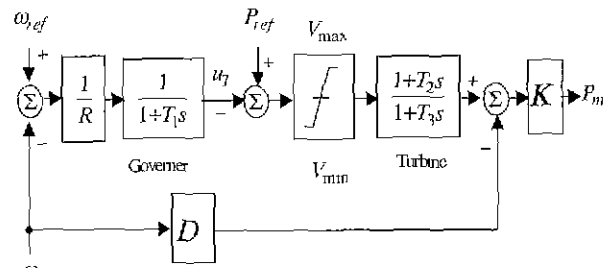


그림 6. TGOV 1 모형의 블록도.

Fig. 6. Block diagram of TGOV 1 model.

표 2. TGOV 1의 상수값.

Table 2. Parameter of the governor-turbine model TGOV 1.

T_1	T_2	T_3	D	R	V_{max}	V_{min}	K
.495	5.10	7.00	.01	.05	1.30	.34	1.

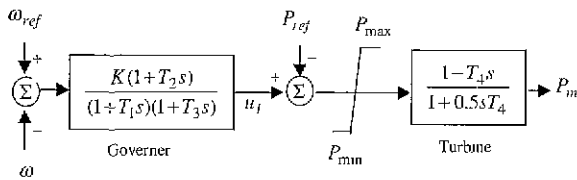


그림 7. IEEE2 모형의 블록도.

Fig. 7. Block diagram of IEEE2 model.

표 3. IEEE2의 상수값.

Table 3. Parameter of the governor-turbine model IEEE2.

T_1	T_2	T_3	T_4	K	P_{max}	P_{min}
50.0	5.00	0.50	0.01	0.05	1.30	0.00

C 여자기 및 전압조정기 : 여자기와 전압조정기 모델로는 두 발전기 모두 EXST 1을 적용하였다[21]. 그림 8과 표 4에 EXST 1의 블록도 및 변수값들을 나타내었다.

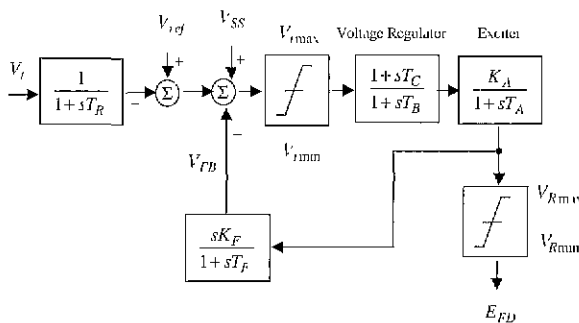


그림 8. EXST 1 모형의 블록도.

Fig. 8. Block diagram of EXST1 model.

표 4. EXST 1모형의 상수값.

Table 4. Parameters of exciter and voltage regulator model EXST 1.

T_R	T_1	T_B	T_C	T_F	T_A
0.06	0.1	0.001	0.001	1.	50.

K_F	V_{max}	V_{min}	V_{Rmax}	V_{Rmin}
1	0.2	-0.2	5.0	-3.0

3. FARMA PSS의 적용

계통의 상황에 의하여 외란이 발생하게 되면 이는 (13) - (17)의 전력조류 방정식에 의하여 발전기의 전압과 주파수에 영향을 미치게 되고, 이에 따라 전압 제어루프와 주파수 제어루프에 의해서 제어기가 작동된다. 변화된 제어입력에 따라 동기발전기의 출력이 변화되고 이는 다시 전력조류 방정식에 영향을 주게 된다. 이와 같은 상황의 이산시간 모의실험을 위해서, 동기발전기를 포함한 발전부문의 동력학은 Runge-Kutta 4차의 방법을 이용하였으며, 비선형 방정식인 전력조류 방정식은 Newton-Rapson법을 이용하여 수치적으로 계산하였다.

FARMA PSS의 입력 y 는 주파수의 변화량(Δf), 즉 정상상태에서의 주파수 변화량이다. 출력 u 는 여자에 추가로 인가되는 u_E 이다. 제어규칙의 입출력으로 $y(k+1)$, $y(k)$, $y(k-1)$, $y(k-2)$, $y(k-3)$, $u(k)$, $u(k-1)$, $u(k-2)$, $u(k-3)$ 를 사용하였다. 또한, 다음 시구간의 잠정적인 기준값 $y_r(k+1)$ 은 $0.95y(k)$ 로 정하였다. 즉 현재의 출력값보다 0.95의 비율로 기준값인 0에 접근하도록 설정하였다. 또한 (4)의 입출력범위는 각각 플랜트의 입력 u 는 $[-0.7 \ 0.7]$ 이며, 출력 y 는 $[-0.01 \ 0.01]$ 로 설정하였다. 또한 (10)의 K 값은 $y(k)$ 의 물리적인 동작범위를 고려하여 150으로 정하였다.

모의실험에서는 펜티엄 300 PC를 이용하여 C 언어로 코딩하였고, 사용된 샘플링 타임은 0.01초이다. FARMA PSS의 계산 시간은 평균 0.0015초이고 최대 계산시간은 0.0023초였기 때문에 실 적용에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

IV. 모의실험 결과

제시된 제어기의 비선형 동작 특성을 알아보기 위한 외란으로는 다음과 같은 2가지의 사고를 가정하였다.

- Case1) 모선 2와 모선 3 간의 선로사고
- Case2) 모선 4와 모선 5 간의 선로사고

모의 실험을 위해서 두 경우 모두 시스템이 이전 시간에서 정상상태를 유지하고 있었다고 가정한다. 그 후 $t=0$ 시간에 대상 송전라인의 임피던스가 100%에서 75%로 감소하는 사고가 발생한 후 0.21초 이후에 해소되었다고 가정하였다. 이는 4개의 선로로 구성되어있는 송전라인중 하나의 라인에 지락사고가 발생하였다가 해소된 상황을 묘사한 것이다.

먼저, 그림 9는 모선2와 모선3 간의 선로사고시의 개루프 응답(Open loop response)이다. 즉, 안정화장치를 가동하지 않았을 때의 응답이다. PSS가 주파수의 진동을 억제하는 역할을 하므로 가로축은 시간(초)이고 세로축은 주파수의 변화량을 나타내었다. 굵은 선으로 표시된 선은 G1의 주파수 변화량이고, 실선으로 표시된 선은 G2의 주파수 변화량이다. 사고가 해소된 이후, 두 발전기의 출력이 모두 진동하는 전형적인 저주파 진동 현상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 모선2와 모선3 간의 선로사고시의 폐루프 응답(Closed loop response)이다. 그림 9와 마찬가지로 굵은 선으로 표시된 선은 G1의 주파수 변화량이고, 실선으로 표시된 선은 G2의 주파수 변화량이다. 안정화 장치는 발전기 G1에 장착되었지만, G2의 주파수 편차가 모두 효율적으로 감쇄되었음을 알 수 있다.

그림 11은 모선 4와 모선 5간의 선로사고시의 개루프 응답이다. 굵은 선으로 표시된 선은 G1의 주파수 변화량이고, 실선으로 표시된 선은 G2의 주파수 변화량이다. 마찬가지로 전형적인 저주파 진동 현상을 나타내었다. 그림 12는 모선 4와 모선 5간의 선로사고시의 폐루프 응답이다. 굵은 선으로 표시된 선은 G1의 주파수 변화량이고, 실선으로 표시된 선은 G2의 주파수 변화량이다 이 경우

3초 이후에는 두 발전기의 주파수가 안정화된 것을 확인할 수 있다. 그림 10의 2-3라인 선로사고의 경우와 비교해보면, 이 경우에 보다 효과적으로 제어된 것을 알 수 있다. 이는 상대적으로 2-3라인의 경우보다 4-5라인의 경우가 두 발전기로부터 멀리 떨어져 있는 구조이기 때문에 두 발전기에 미치는 영향이 상대적으로 작고, 따라서 좀 더 효율적으로 제어되었다고 판단된다.

선행 연구자들의 연구결과와 마찬가지로 주요 발전기의 전압 레귤루프에 보조적인 입력을 인가함으로써 계

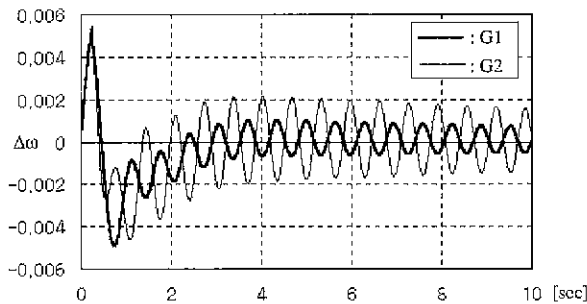


그림 9. 2-3라인 선로사고시의 발전기 주파수 변화량 (Open Loop).

Fig. 9. Frequency Deviation of 2-3 Line Faults (Open Loop).

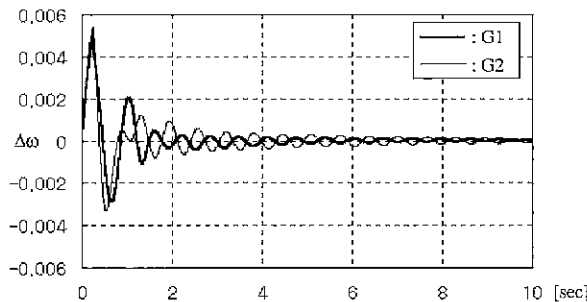


그림 10. 2-3라인 선로사고시의 발전기 주파수 변화량 (Closed Loop).

Fig. 10. Frequency Deviation of 2-3 Line Faults (Closed Loop).

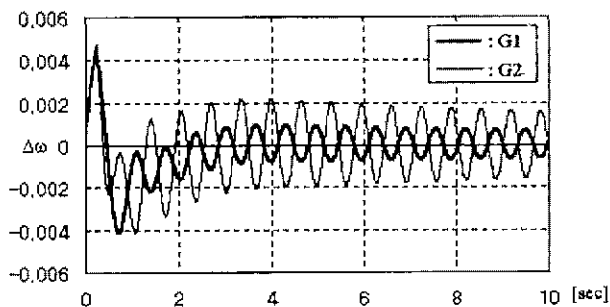


그림 11. 4-5라인 선로사고시의 발전기 주파수 변화량 (Open Loop).

Fig. 11. Frequency Deviation of 4-5 Line Faults (Open Loop).

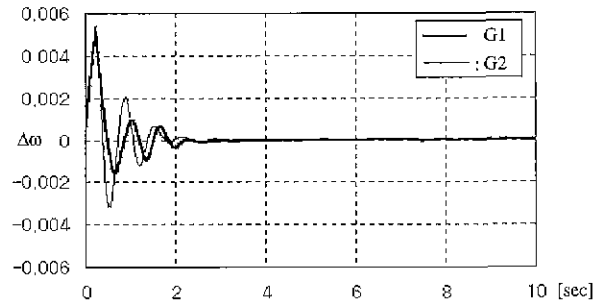


그림 12. 4-5라인 선로사고시의 발전기 주파수 변화량 (Closed Loop).

Fig. 12. Frequency Deviation of 4-5 Line Faults (Closed Loop).

통 전체의 저주파 현상을 효과적으로 억제할 수 있음을 실험적으로 확인할 수 있다. 또한 FARMA 제어기가 고차 비선형 제어 문제에 효과적으로 적용될 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 [17]에서 제시된 FARMA PSS를 실제적인 전력계통의 비선형 2기 5모선 모형에 적용하여 그 특성을 분석하였다. FARMA PSS는 플랜트의 수식적인 모델이나 전문가에 의해 미리 만들어진 규칙베이스를 사용하지 않고, 플랜트에 대한 최소한의 정보만을 가지고 시행착오 학습에 의해 제어규칙을 생성하는 알고리즘이다.

이를 위해서, 전력계통의 일반적인 특징 및 안정화 문제를 소개한 후, 모의실험에 사용될 비선형 2기5모선 시스템의 구체적인 모형을 제시하였다. 발전기와 조속기 그리고 여자기등은 IEEE의 표준화된 화력발전기와 수력발전 모형을 사용하였고, 매 순간 비선형 방정식인 전력조류 방정식을 풀어서 네트워크의 전압과 전력 및 주파수의 변화를 계산하였다. 이와 같은 과정을 통하여, 다변수, 비선형성 등을 포함하여 실제 전력계통에 근접한 모의 실험이 가능하도록 하였다.

모의실험 결과, 실제적인 비선형 2기 5모선 모형에서도 주요 발전기의 전압 레귤루프에 보조적인 입력을 인가함으로써 계통 전체의 저주파 동요현상을 효과적으로 억제할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 최종적으로, FARMA 제어기가 복잡한 고차 비선형 제어 문제에 효과적으로 응용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Y. N. Yu, *Electric Power System Dynamics*. Academic Press, 1983.
- [2] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, IEEE Press, 1994.
- [3] K. Bollinger, et al., "Power system stabilizer design using root-locus method.," *IEEE Trans. on PAS*, vol. 94, no. 5, pp. 1484-1488, 1975.
- [4] R. J. Fleming, M. A. Mohan and K. Parvatisam,

- "Selection of parameters of stabilizers in multimachine power systems", *IEEE Trans. on PAS*, vol. 100, no. 5, pp. 2329-2333, 1981.
- [5] O. H. Abdalla, et al., "Coordinated stabilization of multimachine power systems". *IEEE Trans. on PAS*, vol. 103, no. 3, pp. 483-491, 1984.
- [6] A. Ghosh, G. Ledwich, O. P. Malik, and G. S. Hope, "Power system stabilizer based on adaptive control technique", *IEEE Trans. on PAS*, vol. 103, no. 8, pp. 1983-1989, August 1984.
- [7] C. J. We and Y. Y. Hsu, "Design of self-tuning PID power system stabilizer for multimachine power system", *IEEE Trans. on PWRs*, vol. 3, no. 3, August 1988.
- [8] W. Gu and K. E. Bollinger, "A self-tuning power system stabilizer for wide-range synchronous generator operation", *IEEE Trans. on PWRs*, vol. 4, no. 3, pp. 1191-1199, August 1989.
- [9] B. D. O. Anderson, "Adaptive system, lack of persistency of excitation and bursting phenomena", *Automatica*, vol. 21, pp. 247-258, 1985.
- [10] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Inform. Contr.*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [11] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *Int. J. Man Mach. Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1975.
- [12] E. H. Mamdani, "application of Fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis", *IEEE Trans. Computer*, vol. 26, no. 12, pp. 1182-1191, 1977.
- [13] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control system : fuzzy logic controller - Part I & II", *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.*, vol. 20, no. 2, pp. 404-435, 1990.
- [14] M. A. M. Hassan, O. P. Malik and G. S. Hope, "A fuzzy logic based stabilizer for a synchronous machine", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 6, no. 3, pp. 407-413, 1991.
- [15] T. Hiyama, M. Kusahiko and H. Satoh, "Advanced PID type fuzzy logic power system stabilizer", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 9, no. 3, pp. 514-520, 1994.
- [16] Y. M. Park, U. C. Moon and K. Y. Lee, "A self-organizing fuzzy logic controller for dynamic systems using a fuzzy auto-regressive moving average(FARMA) model," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol.3, no.1, pp.75-82, 1995.
- [17] Y. M. Park, U. C. Moon, K. Y. Lee, "A self-organizing power system stabilizer using fuzzy auto-regressive moving average(FARMA) model," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 11, no. 2, pp. 442-448, 1996.
- [18] W. Pedrycz, *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, John Wiley & Sons, 1989.
- [19] R. L. Burden and J. D. Faires, *Numerical Analysis*, PWS-KENT, 1989.
- [20] K. J. Astrom and B. J. Wittenmark, *Adaptive Control*, Addison-Wesley, 1989
- [21] T. E. Kostyniack, (*PSS/E Program Operation Manual*). P.T.I., October 31, 1983.



문 윤 철

1968년 10월 1일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동대학원 (공학석사). 1996년 동대학원 (공학박사). 1996년~현재 삼성 SDS정보기술연구소 근무, 주 관심

분야는 인공지능 기법을 이용한 제어, 자동화 및 전력계통과 산업 현장에의 적용.