

# 계통의 안정성을 고려한 비선형 FACTS 신경망 제어기 설계

論 文

51P-4-8

## Design of Nonlinear FACTS Controller with Neural Networks for Power System Stabilization

朴省昱\* · 徐輔赫\*\*

(Seong-Wook Park · Bo-Hyeok Seo)

**Abstract** - We propose a intelligent controller for FACTS device to stabilize a power system. In order to identify the nonlinear characteristics of the power system and to estimate a control signal, an artificial neural network is utilized. Parameter and location of Unified Power Flow Controller(UPFC) on power system operating conditions are discussed. A UPFC is composed of an excitation transformer, a boosting, two three-phase GTO based voltage source converters, and a dc link capacitor. The proposed controller is applied to UPFC to verified the effectiveness of the proposed control system. The results show that the proposed nonlinear FACTS controller is able to enhance the transient stability of a three machine and nine bus system.

**Key Words** : FACT Controller, UPFC, Neural Networks, Steady-State Analysis

### 1. 서 론

전력전자기술의 급격한 발전에 따라 최근에는 송전선로에서 전압의 크기, 위상차 그리고 선로 임피던스를 실시간으로 제어하여 계통의 송전용량과 안정도를 혁신적으로 향상시키려는 노력이 70년대 말부터 활발히 전개되고 있으며 이와 관련된 대표적인 기술이 FACTS (flexible ac transmission system)이다[1,2]. FACTS 기기로는 사이리스터와 수동소자를 사용하는 SVC(static var compensator), TCSC(thyristor controlled series capacitor), GTO(gate turn off) 소자를 사용한 STACON(static condensor), UPFC (unified power flow controller) 등이 있다. 자력식 인버터를 사용하여 SVC의 성능을 획기적으로 개선한 정지형 동기 조상기(STACON)는 동기조상기와 유사한 연속제어성을 가지며, 진폭과 위상각의 신속한 제어로 무효전력보상은 물론 계통의 동요나 저주파공진의 감소와 같은 계통의 동적특성과 안정도향상에 기여하고 있었다[3]. 이와 동일한 구조를 가지며 선로와 직렬로 동작하는 정지형 동기 직렬 보상기(SSCC)가 있다. L.Gyugyi는 STACON과 SSCC의 직류단을 공유시켜 선로로 전송되는 무효전력 뿐만 아니라 유효전력도 보상 가능한 통합조류제어기(UPFC)의 개념을 정립되었다[3,4]. 국내 적용이 예상되는 UPFC 기기의 경우 다른 FACTS 기기의 특성을 모두 결합한 것으로 유,무효 전력조

류, 모션전압, 선로 임피던스 등을 독립적 또는 종합적으로 제어할 수 있고 직·병렬 보상이 모두 가능하여 적절한 계통 제어 기법이 적용될 경우 계통 안정성 향상에 획기적인 성능이 기대된다. 그러나 이러한 계통 안정성제어의 극대화를 위해서는 기기 자체의 제어시스템뿐만 아니라 계통차원에서의 제어 기법이 필수적으로 요구된다. 계통차원에서의 FACTS(UPFC) 제어기법은 궁극적으로는 EMS 차원의 제어기법이 요구될 것으로 보이나 현 단계에서는 아직 비현실적이라 판단되며, FACTS 기기 설치위치 근처에서의 측정 가능한 신호(local measuring)를 이용한 계통 동요억제 제어 기법이 현실적인 것으로 판단된다.

따라서 본 논문에서는 조류계산을 이용하여 정상상태에서 UPFC를 해석하고 UPFC가 연계된 계통 시스템의 수리모형과 비선형 FACTS 제어 알고리즘에 관한 연구를 수행한다. 이러한 결과를 기반으로 하여 전력계통 안정성을 고려한 비선형 FACTS 신경망 제어기를 설계하여 IEEE 3기 9모선에 적용함으로써 FACTS 제어기를 이용한 전력계통 시스템 제어에 관한 적용성을 연구검토 한다.

### 2. UPFC 모형

UPFC는 선로에 걸리는 전압을 임의의 크기와 위상을 갖도록 신속히 제어하여 선로로 전송되는 유·무효전력을 총체적으로 보상하는 기능을 갖는다. UPFC의 기본구성은 그림 1과 같이 계통 모선(i,j)에 병렬로 연결되어 있는 부분과 계통 선로에 직렬로 연결되어 있는 부분과 선로에 직렬로 삽입되어 있는 부분 그리고 병렬과 직렬을 연결시켜주는 직류 연계 커패시터 부분으로 구성되어 있다[6]. UPFC 시스템의 병렬부분은 병렬 변압기와 병렬 변압기에 전압을 인가해

\* 正 會 員 : 龜尾大學 컴퓨터應用電氣專攻 副教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 慶北大學校 工科學部 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2002年 11月 12日

最終完了 : 2002年 12月 17日

주는 는 인버터(inverter) 1 부분으로 구성되어 있으며, UPFC의 입력단 전압의 크기를 일정하게 유지하는 기능과 직류 연계 커패시터의 전압을 일정하게 유지시키는 기능을 한다. 직렬부분은 선로에 직렬로 삽입된 직렬 변압기와 직렬 변압기를 통해 선로에 전압을 인가시키는 인버터(inverter) 2 부분으로 구성되어 있으며, 인가되는 전압을 적절히 제어하여 UPFC 출력단의 유효전력과 무효전력을 제어하는 기능을 한다[4]. 그림1에서 ij 모선간에 지락사고 발생시, 사고선로에 필요한 선로조류의 유효전력과 무효전력 성분을 UPFC의 주입전압의 크기에 따라 인버터 2 제어로 송전선로에 P,Q를 주입한다. 인버터 1은 주로 직렬 전압원이 계통에 주입하는 유효전력을 제공하는데 사용되면 손실을 무시하면 다음과 같다.

$$P_1 = P_2 \tag{1}$$

인버터 2가 송전선로에 주입하는 피상전력은 다음과 같다.

$$S_2 = \bar{V}_{pq} \cdot \bar{I}_{ij}^* = r e^{j\gamma} \bar{V}_i \frac{\bar{V}_i - \bar{V}_j}{jX_{pq}} \tag{2}$$

여기서  $r = \frac{|V_{pq}|}{|V_i|}$  이고,  $\gamma$ 는 주입 전압의 각이다.

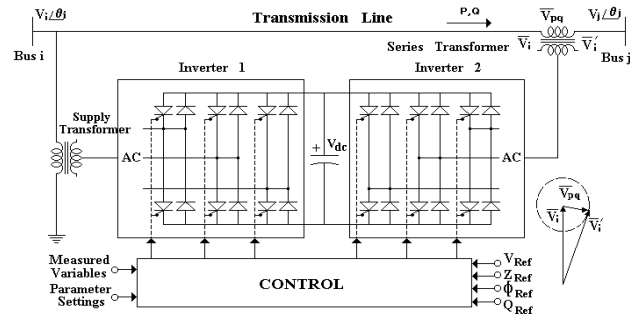


그림 1 UPFC의 시스템 구성  
Fig. 1 System configuration of UPFC

인버터 1은 공유되어 있는 직류 커패시터를 통하여 인버터 2에서 필요로 하는 유효전력을 공급하는 역할을 한다. 인버터 2는 선로에 유효전력을 공급하는 동시에 자신이 무효전력을 소모함으로 인버터 1은 유효전력의 공급뿐만 아니라 무효전력도 동시에 공급한다. 인버터 2는 계통과 동일한 주파수의 교류전압을 주입하는 기능을 갖는다. 이 때 주입 전압의 위상각은 인버터의 점호각  $\alpha_{pq}$ 에 의해 결정되는데  $0 < \alpha_{pq} < 2\pi$  인 범위 내에서 임의로 조정이 가능하다.

### 3. 조류계산을 위한 UPFC 모형

UPFC의 정상상태 모형은 인버터 1을 병렬 전류원으로, 인버터 2를 직렬 전압원으로 등가하여 모형화 할 수 있다. 정상상태에서 UPFC를 포함하여 조류계산을 할 때, 병렬 전류원은 그 주입전류에 모선의 전압을 곱하여  $\mathbf{y} \cdot \mathbf{m}$  유효전력 이 계산되지만 직렬 전압원은 조류계산에 그대로 이용할 수 없으므로 조류계산을 위한 모형이 필요하다. 계통에서 모선 i와 모선 j사이에 직렬 전압원이 있다고 가정하면 직렬 전압원 인버터는 리액턴스  $X_{pq}$ 와 직렬로 연결된 이상 직렬 전압원으로  $\bar{V}_{pq}$ 로 모형화 할 수 있다. 그림 2에서  $\bar{V}_{pq}$

는 이상 전압원이고  $\bar{V}_i'$ 는 직렬 리액턴스 배후 가상 전압으로 식 (3)과 같다[7].

$$\bar{V}_i' = \bar{V}_{pq} + \bar{V}_i \tag{3}$$

직렬 전압원  $\bar{V}_{pq}$ 은 식 (4)와 같으며 크기와 위상은 제어 가능하다. 그림 3은 등가회로 벡터도이다.

$$\bar{V}_{pq} = r \bar{V}_i e^{j\gamma} \tag{4}$$

본 연구에서는 UPFC 주입모형을 조류계산 과정에 삽입하여 모선조류와 선로조류를 계산하였다.

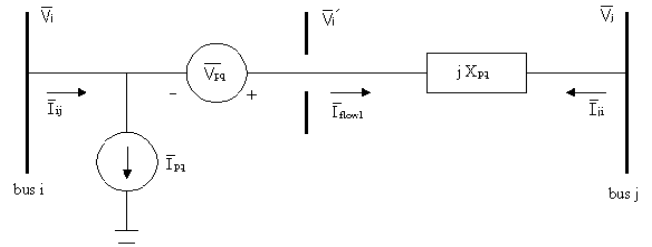


그림 2 UPFC의 등가 회로  
Fig. 2 Equivalent circuit of UPFC

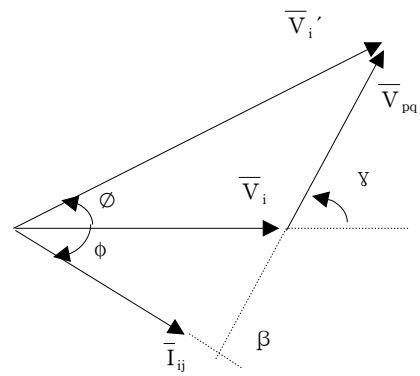


그림 3 직렬 전압원 등가회로의 벡터도  
Fig. 3 Equivalent phasor diagram of series voltage

UPFC가 삽입된 모선간에 선로 임피던스에 의한 선로 손수전류( $I_{flow1}$ )와 선로의 커패시터를 양쪽방향으로 고려하여 FACTS 기기에 의한 상승된 전압에 전류를 구하여 주입전류를 다음과 같이 구하였다.

$$\bar{I}_{flow1} = \frac{(\bar{V}_i' - \bar{V}_j)}{jX_{pq}} \tag{5}$$

$$\bar{I}_{ij} = \bar{I}_{flow1} + \mathbf{YV}_i/2 \tag{6}$$

조류계산을 통해 송전 선로에 주입되는 모선의 피상전력, 유효전력, 무효전력은 아래와 같다.

$$S_{flow} = \text{diag}[\bar{V}_i] \cdot \bar{I}_{ij}^* \cdot [I_0] \tag{7}$$

$$P_n = \text{real}(S_{flow}) = P_t \tag{8}$$

$$Q_n = \text{imag}(S_{flow}) = Q_t \tag{9}$$

여기서,  $\bar{V}_i$ 는 모선에 주입되는 전압의 벡터를 나타내고  $[I_0]$ 는 모선의 수로 구성된 단위 열벡터이다. 조류계산 과정에서 모선간의 방향을 나타내는 행렬  $[a]$ 을 이용하여 들어가는 모선의 조류를  $S_{flow}$ 에 곱하여 정리하면 선로조류

( $S_{line}$ )를 계산 할 수 있다.

$$S_{line} = (\text{diag}[\overline{V}_t] \cdot \overline{I}_{ij}^* \cdot [a])^T \cdot [I_0] \quad (10)$$

여기서,  $\overline{V}_t$ 는 모선간의 전압 차를 나타낸다. 총 9개의 모선이 있다면 1번 선로가 ③모선에 시작하여 ⑥모선에 끝나면  $a_1 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 가 되고 9개의 선로가 있을 경우에,  $[a]$ 는  $[a] = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8 \ a_9]$ 로 구성된다. 선로조류의 유효전력성분과 무효전력성분은 주입전압의 기준값으로 직렬 인버터의 제어명령으로 입력된다.

#### 4. UPFC 제어모형과 FACTS 신경망 제어

그림 3에서  $\gamma$ 가  $0^\circ$ 에서  $360^\circ$  범위안에서 변화함에 따라  $\overline{V}_i$ '는 UPFC의 설정 주입전압의 크기만큼 유·무효전력의 흐름을 수전단에 전달하여 수전단에서 필요한 유·무효전력을 충족시킬 수 있다. 송수전단 전압의 위상차( $\delta$ )가 임의의 값으로 주어지면 전송 유효전력과 수전단의 무효전력 수요는 UPFC에 의해 주입전압의 크기( $V_{pq}$ )와 위상각( $\gamma$ )으로 제어 가능하다. 송전선로에 실제 인가되는 전압은  $V_i + V_{pq}$ 이고 선로에 흐르는 전류와 선로에 걸리는 전압은 주입전압  $V_{pq}$ 의 크기와 각도를 변경함으로써 조정 가능하다. 결과적으로 송수전단 사이의 위상차 변경이 가능하여 전송되는 유·무효전력의 제어가 가능하다.

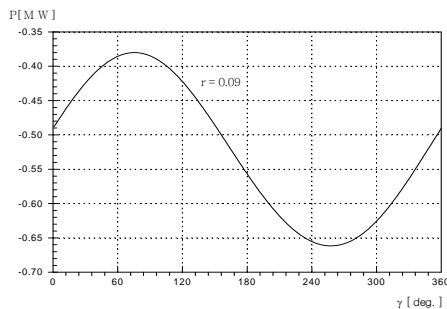


그림 4 위상각( $\gamma$ )의 변화에 대한 유효전력  
Fig. 4 Active power with variation of angle

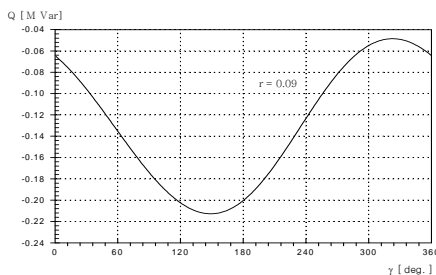


그림 5 위상각( $\gamma$ )의 변화에 대한 무효전력  
Fig. 5 Reactive power with variation of angle

그림 4-5는 주입전압의 크기가 0.09[p.u]일 때,  $0^\circ$ 에서

$360^\circ$  범위 내에서 변화할 때 선로조류의 유효전력과 무효전력을 나타낸 것이다[8].

본 연구에서는 신경망을 사용하여 정상상태에서 UPFC 기기를 학습한 후 학습된 신경망의 연결강도를 이용하여 전력계통에 적용하여 사고복구 후 UPFC의 제어 각을 제어함으로써 UPFC 설치선로의 전력조류 제어효과를 검토하고자 한다.

#### 4.1 학습 알고리즘과 UPFC 기기 학습

UPFC 기기를 제어하기 위해 정상상태에서의 선로조류(유효전력, 무효전력)를 입력변수로 이에 대응된 위상각( $\gamma$ )을 출력으로 하여 입력력 관계식을 신경망으로 학습하였다. 즉 그림 4,5에서 위상각의 변화에 대한 선로조류가 정현파로 나온 것을 역으로 선로조류에 대한 위상각의 값을 학습하였다. 그림 6은 학습에 대한 구조도이다.

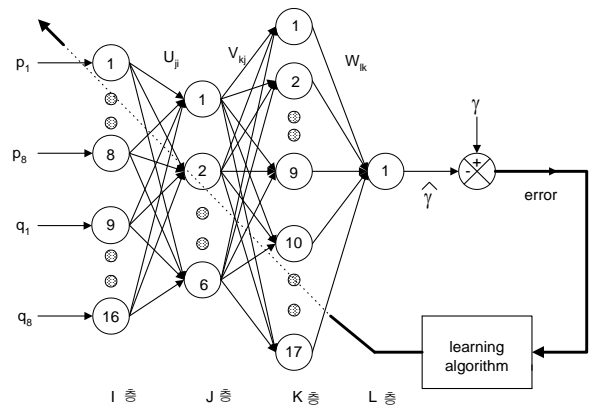


그림 6 신경망의 구조와 학습구조

Fig. 6 Artificial neural networks and learning scheme

그림 4-5의  $y$ 축을 입력으로  $x$ 축을 출력으로 학습하였고 평균 제곱오차가 0.0015[rad]이하의 범위내에 들어오면 학습을

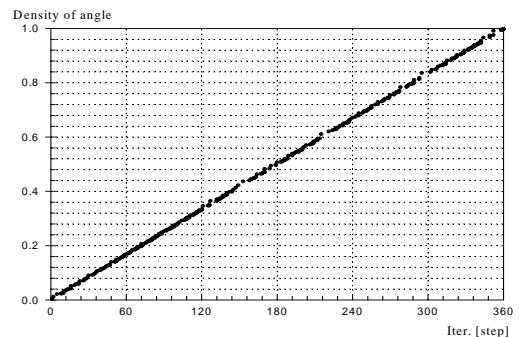


그림 7 학습시 사용한 각에 대한 확률분포

Fig. 7 Probability distribution for angle at learning process  
끝나게 했다. 즉 입력력 데이터로 신경망을 학습하여 평균

제곱오차가 약 0.5[°]의 범위에 들어오도록 학습하였다. 학습하는 과정에서 동일한 확률분포를 가진 각을 발생하여 학습하여 학습의 효율을 높였다. 그림 7은 360범위내의 각도의 분포를 나타내고 그림 8은 학습시 사용한 각에 대한 확률분포를 나타낸다. 학습한 결과와 평균 비용함수를 표1에 나타내었다

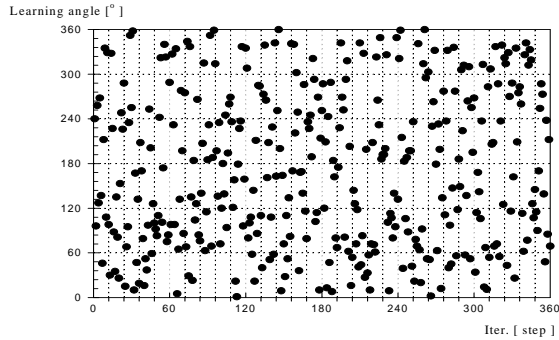


그림 8 동일한 확률분포에 의한  $\gamma$ 각 발생

Fig. 8 Generation angle( $\gamma$ ) based on uniform probability density

표 1 정상상태에서 선로조류에 대한 제어 각의 학습

Table 1 Learning control angle for line flow at state steady

제어변수	신경망 구조	평균 비용함수	학습 횟수	학습율
$r=0.09$ $\text{gamma}=1 \sim 360$	16-6-17-1	0.504[deg.]	80회	0.6
$r=0.18$ $\text{gamma}=1 \sim 360$	16-6-17-1	0.504[deg.]	105회	0.6

그림 9는 학습이 종료된 후 제어 각에 대한 비용함수의 값이다. 신경망을 사용하여 UPFC의 제어모형 크기와 각에 대한 선로의 조류를 계산하여 UPFC의 유효전력, 무효전력에 대한 제어변수인 위상각( $\gamma$ )을 학습하였다.

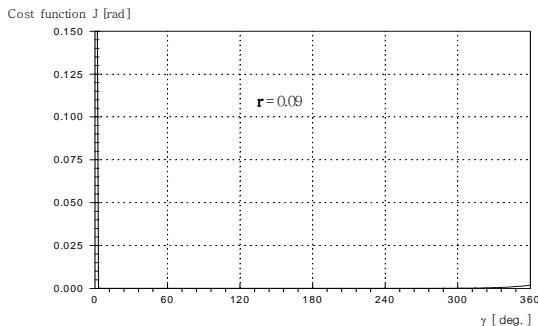


그림 9 제어 각 변화에 대한 비용함수

Fig. 9 Cost function with variation of control angle at  $r=0.09$

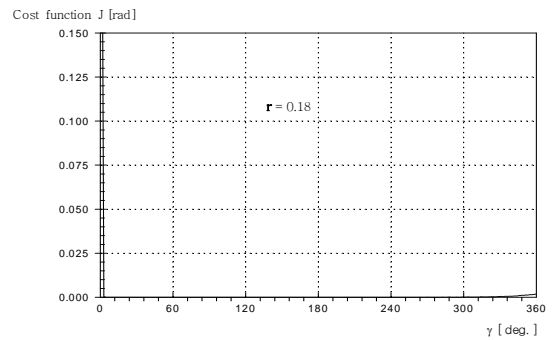


그림 10 제어 각에 변화에 대한 대한 비용함수

Fig. 10 Cost function with variation of control angle at  $r=0.18$

#### 4.2 적용 계통과 UPFC의 조류계산

신경망을 학습한 후 WSCC 3기 9모선의 계통에 적용하기 위하여 계통 데이터 입력, UPFC 제어 변수 입력, UPFC의 조류계산을 위한 계통구성, UPFC 기기의 초기 설정값에 대한 전력 조류변화를 관찰한다.

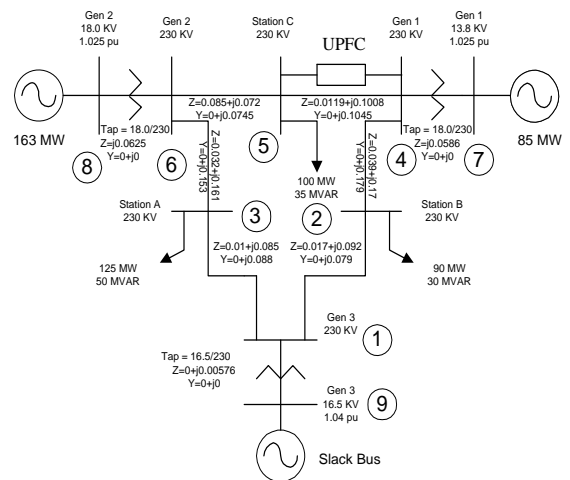


그림 11 WSCC 3기 9모선 전력 계통

Fig. 11 WSCC 3-machine, 9-bus system

UPFC가 설치된 선로는 8번 선로로 모선 ④과 ⑤사이 설치하였고 설치유무는 FACTS의 type이 6이면 설치된 것으로 인식한다. 표 2는 WSCC 3기 9모선의 선로 데이터와 UPFC 설치유무를 나타내었고 표 3은 UPFC 설치전의 조류계산한 결과를 나타내었다. 표 4는 3기 9모선의 계통에 조류계산한 결과를 나타낸 것으로 참고문헌[9]에 있는 결과와 일치함을 알 수 있었다. UPFC를 계통의 ④-⑤모선에 설치하여 조류계산한 결과 표 4에 나와 있는 것과 같고 이 결과로 동일한 조건에서 사례연구 할 수 있을 뿐 만 아니라 앞으로 조류계산 결과에 대한 타당성을 확보하였다.

표 2 WSCC 3기 9모선의 선로 데이터와 UPFC 설치유무

Table 2 Line date of the WSCC 3-machine, 9-bus system and UPFC type

선로	FACTS type	R	L	C	r	gamma (°)
1 (3-6)	0	0.030	0.160	0.000	-	-
2 (5-6)	0	0.085	0.072	0.140	-	-
3 (6-8)	0	0.000	0.025	0.000	-	-
4 (1-3)	0	0.100	0.050	0.170	-	-
5 (4-5)	6	0.019	0.108	0.090	0.09	0°
6 (1-2)	0	0.070	0.090	0.150	-	-
7 (1-9)	0	0.000	0.056	0.000	-	-
8 (2-4)	0	0.090	0.170	0.050	-	-
9 (4-7)	0	0.000	0.056	0.000	-	-

표 3 WSCC 3기 9모선의 조류계산 결과

Table 3 Load flow results of the WSCC 3-machine, 9-bus system without UPFC

번	형	전압 (pu)	각도 [deg]	P <sub>t</sub> (pu)	Q <sub>t</sub> (pu)	HL (pu)	-QL (pu)	P <sub>t</sub> (pu)	Q <sub>t</sub> (pu)
①	PQ	1.05	-2.22	-	-	-	-	0.00	0.00
②	PQ	0.95	-3.99	-	-	1.25	0.50	-0.15	-0.00
③	PQ	1.02	-3.99	-	-	0.90	0.30	-0.09	-0.09
④	PQ	1.05	3.72	-	-	-	-	0.00	0.00
⑤	PQ	1.05	0.73	-	-	1.00	0.35	-0.10	-0.05
⑥	PQ	1.02	1.97	-	-	-	-	0.00	0.00
⑦	PV	1.05	4.67	0.85	-0.11	-	-	0.05	-0.11
⑧	PV	1.05	9.28	1.63	0.07	-	-	1.63	0.07
⑨	출력	1.00	0.00	0.27	0.21	-	-	0.05	0.27

표 4 WSCC 3기 9모선의 조류계산 결과 (UPFC 설치시)

Table 4 Load flow results of the WSCC 3-machine, 9-bus system with UPFC

모선	전압 (pu)	각도 [deg]	P <sub>t</sub> (pu)	Q <sub>t</sub> (pu)	선로	P (pu)	Q (pu)
①	1.025	-2.27	0.00	0.00	1 (3-6)	-0.09	-0.15
②	0.995	-3.99	-1.25	-0.50	2 (5-6)	-0.24	-0.23
③	1.012	-3.97	-0.90	-0.30	3 (6-8)	-0.05	0.150
④	1.025	3.720	0.00	0.00	4 (1-3)	0.31	0.010
⑤	1.015	0.728	-1.00	-0.35	5 (4-5)	0.74	-0.08
⑥	1.032	1.968	0.00	0.00	6 (1-2)	0.49	0.229
⑦	1.025	4.665	0.85	-0.107	7 (1-9)	-0.06	-0.29
⑧	1.025	9.280	1.63	0.067	8 (2-4)	-0.88	-0.13
⑨	1.040	0.000	0.276	0.271	9 (4-7)	-0.30	0.012

4.3 전송선로와 동기 발전기의 동력학

동기 발전기와 연결된 선로는 고정자 대수 식과 계통 대

수 식 그리고 발전기 미분 방정식으로 표현된다. 과도 리액턴스와 포화를 무시한다고 가정하고 2축 모형으로 표현하였다. 또한 터빈 조속기의 동력 항 T<sub>Mi</sub>을 무시한다. 발전기는 4차(ω δ E<sub>d</sub> E<sub>q</sub>) 모형의 미분 방정식으로 아래와 같이 표현된다.

$$M \frac{d\omega_{di}}{dt} = P_m - (\Psi_{di} I_{qi} - \Psi_{qi} I_{di}) - D\omega \quad (11)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (12)$$

$$T_q' \frac{dE_{di}}{dt} = -E_{di}' + (X_{qi} - X_{qi}') I_{qi} \quad (13)$$

$$T_d' \frac{dE_{qi}}{dt} = -E_{di}' - (X_{di} - X_{di}') I_{di} + E_{fdi} \quad (14)$$

계통 대수 식은 복소수 형태로 표현된다.

$$V_i e^{-j\theta_i} (I_{di} - jI_{qi}) + P_{Li}(V_i) + jQ_{Li}(V_i) = \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} e^{j(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})} \quad (15)$$

$$P_{Li}(V_i) + jQ_{Li}(V_i) = \sum_{k=m+1}^n V_i V_k Y_{ik} e^{j(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})} \quad i = m+1, \dots, n \quad (16)$$

여자기를 사용하여 발전기의 단자전압을 일정하게 한다. 그림 12는 여자기/AVR 모형이다. 여자기는 3차 (E<sub>fd</sub>, R<sub>f</sub>, V<sub>R</sub>) 모형의 미분 방정식으로 아래와 같이 표현된다.

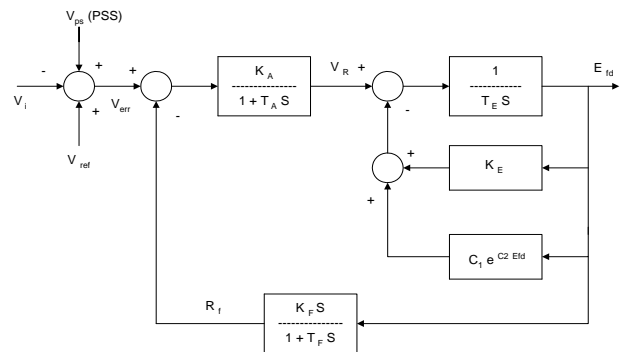


그림 12 여자기 모형

Fig. 12 Excitation system model

$$\dot{V}_R = \dot{x}_1 = -\frac{1}{T_A} V_R - \frac{K_E K_A}{T_F T_A} x_2 - \frac{K_A}{T_A} x_3 + \frac{K_A}{T_A} (V_{ps} - V_i + V_{ref}) \quad (17)$$

$$\dot{E}_{fd} = \dot{x}_2 = \frac{1}{T_E} V_R - \frac{(K_E + V_x)}{T_E} x_2 \quad (18)$$

$$\dot{R}_f = \dot{x}_3 = \frac{K_F}{T_E^2} E_{fd} - \frac{1}{T_F} x_3 \quad (19)$$

여기서 V<sub>R</sub>은 오차를 보정하는 1차 지연요소, E<sub>fd</sub>는 여자기

전압, R<sub>f</sub>는 계자권선의 저항으로 전류의 크기를 조절하여 자속을 발생을 조절한다. V<sub>i</sub>는 트랜즈 전압으로 각 모선

의 전압을 제공해서 모두 합하여 제공한 후 0.005로 나눈 값에 모션 전압을 곱한 값으로 하였다.  $V_{ref}$ 는 레퍼런스 전압으로 다음과 같다.

$$V_{ref} = V_{t0} + [V_{R0} - K_A R_{f0} + \frac{(K_A K_F)}{T_F} E_{fd0}] \quad (20)$$

여기서,  $R_{f0} = \frac{K_F}{T_F} E_{fd0}$ ,  $V_{R0} = K_E + C_1 e^{C_2 E_{fd0}}$ ,  $C_1 = \frac{S_{75}^4}{S_{max}^3}$ ,

$$C_2 = \frac{4}{E_{max}} \log(S_{max}/S_{75}) \text{ 이다.}$$

$V_{ps}$ 는 계통안정화 전압장치로 그림으로 나타내면 식 (21) - 식(24)와 같다.  $V_{ps}$ 는 여자기 모형에 레퍼런스 보조신호로 공급된다.

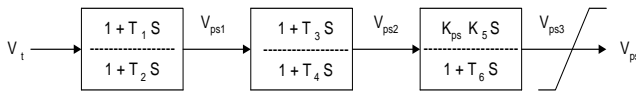


그림 13 IEEE type 전압 안정화 장치  
Fig. 13 IEEE type voltage stabilizer

$$\dot{V}_{ps1} = \dot{x}_1 = -\frac{1}{T_2} x_1 + \frac{1}{T_2} (1 - \frac{T_1}{T_2}) V_t \quad (21)$$

$$\dot{V}_{ps2} = \dot{x}_2 = \frac{1}{T_4} (1 - \frac{T_3}{T_4}) x_1 - \frac{1}{T_4} x_2 + \frac{1}{T_4} (1 - \frac{T_3}{T_4}) \frac{T_1}{T_2} V_t \quad (22)$$

$$\dot{V}_{ps3} = \dot{x}_3 = -\frac{K_{ps} T_4 T_5}{T_4 T_6^2} x_1 - \frac{K_{ps} T_5}{T_6^2} x_2 - \frac{1}{T_3} x_3 - \frac{K_{ps} T_1 T_3 T_5}{T_2 T_4 T_6^2} V_t \quad (23)$$

$$V_{ps} = \frac{K_{ps} T_4 T_5}{T_4 T_6} x_1 + \frac{K_{ps} T_5}{T_6} x_2 + x_3 + \frac{K_{ps} T_1 T_3 T_5}{T_2 T_4 T_6} V_t \quad (24)$$

발전기와 여자기 그리고 전압 안정화 모형에 대한 변수값을 표 5-7에 나타내었다.

표 5 각 발전기에 대한 변수값

Table 5 Each Machine data

발전기	$T_d'$	$T_q'$	M	D	$X_d$	$X_q$	$X_{dq}$
1	5.89	0.250	3.01	0.0	1.3125	1.258	0.181
2	6.00	0.197	6.40	0.0	0.8958	0.865	0.120
3(Slack)	8.96	0.097	23.64	0.0	0.1460	0.097	0.061

표 6 여자기에 대한 변수값

Table 6 Three exciter data

여자기	$K_E$	$E_{max}$	$S_{max}$	$S_{75}$	$T_E$	$T_A$	$K_A$	$K_F$	$T_F$
1	0.5	5.5	0.7	0.74	0.5	0.1	130	0.04	0.5
2	0.5	5.5	0.7	0.74	0.5	0.1	140	0.04	0.5
3	0.5	5.5	0.7	0.74	0.5	0.1	130	0.04	0.5

표 7 2번째 발전기의 안정화 장치에 대한 변수값

Table 7 Parameter of the second generator with PSS

ISS	$I_{ps}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$K_{ps}$
2	8	0.1	0.05	0.1	0.5	6	6	0

### 5. 사례연구와 제어효과 검토

사례연구에서는 발전기와 연결된 선로에 대한 관계식을 유도하여 계통의 조류계산을 한 후에 -0.025초에서 0초까지 발전기의 4차 미분 방정식, 여자기 3차 미분 방정식, 전압 트랜스듀서 1차 미분방정식 그리고 안정화 장치에 대한 미분 방정식을 상태로 하여 27개의 해를 구하였다. 사례연구 과정에서 발전기측의 전류(  $i_d, i_q$ )를 구하기 위해 선로로부터 발전기에 흐르는 전류(  $\hat{I}_g$ )를 d-q 변환으로 구한다.

$$I_{DQ} = \begin{bmatrix} I_D \\ I_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_r & -B_r \\ B_r & G_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix} = Y_r \begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서  $I_D, I_Q$ 와  $V_D, V_Q$ 는 선로측의 전류와 전압이다.  $Y_r$ 은 부하모션의 유효전력과 무효전력에 의한 부하를 선로에 합한 것으로 축소된 선로 어드미턴스 행렬이다. 발전기측의 전압은 식(24)로 표현된다. 여기서  $V_{dq}$ 는 선로와 발전기의 전류변환으로부터 구해진다.

$$V_{dq} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & X_q \\ -X_d' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (26)$$

식 (24)을 대입하면 발전기측의 전류(  $i_d, i_q$ )가 구해진다.

$$V_{dq} = R^{-1}(\delta) Y_r R(\delta) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$I_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = R^{-1}(\delta) [ Y_r^{-1} - X ]^{-1} R(\delta) \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} \quad (28)$$

또한 선로의 전압은 발전기의 전압으로 구해진다.

$$V_{DQ} = R(\delta) \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (29)$$

결국 발전기와 선로는 식이 연관되어 있음을 알 수 있다. 발전기의 상 미분 방정식을 풀기 위해 발전기 데이터와 발전기에 대한 계통의 데이터가 필요하다. 이에 따라 조류계산을 통해 계통의 데이터를 발전기 쪽으로 주어야 한다. 사례연구는 지락사고가 0.1초(6주기) 동안 발생하고서부터 사고복구 한 후에 5초 동안 UPFC를 제어하였다. 상 미분 방정식의 step 크기는 평균 4.45[ms]로 하여 해를 구하였다. 제어변수는 UPFC의 전압비(r)과 각도(  $\gamma$ )이고  $r=0.09$ [p.u]와 0.18[p.u]일 때 정상상태에서 제어 각을 학습한 결과를 활용하였다. 학습된 연결강도를 사용하여 사고발생 후 과도상태에서 선로의 조류를 신경망 입력으로 하여 출력인 제어 각을 구해 사고선로에 전력을 공급하여 계통의 안정도를 유지하였다. 그림 14는 UPFC 조류계산과 제어 알고리즘에 대한 전체 흐름도를 나타낸다. 그림 15-18은  $r=0.09$ [p.u]이고 초기 제어 각이 0 $^\circ$  일 때 사례연구 한 결과이고  $r=0.09$ [p.u]이고 초기 제어 각이 90 $^\circ$  인 경우에 사례연구 한 결과로 제

어 각이  $35^{\circ} \sim 29^{\circ}$ 인 범위에서 변화되고 있음을 알 수 있다. 제어 각의 초기치가  $0[^{\circ}]$  일 때 상 미분 방정식은 1131회 하였고 초기 제어 각이  $90[^{\circ}]$  인 경우에는 1266회 상 미분 방정식을 푼 결과이다.  $r=0.18[p.u]$ 이고 초기 제어 각이  $180[^{\circ}]$  일 때 사례연구한 결과로  $117^{\circ} \sim 103^{\circ}$ 인 범위에서 제어 되고 있음을 알 수 있었다. 이것은  $180[^{\circ}]$ 에서 선로의 유효 전력이 작아지는 값으로 변화되어 제어효과가 있음을 알 수 있었다. 사고 후 2.4초 정도에서 제어 각의 변화가 같은 변화로 안정하게 변함을 알 수 있었다. 그림 19는  $r=0.09[p.u]$  일때 제어 각의 변화에 따른 각 발전기의 각도 변화를 시각적으로 도시한 그림이다. 3번째 발전기를 기준으로 하여 상대적인 각도 변화를 통해 UPFC의 제어를 통한 각의 변화를 알 수 있었다. 첫 번째 발전기는 UPFC가 없을 때  $4.665^{\circ}$ 이고 UPFC 설치시  $6.673^{\circ} \sim 2.74^{\circ}$ 까지 변화하였고 2번째 발전기는  $9.28^{\circ}$ 인데 설치시  $11.265^{\circ} \sim 7.385^{\circ}$ 까지 변화됨을 알 수 있었다.

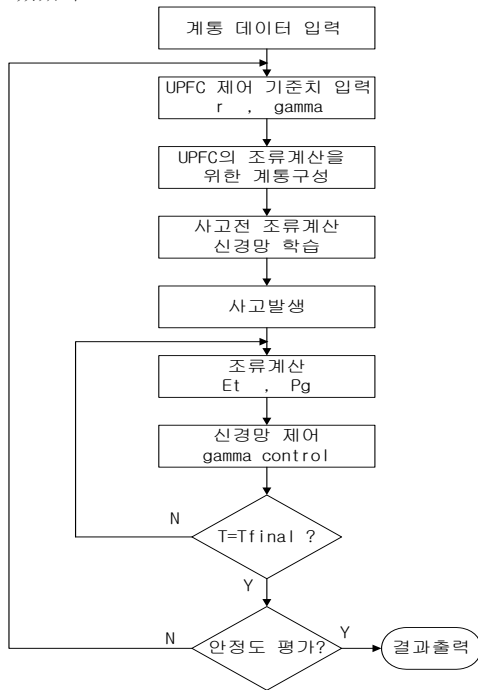


그림 14 UPFC 조류계산과 제어 알고리즘  
Fig. 14 Load flow and control algorithm

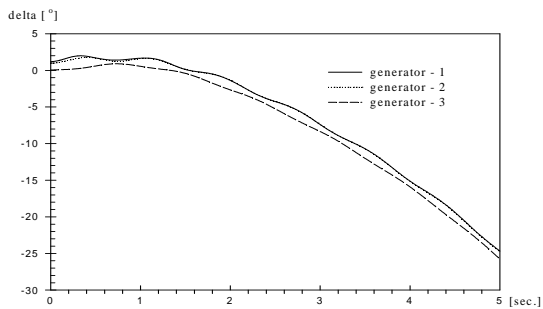


그림 15 각 발전기의 회전자 각도  $\delta$  ( $r=0.09, \gamma=0.$ )  
Fig. 15 Rotor angle of each generator at  $r=0.09$  and  $\gamma=0.$

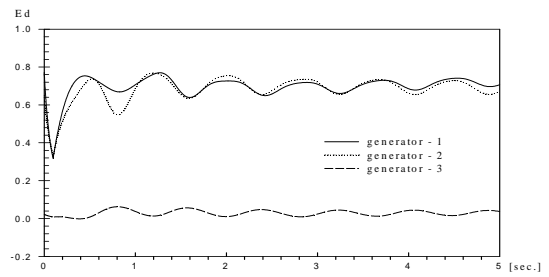


그림 16 발전기의 D축 전압 ( $r=0.09, \gamma=0.$ )  
Fig. 16 D-axis voltage of each generator at  $r=0.09$  and  $\gamma=0.$

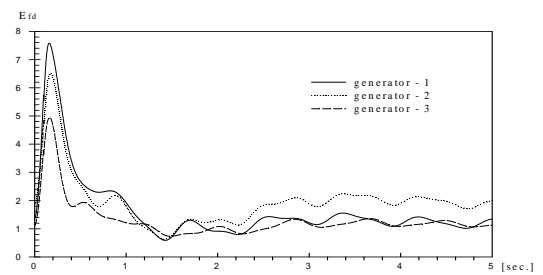


그림 17 여자기 출력  $E_{fd}$  ( $r=0.09, \gamma=0.$ )  
Fig. 17 Output of exciter at  $r=0.09$  and  $\gamma=0.$

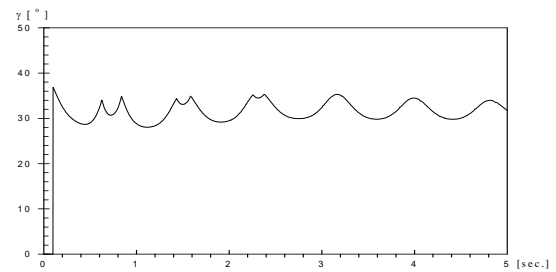


그림 18 UPFC 제어 각  $\gamma$  ( $r=0.09, \gamma=0.$ )  
Fig. 18 Control angle of UPFC at  $r=0.09$  and  $\gamma=0.$

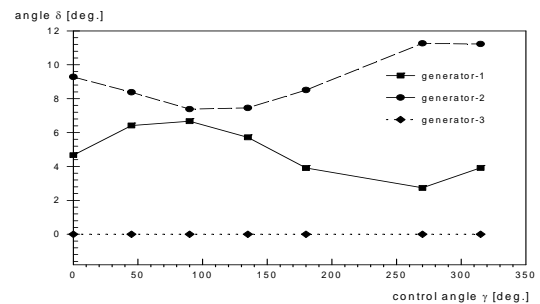


그림 19 제어 각의 변화에 발전기 각도  
Fig. 19 Generator angle with variation of control angle

## 6. 결 론

본 연구에서는 비선형 FACTS 신경망 제어기를 설계하여 발전기와 선로와 연결된 전력 계통에 적용하여 선로조류와 UPFC 제어 각을 학습하여 지락사고 후의 계통의 안정성을 유지하는 비선형 지능형 FACTS 제어기를 설계하였다. 본 연구에서는 4층의 인공 신경망의 구조를 선택하여 전력 계통 시스템에 적용하여 사고시 발생하는 불안정한 조류의 흐름을 안정하게 하는 비선형 신경망 UPFC 제어기를 설계하였다. 제안된 신경망 제어기의 학습과정과 제어 효과의 유용성을 입증하기 위해 사례연구로 WSCC 3기 9모선 전력 시스템에 적용하였다. 본 연구의 사례연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 제안된 비선형 신경망 FACTS 제어기는 전력 계통에 적용하여 사고시 발생하는 계통의 불안정한 선로조류를 설치한 UPFC의 크기와 제어 각의 원활한 제어로 안정화시켰다.

(2) 정상상태에서 조류 계산하여 원하는 출력신호와 입력신호를 관측하여 신경망을 학습하였고 제어기로 활용할 수 있는 학습과 제어 알고리즘을 제시하였다.

(3) UPFC의 초기치 변화에 대해 신경망의 제어기는 제어 효과가 발생하는 방향으로 제어 각을 발생함을 알 수 있었고 사례연구를 통해 입증하였다.

(4) UPFC 모형을 조류계산에 추가하여 정상상태에서 발전기 동력학에 대한 계통 데이터를 구하였고 사고복구 후 평균 4.45[ms]의 상 미분 방정식을 푸는 과정에서 조류계산을 하여 전력 계통 시스템의 동적 특성을 정확하게 식별하도록 제어하였다.

본 연구는 한국전력 지원 2000년도 지정과제(기초전력공학 공동연구소 관리번호 99-지-16) 연구비 지원으로 수행되었음을 알리며 관계 기관에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

[1] N.G. Hingorani, "High power electronics and flexible AC transmission system", IEEE power Eng. Rev., July 1988.

[2] N.G. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE SPECTRUM pp. 40-45, April, 1993.

[3] 박종근외 2인, "송전용 FACTS 기기 개발 동향 -UPFC의 개념과 송전계통 적용 현황", 대한전기학회 학회지, 제 47권 3호, 1998.

[4] 한병문, "비선형 보상을 적용한 송전용 무효전력 보상기의 제어 시스템 설계", 전기학회논문지, 제 46권, 제1호, pp.31-37, 1997.

[5] L. Gyugyi, "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems", IEE PROC.-C, Vol. 139, NO. 4. July 1992.

[6] 김학민의 3인, "IPLAN을 이용한 UPFC 안정도 해석 전산 모형", 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 119-123, 1998.

[7] 강인수의 3인, "UPFC를 이용한 선로 과부하 해소에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1023-1025, 1999.

[8] 서보혁의 3인, "계통의 안정성을 고려한 FACTS 비선형 지능 제어기 설계", 전력기술 기초연구 성과발표 논문집, pp. 104-107, 2000.

[9] P.W. Sauer and M.A. Pai, Power System Dynamics and Stability, Prentice Hall, 1998.

## 저 자 소 개



**박 성 옥 (朴 省 昱)**

1964년 11월 16일생. 1987년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 구미1대학 컴퓨터 응용 전기전공 부교수

Tel : 054-440-1203

Fax : 054-440-1209

E-mail : swpark@kumi.ac.kr



**서 보 혁 (徐 輔 赫)**

1952년 3월 1일생. 1975년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1982년~현재 경북대학교 공과대학 전자전기공학부 교수

Tel : 053-950-5604

Fax : 053-950-6600

E-mail : bhsuh@kku.ac.kr