

FACTS 비선형 지능 제어기 설계

박성욱 · 서보혁
 구미1대학 전기전공 · 경북대 전자전기 공학부

Design of Nonlinear FACTS Controller with intelligent Algorithm

Park Seong Wook · Seo Bo Hyeok

Abstract - We propose a intelligent controller for FACTS(Flexible AC Transmission System) 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. The control signal which is provided for FACTS device installed in the network is produced. The proposed controller is applied to Unified Power Flow Controller(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 three machine nine bus power system.

1. 서 론

최근에 대용량 전력전자기술을 이용하여 송전선로에서 전압의 크기, 위상차 그리고 선로 임피던스를 실시간으로 제어하여 계통의 송전용량과 안정도를 혁신적으로 향상시키려는 연구가 지난 80년대 말부터 착수되었는데 이와 관련된 기술이 FACTS (flexible ac transmission system)이다[1,2]. FACTS 기기는 써리스터와 수동소자를 사용하는 SVC(static var compensator), TCSC (thyristor controlled series capacitor)가 있고 GTO(gate turn off) 소자를 이용한 STACON(static condenser), UPFC (unified power flow controller) 등이 있다. 자력식 인버터를 사용하여 SVC의 성능을 획기적으로 개선한 정지형 동기 조상기(STACON)는 동기조상기와 유사한 연속제어성능을 가지며, 진폭과 위상각의 신속한 제어로 무효전력보상은 물론 계통의 동요나 저주파공진 감소와 같은 계통의 동적특성과 안정도향상에 큰 효과를 볼 수 있다[3]. 이와 동일한 구조를 가지며 선로와 직렬로 동작하는 정지형 동기 직렬 보상기(SSCC)가 있다. STACON과 SSCC의 직류단을 공유시켜 선로로 전송되는 무효전력 뿐만 아니라 유효전력도 보상 가능한 통합 종류제어기(UPFC)의 개념이 L.Gyugyi에 의해 정립되었다[4].

본 논문은 조류계산을 이용하여 정상상태에서 UPFC를 해석하고 UPFC가 연계된 계통 시스템의 수리모형을 이용하여 발전기 제어계의 특성을 고려한 계통 시스템의 전체적인 안정도 향상과 선로 과부하를 해소하는 지능형 제어기를 구성한다. 사례연구로서 UPFC가 설치된 3기 9 모선의 계통에 모의 실험하여 UPFC의 안정도 향상효과와 효율성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 UPFC 모형

UPFC는 선로에 걸리는 전압을 임의의 크기와 위상을 갖도록 신속히 제어하여 선로로 전송되는 유·무효전력을 총체적으로 보상하는 기능을 갖는다. UPFC는 그림 1과 같이 2개의 전압원 인버터와 하나의 직류 캐패시터를

공유해 링크되어 있다. 기능상 인버터 하나는 송전선로와 병렬로 그리고 다른 하나는 선로에 직렬로 연결되어 있다. 편의상 병렬로 연결된 인버터를 인버터 I 그리고 직렬로 연결된 인버터를 인버터 II라고 하면 그림 1과 같이 UPFC의 시스템을 구성할 수 있다.

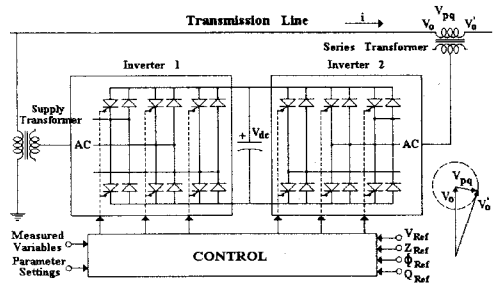


그림 1. UPFC의 시스템 구성

인버터 I의 주기능은 인버터 II에서 필요로 하는 유효전력을 전력계통으로 흡수하여 직류링크를 통해 공급하는 것이다. 인버터 II는 선로에 유효전력을 공급하는 동시에 자신이 무효전력을 소모함으로 인버터 I는 유효전력의 공급뿐만 아니라 무효전력도 동시에 공급한다. 인버터 II는 계통과 동일한 주파수의 교류전압을 주입하는 기능을 갖는다. 이 때 주입전압의 위상각은 인버터의 점호각 α_{pq} 에 의해 결정되는데 $0 < \alpha_{pq} < 2\pi$ 인 범위 내에서 임의로 조정이 가능하다.

2.2 조류계산을 위한 UPFC 모형

UPFC의 정상상태 모형은 인버터 I를 병렬 전압원으로, 인버터 II를 직렬 전압원으로 등가하여 모형화 할 수 있다. 정상상태에서 UPFC를 포함하여 조류계산을 할 때, 병렬 전압원은 그 주입전류에 모선의 전압을 곱하여 유·무효전력이 계산되지만 직렬 전압원은 조류계산에 그대로 이용할 수 없으므로 조류계산을 위한 모형이 필요하다. 계통에서 모선 i와 모선 j사이에서 직렬 전압원이 있다고 하면 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 전압이다[5].

$$\bar{V}_i' = \bar{V}_{pq} + \bar{V}_i \quad (1)$$

직렬 전압원 \bar{V}_{pq} 의 크기와 위상은 제어 가능하다. 그림 3은 등가회로 벡터도이다.

$$\bar{V}_{pq} = r \bar{V}_i e^{j\alpha} \quad (2)$$

본 연구에서는 UPFC 주입모형을 조류계산 과정에 삽입하여 모선조류와 선로조류를 계산하였다.

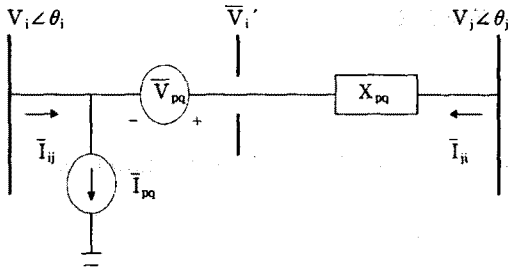


그림 2. UPFC의 등가 회로

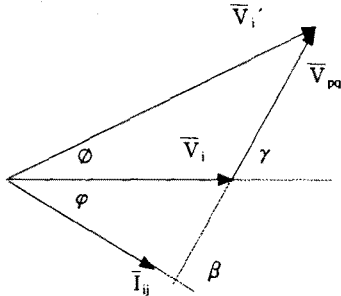


그림 3. 직렬 전압원 등가회로의 벡터도

UPFC가 삽입된 모선간에 선로 임피던스에 의한 선로 순수전류(I_{flow})와 선로의 캐패시터를 양쪽방향으로 고려하여 FACTS 기기에 의한 상승된 전압에 전류를 구하여 주입전류를 다음과 같이 구하였다.

$$I_{flow} = \frac{(\bar{V}_i - \bar{V}_j)}{Z_L} \quad (3)$$

$$I_{ij} = I_{flow} + C/2 \quad (4)$$

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

$$S_{flow} = \text{diag}[\bar{V}_i] \cdot \bar{I}_{ij}^* \cdot \text{단위열벡터} \quad (5)$$

$$P_n = \text{real}(S_{flow}) = P_t \quad (6)$$

$$Q_n = \text{imag}(S_{flow}) = Q_t \quad (7)$$

조류계산 과정에서 모선간의 방향을 나타내는 행렬(a)을 이용하여 들어가는 모선의 조류를 S_{flow}에 곱하여 정리하면 선로조류(Sline)를 계산 할 수 있다.

$$Sline = (\text{diag}[\bar{V}_i] \cdot \bar{I}_{ij}^* \cdot a_3)^T \cdot \text{단위열벡터} \quad (8)$$

선로조류의 유효전력성분과 무효전력성분은 주입전압의 기준값으로 직렬 인버터의 제어명령으로 입력된다.

3. UPFC 제어모형

그림 3에서 γ 가 0°에서 360° 범위 내에서 변화함에 따라 \bar{V}_i 는 UPFC의 설정 주입전압의 크기만큼 유·무효전력의 흐름을 수전단에 전달하여 수전단에서 필요한 유·무효전력을 충족시킬 수 있다. 송수전단의 전압의 위상차(δ)가 임의의 값으로 주어지면 전송 유효전력과 수전단의 무효전력 수요는 UPFC에 의해 주입전압의 크기 (V_{pq})와 위상각(γ)으로 제어 가능하다.

4. 신경망 제어효과 검토

신경망을 사용하여 정상상태에서 UPFC 기기를 학습한

후 학습된 신경망의 연결강도를 이용하여 전력계통에 적용하여 사고복구 후 UPFC의 제어작용 제어함으로 제어효과를 검토한다.

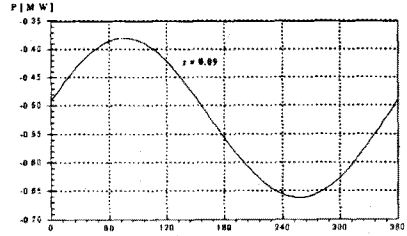


그림 4. 위상각(γ)의 변화에 대한 유효전력

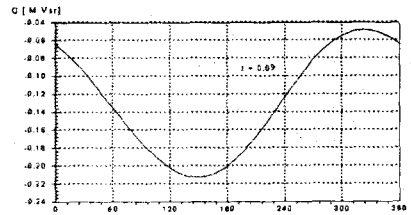


그림 5. 위상각(γ)의 변화에 대한 무효전력

4.1 학습 알고리즘과 UPFC 기기 학습

UPFC 기기를 제어하기 위해 정상상태에서의 선로조류(유효전력, 무효전력)를 입력변수에 대응된 위상각(γ)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 4-5의 y축을 입력으로 x축을 출력으로 학습하였고 평균 제곱오차가 0.0015[rad]이하의 범위내에 들어오면 학습을 끝나게 했다. 즉 입력력 데이터로 신경망을 학습하여 평균 제곱오차가 약 0.5[°]의 범위내에 들어오도록 학습하였다. 학습하는 과정에서 동일한 확률분포를 가진 각을 발생하여 학습하여 학습의 효율을 높였다. 그림 6은 360범위내의 각도의 분포를 나타내고 그림 7은 학습시 사용한 각에 대한 확률분포를 나타낸다. 학습한 결과와 평균 비용함수를 표1에 나타내었다.

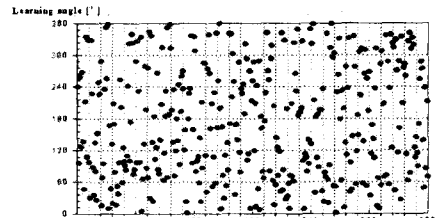


그림 6 동일한 확률분포에 의한 γ 각 발생

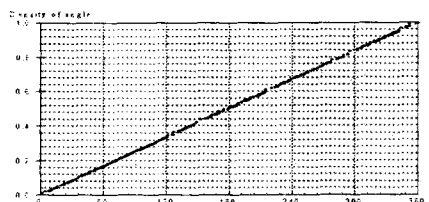


그림 7 학습시 사용한 각에 대한 확률분포

표-1. 정상상태에서 선로조류에 대한 제어 각의 학습

신경망 제어변수	신경망의 구조	평균 비용함수	학습횟수	학습율
$r=0.09$ $\gamma=1\sim36$	16-6-17-1	0.504[deg.]	80회	0.6

4.1 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.

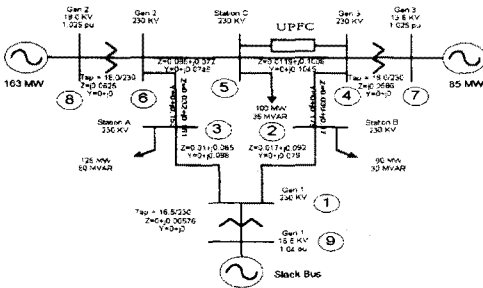


그림 8. WSCC 3기 9모선 전력 계통

UPFC가 설치된 선로는 8번 선로로 모선 ④과 ⑤사이 설치하였고 설치유무는 FACTS의 type이 6이면 설치된 것으로 인식한다. 3기 9모선의 계통에 조류계산 한 결과를 나타낸 것으로 참고문헌[6]에 있는 결과와 일치함을 알 수 있었다. UPFC를 계통의 ④-⑤모선에 설치하여 조류계산 한 결과 표 2에 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 조류계산 결과 (UPFC 설치시)

모선	형태	전압 (p.u)	각도 [deg.]	P _t (p.u)	Q _t (p.u)
①	P-Q	1.0258	-2.2168	0.000	0.000
②	P-Q	0.9956	-3.9888	-1.250	-0.500
③	P-Q	1.0127	-3.6874	-0.900	-0.300
④	P-Q	1.0258	3.7197	0.000	0.000
⑤	P-Q	1.0159	0.7275	-1.000	-0.350
⑥	P-Q	1.0324	1.9667	0.000	0.000
⑦	P-V	1.0250	4.6648	0.850	-0.1086
⑧	P-V	1.0250	9.2800	1.630	0.0665
⑨	슬랙	1.0400	0.000	0.7164	0.2705

4.2 전송선로와 동기 발전기의 동력학

동기 발전기와 연결된 선로는 고정자 대수 식과 계통 대수 식 그리고 발전기 미분 방정식으로 표현된다. 과도 리액턴스와 포화를 무시한다고 가정하고 2축 모형으로 표현하였다. 또한 터빈 조속기의 동력 항 T_{Mi}를 무시한다. 발전기는 4차(ω δ E_d E_q) 모형의 미분 방정식으로 아래와 같이 표현된다.

$$M \frac{d\omega_{di}}{dt} = P_m - (\psi_{di} I_{qi} - \psi_{qi} I_{di}) - D\omega \quad (9)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (10)$$

$$T_q' \frac{dE_{di}}{dt} = -E_{di}' + (X_{qi} - X_{qi}') I_{qi} \quad (11)$$

$$T_d' \frac{dE_{qi}}{dt} = -E_{di}' - (X_{di} - X_{di}') I_{di} + E_{fdi} \quad (12)$$

계통 대수 식은 복소수 형태로 표현된다.

$$V_i e^{-j\theta} (I_{di} - jI_{qi}) + P_{Li}(V_i) + jQ_{Li}(V_i) = \sum_{k=1}^n V_k V_k Y_{ik} e^{j(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})} \quad (13)$$

$$P_{Li}(V_i) + jQ_{Li}(V_i) = \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} e^{j(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})} \quad i = m+1, \dots, n \quad (14)$$

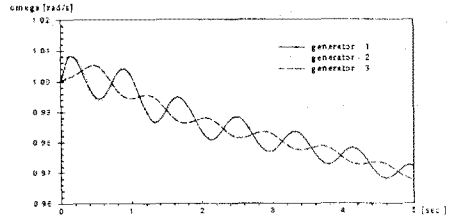


그림 9. 발전기의 각속도 ω (r=0.09, γ=90°)

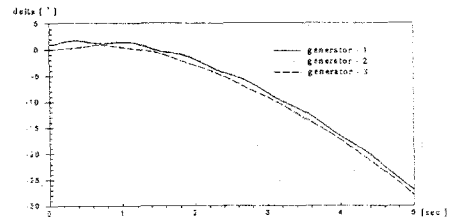


그림 10. 발전기의 각도 δ (r=0.09, γ=90°)

5. 결 론

본 연구에서는 신경망을 사용하여 발전기와 선로와 연결된 전력 계통에 적용하여 UPFC를 학습하여 지락사고 후의 계통의 안정성을 유지하는 비선형 지능형 FACTS 제어기를 설계하였다. 본 연구의 사례연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째로, 제안된 비선형 신경망 FACTS 제어기는 전력 계통에 적용하여 사고시 발생하는 선로의 불안정한 선로조류를 설치한 UPFC의 크기와 제어 각의 원활한 제어로 계통을 안정화시켰다. 둘째로, 정상상태에서 조류 계산을 원하는 출력신호와 입력신호를 관측하여 신경망을 학습하였고 제어기로 활용할 수 있는 학습과 제어 알고리즘을 제시하였다. 또한 UPFC 모형을 조류 계산에 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.

(참 고 문 헌)

- [1] N.G. Hingorani, "High power electronics and flexible transmission system", IEEE power Eng. Rev., July
- [2] N.G. Hingorani, "Flexible AC Transmission", SPECTRUM pp. 40-45, April, 1993.
- [3] 한병문, "비선형 보상을 적요한 송전용 무효전력보상기의 제어 시스템 설계", 전기학회논문지, 제 46권, 제 1호 pp.31-37, 1997.
- [4] L. Gyugyi, "Unified power-flow control concept flexible AC transmission systems", IEE PROCEED -C, Vol. 139, NO. 4, July 1992.
- [5] 강인수의 3인, "UPFC를 이용한 선로 과부하 해소에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1023-1025, 1999.
- [6] P.W. Sauer and M.A. Pai, Power System Dynamics and Stability, Prentice Hall, 1998.