

# 코호넨 신경회로망을 이용한 ULTC 변압기와 STACOM의 협조제어

論 文

48A-9-7

## Coordination Control of ULTC Transformer and STACOM using Kohonen Neural Network

金光源\* · 李興載\*\*  
(Gwang-Won Kim · Kwang-Ho Lee)

**Abstract** - STACOM will be utilized to control substation voltage in the near future. Although STACOM shows good voltage regulation performance owing to its rapid and continuous response, it needs additional reactive power compensation device to keep control margin for emergency such as fault. ULTC transformer is one of good candidates. This paper presents a Kohonen Neural Network (KNN) based coordination control scheme of ULTC transformer and STACOM. In this paper, the objective function of the coordination control is minimization of both STACOM output and the number of switchings of ULTC transformer while maintaining substation voltage magnitude to the predefined constant value. This coordination control is performed based on reactive load trend of the substation and KNN which offers optimal tap position in view of STACOM output minimization. The input variables of KNN are active and reactive power of the substation, current tap position, and current STACOM output. The KNN is trained by effective Iterative Condensed Nearest Neighbor (ICNN) rule. This coordination control is applied to IEEE 14 bus system and shows satisfactory results.

**Key Words** : ULTC Transformer, STACOM, Coordination Control, Kohonen Neural Network, Iterative Condensed Nearest Neighbor Rule

### 1. 서 론

현재 변전소의 전압조정은 대부분 ULTC 변압기와 병렬 캐패시터에 의존하고 있다. ULTC 변압기는 탭의 조작으로 변전소 저압측 전압에 일차적인 영향을 미치고 병렬 캐패시터는 변전소에서 필요로 하는 무효전력량을 변동시킴으로써 변전소의 고압측 전압에 일차적인 영향을 미친다. 그러나, 이러한 기존 제어 장치는 연속적인 전압제어가 불가능하고 스위칭 수에 제한이 있으며, ULTC 변압기는 제어 파라메타인 불감대(dead band)와 시간지연(time delay)[1]을 통하여 전압제어성과 스위칭 수간의 상충(trade-off)을 조정한다.

최근에는 전력전자 기술의 비약적인 발전으로 전력의 흐름을 유연하게 제어할 수 있는 다양한 FACTS 설비가 개발되었으며, 외국에서는 이미 실계통에 적용하여 우수한 전압 제어 능력을 보이고 있다[2-4]. 현재 우리나라에서도 무효전력 제어를 목적으로 SVC의 실계통 적용이 추진되고 있으며, 1MVA급 IGBT형 STACOM이 개발단계에 있는 등 FACTS 설비에 대한 관심이 날로 높아가고 있다[4,5]. 이 중에서 STACOM은 무효전력의 신속한 공급 또는 소비를

통하여 해당 모선의 전압을 일정하게 유지시키는 능력이 있어서 차세대 변전소 전압조정용 기기로 각광 받고 있다. STACOM의 역할은 다음과 같이 구분할 수 있다[6].

- (1) fast voltage regulator
- (2) fast current limiter and overload management control
- (3) slow reset control

위에서 (2)는 STACOM의 우수한 특징의 하나로서, 과도 상태의 정격을 정상상태 정격의 120%내지 180%까지 향상시킨다. (3)은 Q-runback 이라고도 하며 STACOM의 동작점을 한계값으로부터 중앙값으로 서서히 이동시킴으로써 언제 발생할지 모르는 급격한 외란에 대처할 운전여유를 확보한다. 그러나, Q-runback에 의하여 감소되는 STACOM의 출력은 다른 무효전력 보상원에 의해 부담되어야 하며, 보상원이 없으면 STACOM의 동작점은 한계값 부근에 머무를 수밖에 없다. 이러한 무효전력의 보상원으로는 기존에 변전소 전압제어를 위하여 설치되어 있는 ULTC 변압기를 사용하는 것이 바람직하다. 두 전압 조정기기는 스위칭 수의 최소화와 운전여유의 확보라는 각각의 내부 제약조건과 함께 해당 모선의 전압을 정해진 값으로 유지해야 하는 공동의 목표를 만족해야 한다. 그러나, 각 제약조건 및 목표는 모두 상충(trade-off) 관계에 있으므로 적절한 타협이 있어야 하며, 이러한 타협이 협조제어의 의미라고 할 수 있다.

ULTC 변압기와 STACOM의 협조제어는 Paserba[6]에 의해 제안된 바 있는데, Paserba는 STACOM의 출력을 ULTC 변압기의 제어기로 되먹임하여 탭의 위치를 제어하

\* 正 會 員 : 蔚山大 電氣電子自動化工學部 助教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 光云大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 3月 18日

最終完了 : 1999年 7月 16日

앞서 설명한 바와 같이 변압기 탭은  $\pm 10\%$ 내에서 0부터 32까지 33 단계의 값을 가질 수 있는데, 그림 5는 변압기의 탭을 16에 고정한 경우에 STACOM의 출력곡선이며 시스템의 용량기준값은 100MVA이다. 그림 5에서 STACOM의 출력은 부하수준과 같은 형태로 변동함을 알 수 있다.

그림 6~9는  $\alpha$ 와  $\beta$ 가 같으면서 각각 1, 2, 3, 4인 경우의 STACOM 출력과 탭 변화도로서 탭은 초기 상태가 16이고 5분 주기로 제어된다고 하였다. STACOM의 출력을 기준으로 보면 그림 6의  $\alpha=\beta=1$ 인 경우가 가장 바람직 하지만, 탭 변화 수를 기준으로 하면  $\alpha=\beta=4$ 인 경우가 가장 바람직하다. 이는  $\alpha$ 와  $\beta$ 가 클수록 탭의 변경 조건이 어려워지기 때문이며 당연한 결과라 할 수 있다.

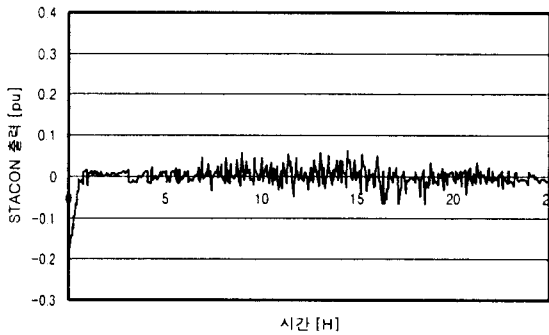


그림 6  $\alpha=1, \beta=1$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 6 STACOM output when  $\alpha=1, \beta=1$ .

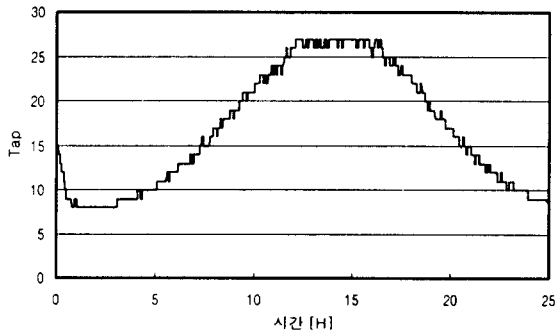


그림 7  $\alpha=1, \beta=1$  인 경우의 탭 변화  
Fig. 7 Tap changing(b) when  $\alpha=1, \beta=1$ .

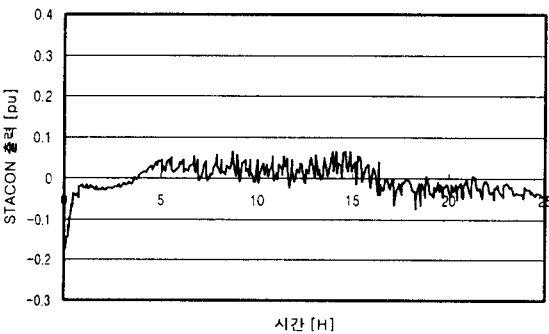


그림 8  $\alpha=2, \beta=2$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 8 STACOM output when  $\alpha=2, \beta=2$ .

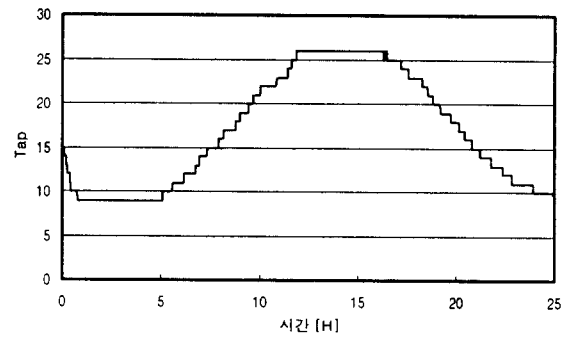


그림 9  $\alpha=2, \beta=2$  인 경우의 탭 변화  
Fig. 9 Tap changing when  $\alpha=2, \beta=2$ .

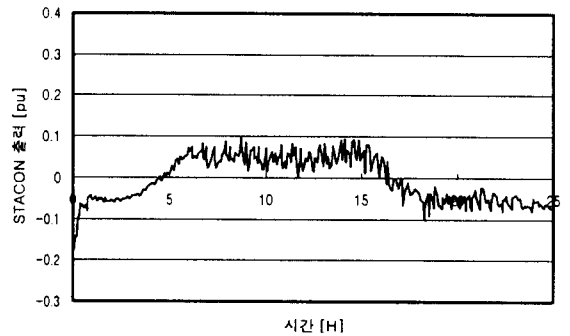


그림 10  $\alpha=3, \beta=3$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 10 STACOM output when  $\alpha=3, \beta=3$ .

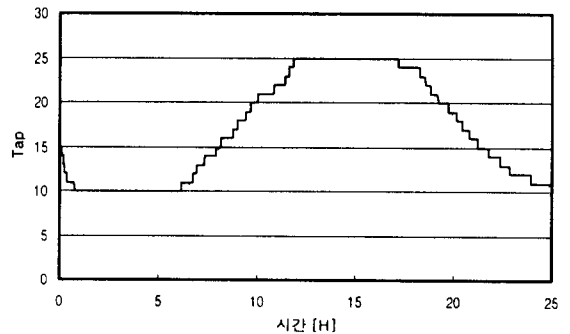


그림 11  $\alpha=3, \beta=3$  인 경우의 탭 변화  
Fig. 11 Tap changing when  $\alpha=3, \beta=3$ .

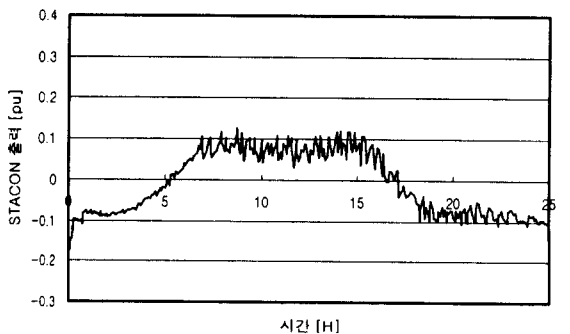


그림 12  $\alpha=4, \beta=4$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 12 STACOM output when  $\alpha=4, \beta=4$ .

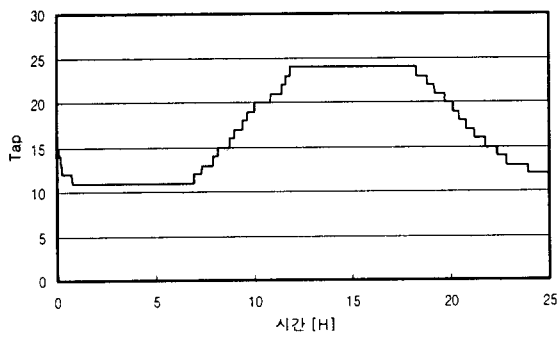


그림 13  $\alpha=4, \beta=4$  인 경우의 탭 변화(b)  
Fig. 13 Tap changing when  $\alpha=4, \beta=4$ .

그림 10은  $\alpha=1, \beta=2$ 인 경우의 STACOM 출력과 탭 변화도로서 STACOM 출력은 그림 6의  $\alpha=\beta=1$ 인 경우와 유사한 반면에 탭의 변경 수는 훨씬 적으므로 그림 6보다 우수한 결과를 보인다고 할 수 있다.

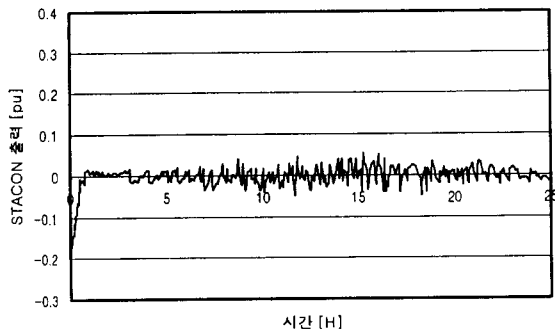


그림 14  $\alpha=1, \beta=2$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 14 STACOM output when  $\alpha=1, \beta=2$ .

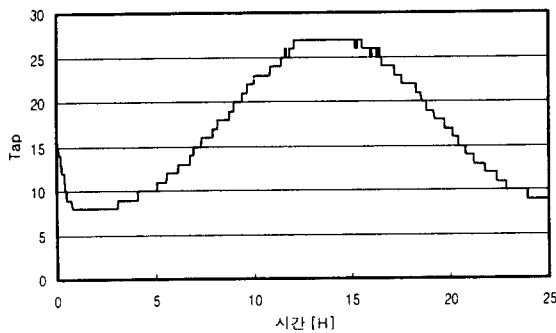


그림 15  $\alpha=1, \beta=2$  인 경우의 탭 변화(b)  
Fig. 15 Tap changing(b) when  $\alpha=1, \beta=2$ .

그림 11~13은  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 따른 제어기 상태를 파악하고자  $\beta$ 를 4에 고정하고  $\alpha$ 를 각각 1, 2, 3으로 변경하면서 실험한 결과이다. 그림을 보면  $\alpha$ 가 작을수록 STACOM의 출력은 개선됨을 알 수 있고,  $\alpha$ 가 1인 그림 6, 10, 13을 비교하면 STACOM의 출력이 거의 같음을 또한 알 수 있다. 또한, 그림 7과 12, 그림 8과 11등  $\alpha$ 가 서로 같은 경우를 비교해보아도 STACOM의 출력은  $\alpha$ 와 밀접한 관계가 있음을 알

수 있다. 한편, 위의 비교 대상에서 탭 변화를 보면  $\beta$ 가 클수록 탭의 변경수가 적어짐을 알 수 있다. 이상을 정리하면  $\alpha$ 는 작은 수이고  $\beta$ 는 큰 수인 경우, 즉, 코호넨 신경회로망이 제안하는 탭의 조작 방향과 부하의 변화추세가 같을 때만 탭을 변경하는 것이 종합적인 전지에서 최적의 협조제어라고 할 수 있다. 그림 14는  $\alpha$ 가 1이고  $\beta$ 를 매우 큰 수로 한 경우의 STACOM 출력과 탭 변화곡선인데 그림 13과 모든 면에서 거의 같다. 이는  $\beta$ 가 어느 정도 이상이면 의미를 지니지 않음을 보여 준다.

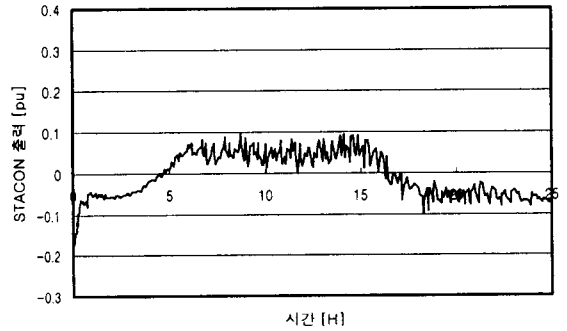


그림 16  $\alpha=3, \beta=4$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 16 STACOM output when  $\alpha=3, \beta=4$ .

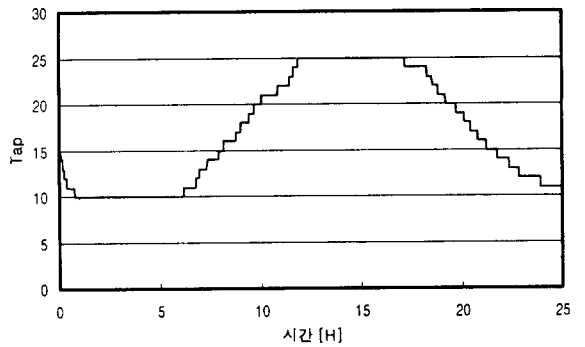


그림 17  $\alpha=3, \beta=4$  인 경우의 탭 변화  
Fig. 17 Tap changing when  $\alpha=3, \beta=4$ .

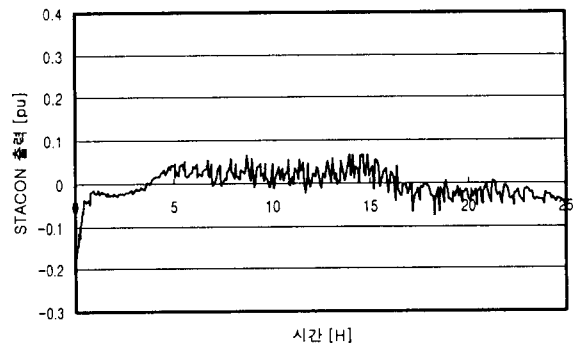


그림 18  $\alpha=2, \beta=4$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 18 STACOM output when  $\alpha=2, \beta=4$ .

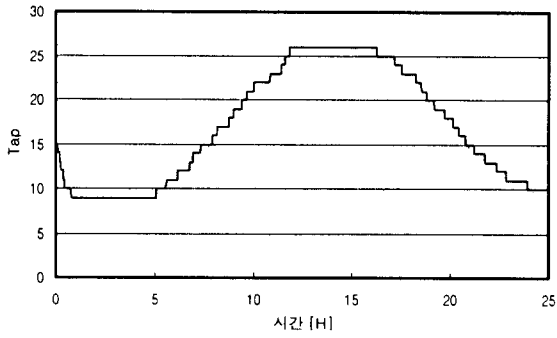


그림 19  $\alpha=2, \beta=4$  인 경우의 탭 변화(b)  
Fig. 19 Tap changing when  $\alpha=2, \beta=4$ .

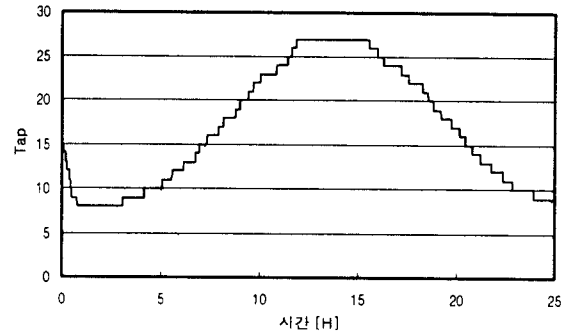


그림 23  $\alpha=1, \beta=\infty$  인 경우의 탭 변화(b)  
Fig. 23 Tap changing(b) when  $\alpha=1, \beta=\infty$ .

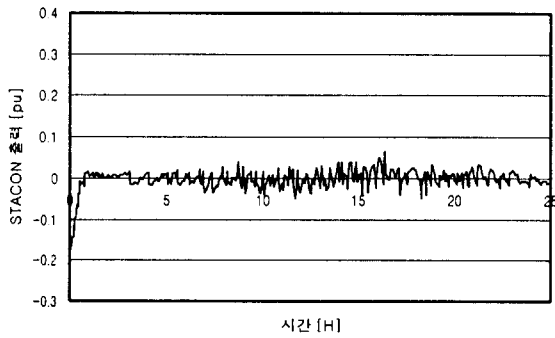


그림 20  $\alpha=1, \beta=4$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 20 STACOM output when  $\alpha=1, \beta=4$ .

이상은 그림 3의 계통에 고장이 발생하지 않은 경우였으나, 그림 15는 20번 선로에 17시 정각에 고장이 발생해서 선로가 개방되었을 때,  $\alpha=1, \beta$ ='매우 큰 수'로 한 경우의 STACOM 출력과 탭 변화곡선이다. 그림 15에서 모선 전압을 1pu로 유지하기 위해 STACOM 출력이 급증함을 볼 수 있다.

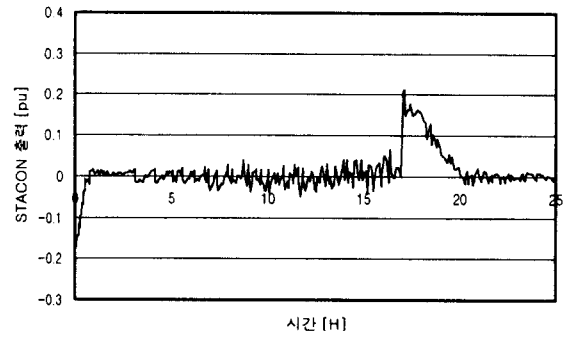


그림 24 20번 선로 개방시  $\alpha=1, \beta=\infty$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 24 STACOM output(a) when line 20 is open and  $\alpha=1, \beta=\infty$ .

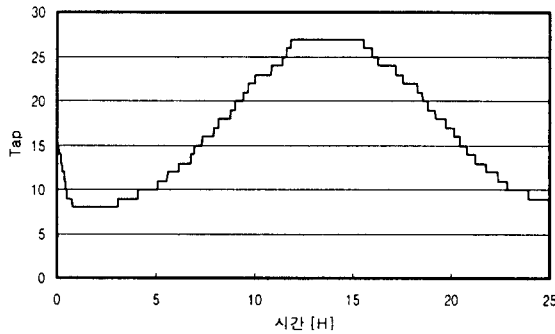


그림 21  $\alpha=1, \beta=4$  인 경우의 및 탭 변화(b)  
Fig. 21 STACOM output when  $\alpha=1, \beta=4$ .

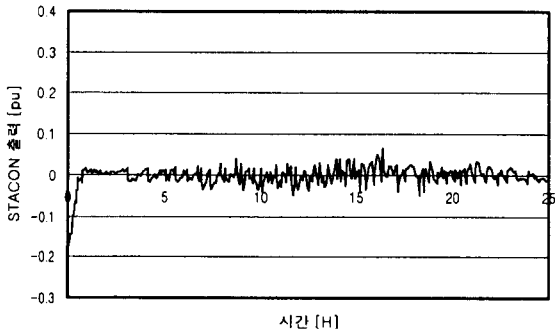


그림 22  $\alpha=1, \beta=\infty$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 22 STACOM output when  $\alpha=1, \beta=\infty$ .

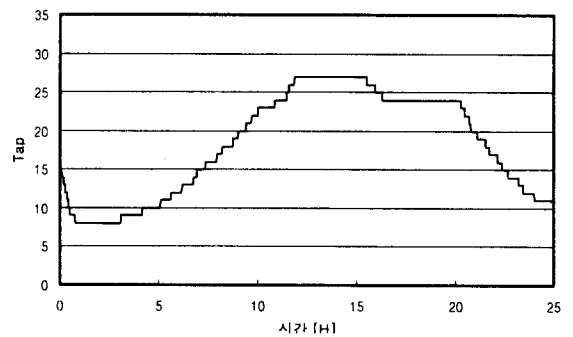


그림 25 20번 선로 개방시  $\alpha=1, \beta=\infty$  인 경우의 탭 변화(b)  
Fig. 25 Tap changing(b) when line 20 is open and  $\alpha=1, \beta=\infty$ .

그림 16은 같은 조건에서  $\alpha=1, \beta=4$ 로 한 경우의 결과

인데, 탭의 조작 수는 다소 증가하였으나 STACOM 출력이 개선되었다. 그림 17은  $\alpha=1, \beta=1$ 로 한 경우로서 STACOM 출력이 더욱 개선된 반면에 탭의 조작이 지나치게 많아짐을 알 수 있다. 이상과 같이 고장이 발생한 경우에는  $\alpha$ 를 작은 값으로 하되  $\beta$ 를 적절한 값으로 할당하여야 바람직한 협조제어가 이루어진다고 할 수 있다.

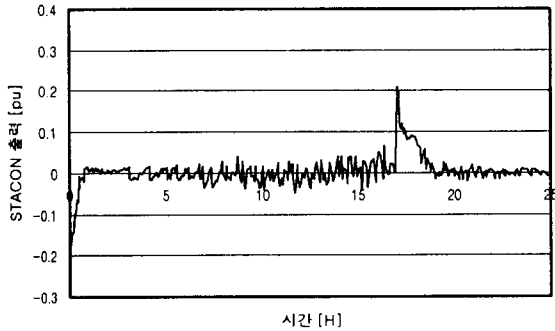


그림 26 20번 선로 개방시  $\alpha=1, \beta=4$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 26 STACOM output when line 20 is open and  $\alpha=1, \beta=4$ .

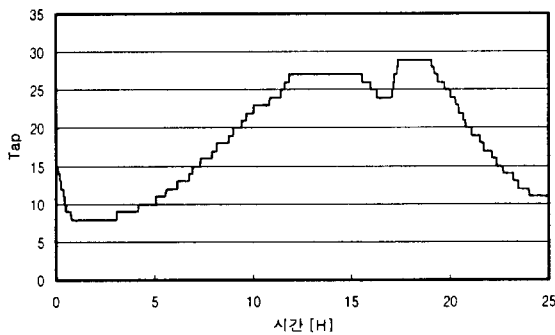


그림 27 20번 선로 개방시  $\alpha=1, \beta=4$  인 경우의 탭 변화  
Fig. 27 Tap changing when line 20 is open and  $\alpha=1, \beta=4$ .

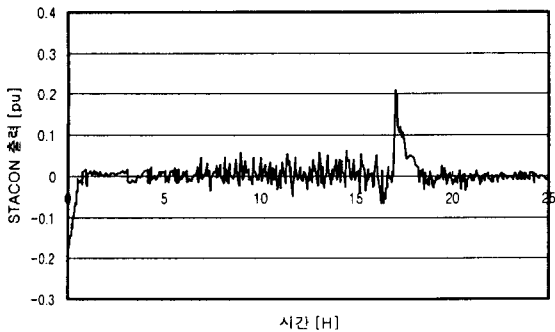


그림 28 20번 선로 개방시  $\alpha=1, \beta=1$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 28 STACOM output when line 20 is open and  $\alpha=1, \beta=1$ .

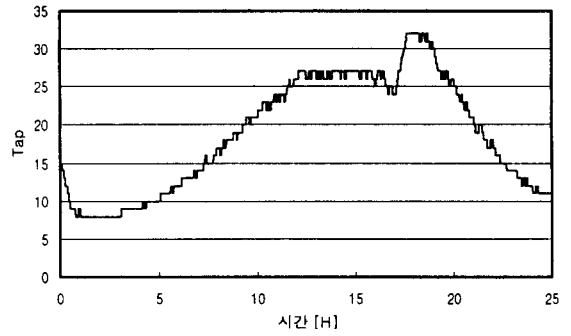


그림 29 20번 선로 개방시  $\alpha=1, \beta=1$  인 경우의 탭 변화  
Fig. 29 Tap changing when line 20 is open and  $\alpha=1, \beta=1$ .

그림 18은 신경회로망의 학습에 고려하지 않은 12번 선로에 고장이 발생한 경우에  $\alpha=1, \beta=4$ 로 할당한 제어 결과로서 원활한 협조제어가 이루어졌다.

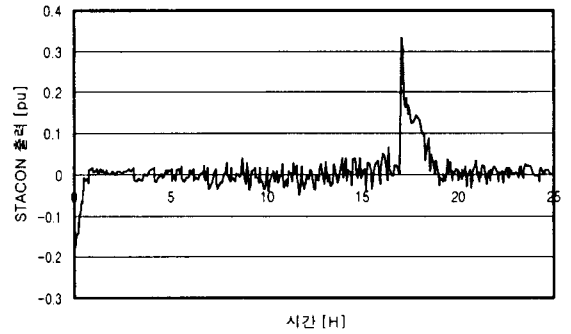


그림 30 12번 선로 개방시  $\alpha=1, \beta=4$  인 경우의 STACOM 출력  
Fig. 30 STACOM output when line 12 is open and  $\alpha=1, \beta=4$ .

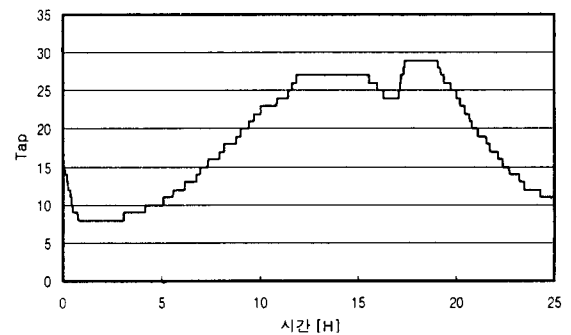


그림 31 12번 선로 개방시  $\alpha=1, \beta=4$  인 경우의 탭 변화  
Fig. 31 Tap changing when line 12 is open and  $\alpha=1, \beta=4$ .

이상을 종합할 때, 정상상태와 고장상태를 모두 고려하여 원활한 협조제어를 구현하려면  $\alpha$ 를 작은 값으로 할당하고  $\beta$ 를 적절한 값으로 할당하여야 한다고 결론지을 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 코호넨 신경회로망과 부하추세를 이용한 ULTC 변압기와 STACOM의 협조제어 방법을 제시하였다. 본 논문에서 STACOM은 변압기 저압측의 전압조절을 독립적으로 담당하고 ULTC 변압기는 탭 조작 수와 STACOM 출력의 최소화를 목적으로 제어된다. 이를 위하여 코호넨 신경회로망은 해당 모선의 유효·무효전력과 STACOM의 출력, 현재의 탭을 근거로 최적의 탭을 제시하며, ULTC 변압기의 제어기는 이와 함께 부하추세를 고려하여 탭의 조작 여부를 결정한다. 원활한 협조제어를 위해서는 제안하는 제어기의 두 제어 파라메타인  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 적절히 선택하여야 하는데, 실험 결과, 정상상태에서는  $\beta$ 를 큰 값으로 하는 것이 바람직하고  $\alpha$ 만으로 스위칭 수와 STACOM 출력간의 상충(trade-off)을 조정할 수 있음을 알았다. 또한, 고장 발생시에는 STACOM의 출력이 급변함으로 인해서 부하변동 추이만으로 탭을 조절하는 것은 고장의 수습을 더디게 하며, 적절한  $\beta$ 를 선택함으로써 원활한 협조제어를 구현할 수 있었다. 결론적으로,  $\alpha$ 는 작은 값으로 하고 적절한  $\beta$ 를 선택함으로써 정상상태와 고장상태 구별 없이 STACOM과 ULTC 변압기의 적절한 협조제어를 구축할 수 있으리라고 본다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소의 주관으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] M. S. Calovic, "Modeling and Analysis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control Systems," IEEE Trans. on PAS, vol.103, no.7, pp.1909-1915, July 1984.
- [2] C. S.chauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. W. Cease, and A. Edris, "Development of a  $\pm 100$  MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems," IEEE Trans. on PWRS, vol.10, no.3, pp.1486-1495, July 1995.
- [3] C. S.chauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemak, L. Gyugyi, T. W. Cease, and A. Edris, "Operation of  $\pm 100$  MVAR TVA STACON," IEEE Trans. on PWRD, vol.12, no.4, pp.1805-1811, October 1997.
- [4] 홍순욱, 차재덕, 이학성, "배전용 FACTS 기기 개발 동향 (2) - DSTACON 설치사례 연구," 대한전기학회지, 제47권 3호, pp.37-42, 1998년 3월.
- [5] 장병훈, 윤용범, "FACTS 계통운용 기술개발," 대한전기학회지, 제47권 3호, pp.5-12, 1998년 3월.
- [6] J. J. Paserba, D. J. Leonard, N. W. Miller, S. T. Naumann, M. G. Lauby, and F. P. Sener, "Coordination of a Distribution Level Continuously Controlled Compensation Device with Existing

Substation Equipment for Long Term VAR Management," IEEE Trans. on PWRD, vol.9, no.2, pp.1034-1040, April 1994.

- [7] 손광명, 전력계통의 전압안정도 개선을 위한 SVC와 ULTC의 효율적 협조제어에 관한 기초연구, 기초전력공학공동연구소, 1998년 9월.
- [8] 김광원, 이흥재, "반복 Condensed Nearest Neighbor 법을 이용한 전력계통의 전압/무효전력 제어," 대한전기학회논문지, 제47권 10호, pp.1576-1582, 1998년 10월.
- [9] M. A. Pai, Computer Techniques in Power system Analysis, pp.208-209, McGraw-Hill Publishing Company, 1979.

## 저 자 소 개

김 광 원 (金 光 源)

전기학회 논문지 제 48A권 7호 참조

Tel : (052) 259-2186

E-mail : gwkim@uou.ulsan.ac.kr

이 흥 재 (李 興 載)

전기학회 논문지 제48A권 6호 참조

Tel : (02) 940-5147

E-mail : hjlee@daisy.kwangwoon.ac.kr