

## 코호넨 신경회로망을 이용한 배전시스템의 전압/무효전력 제어에 관한 연구

김광원, 김종일\*  
울산대학교 전기공학과A Study on the Voltage/Var Control of Distribution System  
Using Kohonen Neural NetworkGwang-Won Kim, Jong-Il Kim\*  
Dept. of Electrical Engineering University of Ulsan

## Abstract

This paper presents a modified Learning Vector Quantization rule to control shunt capacitor banks and feeder voltage regulators in electric distribution systems with Kohonen Neural Network(KNN). The objective of the KNN is on-line decision of the optimal state of shunt capacitor banks and feeder voltage regulators which minimize  $I^2R$  losses of the distribution system while maintaining all the bus voltages within the limits. The KNN is tested on a distribution system with 30 buses, 5 on-off switchable capacitor banks and a nine tap line voltage regulator.

신경회로망의 학습은 nearest neighbor를 찾는데 사용되는 기준벡터(codebook vector)를 생성하는 과정이다. 그 대표적인 학습 방법으로는 Self-Organizing Feature Map(SOFM)과 Learning Vector Quantization(LVQ)을 들 수 있다.

SOFM 학습법과 LVQ 학습법을 비교하면 SOFM 학습법은 올바른 목적값(target value)이 없이 스스로 학습을 하는 'Unsupervised training' 인 반면에 LVQ 학습법은 올바른 목적값을 필요로 하는 'supervised training' 이다. 본 논문에서 SOFM 학습법을 쓴다면 입력의 차원이 높기 때문에 분류가 잘 되지 않으므로 LVQ 학습법이 적당하나 LVQ 또한 분류 대상 그룹수가 많으면 학습이 잘 되지 않으므로 수정된 LVQ 학습법을 도입하였고 타 연구 논문에서 많이 인용한 30모선 배전시스템의 전압/무효전력 제어에 적용하였다.

## 1. 서 론

본 논문에서는 배전시스템 전압제어를 위해 코호넨 신경회로망을 선택하고, 이를 학습하기 위해 수정된 LVQ 학습 알고리즘을 도입하였다.

변전소 및 배전시스템의 전압/무효전력 제어는 보통 병렬 캐패시터와 선로전압조정기(line voltage regulator) 또는 주 변압기의 탭 제어에 의해 수행된다. 이 후 선로전압조정기는 주 변압기를 포함하는 개념으로 받아들여진다. 캐패시터와 선로전압조정기의 상태를 적절히 조절함으로써 전압을 허용 범위 내로 유지하면서도 배전시스템을 경제적으로 운용할 수 있으므로, 기기의 추가적 설치 없이 보다 양질의 전력을 경제적으로 공급하기 위해서는 캐패시터와 선로전압조정기의 상태를 실시간으로 제어할 필요가 있다. 과거에는 해석적 방법, 동적 계획법, 비선형 프로그래밍으로 배전시스템의 전압/무효전력 제어를 수행하였으나, 최적의 해를 결정하는 데는 많은 시간이 소요된다. 따라서 비교적 최근에는 퍼지논리, 유전 알고리즘, 인공 신경회로망 등의 인공지능적 기법을 이용하여 이러한 문제를 해결하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. 특히, 인공 신경회로망을 이용한 방법은 과거의 경험을 바탕으로 현재 배전시스템에 적절한 캐패시터와 선로전압조정기의 상태를 신속히 결정하므로 배전시스템 실시간 전압/무효전력 제어에 적합하다고 할 수 있다. 인공 신경회로망은 최적화 문제에 적합한 Hopfield형, 함수학습에 적합한 Perceptron형, 데이터 양자화에 적합한 Kohonen형 등 다양한 형태가 있으며, 각각의 학습방법 또한 다양하므로 응용분야에 맞는 신경회로망 형태와 학습방법의 선택이 중요하다. 배전시스템의 전압/무효전력 제어는 연속적인 함수를 다루는 문제가 아니며, 단지 현재의 배전시스템의 상태에 따른 캐패시터와 선로전압조정기의 상태 결정 문제이므로, 본 논문에서는 주어진 문제를 패턴분류(classification)의 문제로 보고, 문제의 해결에 Kohonen 신경회로망을 이용하였다. Kohonen 신경회로망을 이용한 패턴 분류는 nearest neighbor를 그 분류 기준으로 하며, Kohonen

## 2. LVQ 학습법

LVQ 학습법은 지도경쟁학습(supervised competitive learning)을 이용한 clustering에 바탕을 둔 선별이론으로 각 노드는 대표값과 클래스를 가지고 있고 그 수는 미리 결정되며 학습절차는 다음과 같다.

절차1: 각 노드는 대표값과 클래스로 구성된 기준벡터로써 임의의 작은 값으로 초기화한다

절차2: 학습 데이터를 입력으로 하여 1을 출력하는 노드(winner)를 결정한다.

절차3: winner 노드가 학습 데이터와 같은 클래스 소속이면 (2-1)을 이용해서, 다른 클래스이면 (2-2)를 이용해서 winner 노드의 기준벡터를 개선한다.

$$m_c(t) = m_c(t+1) + \alpha(t)[x(t) - m_c(t)] \quad (2-1)$$

$$m_c(t) = m_c(t+1) - \alpha(t)[x(t) - m_c(t)] \quad (2-2)$$

위에서,  $m_c(t)$  :  $t$  에서 winner 노드의 기준벡터

$x(t)$  :  $t$  에서 학습 데이터

$\alpha(t)$  :  $t$  에서 학습률(감소 함수)

절차4: 절차 2, 3을 모든 학습데이터에 대해 반복 수행한다.

여기서, 학습률  $\alpha(t)$ 는 선택된 노드들이 현재의 학습 데이터를 어느 정도 기준 벡터에 반영하는가의 척도로써, 초기값은 1에 가까운 수로 하고 선형 또는 비선형 함수를 줄여 나간다.

## 3. 수정된 LVQ 학습법

LVQ 학습법은 분류대상 그룹수가 많으면 winner 노드가 학습데이터와 다른 클래스인 경우는 입력과 떨어져 잘못된 학습이 되어진다. 그래서 다음과 같이 수정된 LVQ 학습법을 도입하였다

절차1: 각 노드는 대표값과 클래스로 구성된 기준벡터로써 임의의 작은 값으로 초기화한다

- 절차2: 학습 데이터를 입력으로 winner 노드를 결정한다.
- 절차3: winner 노드의 기준벡터는 (2-1)에 의해 개선되어지는데 각 winner 노드의 기준벡터 클래스는 기존의 LVQ 학습법과는 달리 각 입력 벡터 클래스가 된다.
- 절차4: 절차 2, 3을 모든 학습데이터에 대해 반복하고 학습률  $\alpha(t)$ 는 점차적으로 작아감으로 하여 미세한 학습을 수행한다.

#### 4. 사례 연구

##### 4.1 문제의 정의

본 사례연구에서 배전계통의 전압/무효전력 제어 목적은 다음과 같다.

$$\arg \min_T \sum_{i=1}^N [|I_i(T)|^2 R_i]$$

단,  $V_i \in (V_{min}, V_{max}), i=1, \dots, N$  (4-1)

여기서,  $M$ 과  $N$ 은 선로와 모선의 개수이고  $T$ 는 캐패시터와 선로전압 조정기의 상태를 나타내는 벡터로, 시간  $t$ 의 부하에 맞는 최적의  $T$ 를 찾는 것이 목적이다. 본 사례연구에서는 문제를 다음과 같이 구체화하였다.

- 조건1: 배전계통의 상태는 배전계통에 설치된 전압, 전력 측정장치로부터 얻는다.
- 조건2: 캐패시터는 하나의 뱅크로만 구성되어 on-off 상태만을 가진다.
- 조건3: 모선 전압의 허용범위는 0.95 ~ 1.05 p.u.이다.
- 조건4: 캐패시터와 선로전압조정기의 용량과 위치는 결정되어 있다.
- 조건5: 전압과 전력의 측정값은 측정과 동시에 전송된다.
- 조건6: 캐패시터와 선로전압조정기의 스위칭 수에는 제한을 두지 않는다.
- 조건7: 각 모선 부하의 시간적 변동비율은 같다.

##### 4.2 코호넨 신경회로망의 구성

Kohonen 신경회로망을 이용하여 배전계통의 전압/무효전력을 제어할 때, 결정하여야 할 사항은 입력변수 종류, 구분대상 클래스 종류, 기준벡터이다. 이 중에서 기준벡터는 수정된 LVQ법에 의해 구성한다.

본 사례연구에서는 각 피터의 부하를 측정하지 않는 경우를 가정하였으므로 배전계통에 설치된 전압, 전력 측정장치 출력, 즉, 전압의 크기와 유효, 무효전력량을 입력 변수로 채택하였다. 다음에 나오는 대상계통을 보면 측정장치가 6곳에 있으므로 본 논문에서 Kohonen신경회로망의 입력은 18차 벡터이다.

한편, 구분대상 클래스는 모든 캐패시터와 선로전압조정기의 조합 상태를 하나의 클래스로 정의하였다. 본 사례연구에서는 on-off 캐패시터가 5곳에 위치하고 하나의 9탭 선로전압조정기가 있으므로 클래스의 수는  $2^5 \times 9 = 288$ 개다.

##### 4.3 대상 계통 및 학습데이터 생성

본 사례연구에서는 제시한 방법을 타 논문에서 빈번히 인용되었던 배전계통의 전압/무효전력제어에 적용하였다. 그림 4-1은 적용대상 23kV 배전계통으로 방사상의 30모선으로 구성되어 있고, 선로 및 부하데이터는 값이 주어진다. 대상 배전계통에는 13, 15, 19, 23, 25번 모선에 각각 800, 1000, 400, 1600, 2000(kVar)의 on-off 조작만이 가능한 전력용 캐패시터가 설치되어 있

고 ( $C_{13}, C_{15}, C_{19}, C_{23}, C_{25}$ ) 9개의 등간격 탭으로 변압비를 1 ~ 1.1 범위내에서 조절 가능한 선로 전압조정기가 모선 4, 5번 모선 사이에 설치되어 있다. 0(변전소)-1, 3-4, 7-8, 8-9, 18-19, 3-22 모선 사이 6곳에는 전압, 전력 측정기가 설치 되어있다.

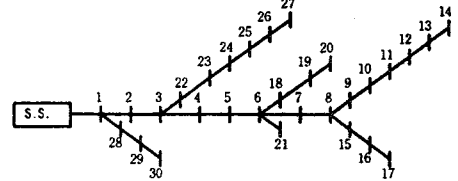


그림 4-1 23kV 배전계통

본 사례연구에서는 Kohonen 신경회로망의 전압/무효전력 제어를 KNN 제어기라 명명하고 다음과 같은 조건하에 KNN 제어기를 학습하였다.

- 조건1: 변전소 모선의 전압을 1.0 p.u.로 고정한다.
- 조건2: 각 모선 부하는 최대 부하량의 20 ~ 100(%) 내에서 동일하게 변동한다.

본 사례연구의 Kohonen 신경회로망은 18개의 입력을 받으며 학습데이터는 다음의 절차로 생성하였다.

- 절차1: 현재의 부하수준을 0.2 ~ 1.0 사이에서 가정한다
- 절차2: 가정된 부하수준으로 캐패시터와 선로전압조정기의 288가지 상태에 대해 조류계산을 수행한다.
- 절차3: 과정 2의 결과로부터 최적의 조합을 찾는다.

한편, 동일한 부하수준에 대해서도 현재의 캐패시터/선로전압조정기 상태에 따라 Kohonen 신경회로망의 입력값이 상이하므로, 위의 과정에 의해 각 부하수준마다 288개의 학습데이터 쌍을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 161가지의 부하수준을 0.2 ~ 1.0사이에서 등간격으로 설정하여 모두 46368개의 학습데이터를 얻었으며, 이를 대상으로 수정된 LVQ 학습법을 이용하여 5796, 11592, 15456개의 기준벡터를 얻었다.

##### 4.4 전압/무효전력 제어 결과

위에서 얻은 기준벡터의 수와 각 기준벡터로 구성된 KNN 제어기의 성능 평가를 위해 0.2 ~ 1.0사이에서 단수를 100개 발생하여 부하수준으로 하고, 각 경우마다 캐패시터/선로전압조정기의 최적상태를 구하여 100개의 실험데이터를 생성하였다. 이러한 실험데이터를 KNN 제어기에 적용한 결과 표 4-1와 같은 결과를 얻었다.

표 4-1 KNN 제어기의 성능평가 결과

	최적의 14번 모선 전압	KNN 제어기의 14번 모선 전압		
		기준벡터(5796)	기준벡터(11592)	기준벡터(15456)
평균	0.955292	0.958158	0.958347	0.956872
최대값	0.973060	0.978990	0.978980	0.976090
최소값	0.950020	0.933850	0.941970	0.931490
표준편차	0.006025	0.009689	0.008694	0.007960
14번 모선 전압 0.95 이하인 수	0	19	12	13
오분류 수	0	62	55	45

대상 배전계통에서 그 특성상 14번 모선의 전압이 가장 낮으므로 표 4-1에서는 14번 모선에 대한 최적의 전압과 기준벡터 수가 5796, 11592, 15456 일 때 전압을 비교하고 있는데 위로부터 최대, 최소값은 차이가 있지만 평균과 표준편차에 대해서는 거의 비슷한 수준이며 기준 벡터수가 15456인 KNN 제어기가 가장 근사 최적해를 보장한다고 할 수 있다. 다음으로, 일간부하변동 곡선이 sine파 형태로 변동한다고 보고 전압/무효전력

제어에 KNN 제어를 적용하였다. 그림 4-2는 캐패시터와 선로전압조기의 상태를 고정하고 전압/무효전력 제어를 하지 않은 경우의 전압변동곡선이고, 그림 4-3은 매시간마다 KNN 제어기로 제어한 경우의 전압변동곡선이다.

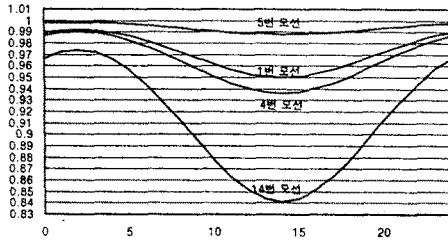


그림 4-2 일간 전압변동곡선 1

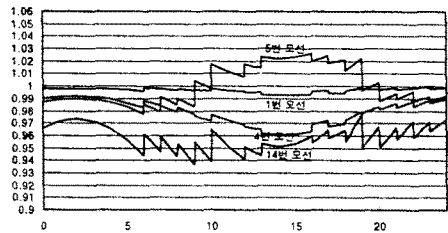


그림 4-3 일간 전압변동곡선 2

그림 4-3에는 매시간에 따른 1번, 4번, 5번, 14번 모선의 전압변동이 나타나 있는데, 5번 모선과 14번 모선의 전압이 각각 본 배전계통에서 최대, 최저이므로 두 모선의 전압을 0.95 ~ 1.05 p.u.내에 유지시키면 타 모선의 전압 또한 전압조건을 만족했다고 볼 수 있다. 그림 4-3을 보면, 14시 이전에는 부하가 증가하고 있어 제어를 하지 않으면 14번 모선 전압이 전압조건에 위배되는 경우가 있는데, 매시간마다 제어를 하면 5번, 14번 모선 전압이 전압조건에 위배되지 않게 하고 있으며 14시 이후에는 부하가 감소하여 전압조건에는 위배되지 않으나 전력의 손실이 크므로 매시간 제어를 하여 전압조건에 위배되지 않게 전압을 낮추고 있어 적당한 제어가 되었다. 그러나 KNN 제어기가 근사 최적 제어를 하는 경우, 여유를 두기 위해 모선 전압 조건을 0.96 ~ 1.05 p.u.로 변경한 후 KNN 제어기를 학습하였다. 이 경우에도 앞서와 같은 방법으로 46368개의 학습데이터를 수집하였으며, 수정된 LVQ법으로 15456개의 기준벡터를 학습하였다

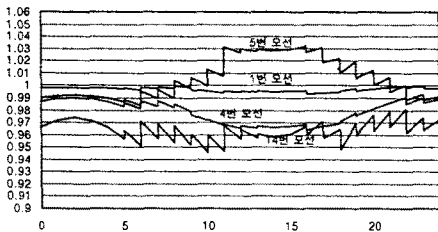


그림 4-4 일간 전압변동곡선 3

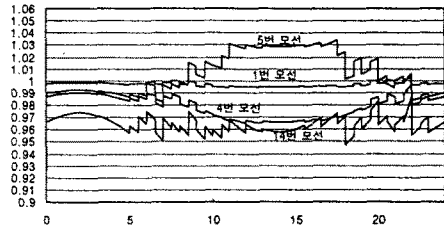


그림 4-5 일간 전압변동곡선 4

그림 4-4는 학습시 모선의 전압 조건을 0.96 ~ 1.05 p.u.로 변경하여 15456개의 기준벡터로 학습하여 이루어진 KNN 제어기로 매시간 전압/무효전력을 제어한 결과이며, 그림 4-3과 비교할 때, 14시 이전의 전압조건 위배 정도가 감소하였음을 알 수 있다. 그림 4-5는 동일 제어기로 매 30분마다 전압/무효전력을 제어한 결과로써 전압조건 위배가 더욱 감소하였다. 이는, 제어 시점사이의 부하변동 폭이 적기 때문이다. 그러나 여기서 고려할 사항은 제어기의 제어시간을 짧게 하면 더 좋은 결과가 나올 수 있으나 스위칭의 수가 많을수록 캐패시터의 수명과 surge 발생에 밀접한 관계가 있으므로 적당한 간격으로 제어해야 된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 배전계통의 실시간 대상 전압/무효전력 제어를 위하여 인공 신경 회로망을 도입하였으며 본문을 패턴구분의 문제로 보고 Kohonen 신경회로망을 이용하였다.

Kohonen 신경 회로망의 대표적인 학습법 중에서 SOFM은 'unsupervised training' 이므로 입력의 차원이 크면 분류가 잘 되지 않고 LVQ는 'supervised training' 이지만 대상 그룹수가 많아 버리면 학습이 잘 되지 않으므로 본 논문에서는 수정된 LVQ 학습법을 이용하여 기준벡터를 선별하였다. 그리고 타 논문에서 인용한 30모선의 배전계통 전압/무효전력 제어에 KNN 제어기를 적용하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] M.Kaplan, "Optimization of Number, Location, Size, Control Type and Control Setting of Shunt Capacitors on Radial Distribution Feeders", *IEEE Trans. on PAS*, vol.103, no.9, pp.2659-2665, September 1984.
- [2] S.Civanlar and J.J.Grainger, "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators : Part I, II, and III", *IEEE Trans. on PAS*, vol.104, no.11, pp.3278-3297, November 1985.
- [3] Z. Gu and D. T. Rizy, "Neural Networks for combined Control of Capacitor Banks and Voltage Regulators in Distribution Systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol.11, no.4, pp.1921-1928, October 1996.
- [4] G.W.Kim, H.S.Cho, J.O.Park, "Voltage/Var Control on Distribution Kohonen Neural Network", *ICEE*, vol.1, pp.934-937, July 1998.
- [5] W. Poehmueller, M. Glensner, and H. Juergs, "Is LVQ Really Good for Classification? - An Interesting Alternatives", in *Proc. Int. Conf. Artificial Neural Networks*, vol.3, pp.1207-1212, 1993.