

# ULTC의 협조제어

論 文

52A-9-3

## Coordinated Control of the Under Load Tap Changer

李 松 根\*  
(Song-Keun Lee)

**Abstract** - The target of the ULTC(Under Load Tap Changer) control purpose is to minimize the operation number of the tap of the ULTC doing the error voltage which is the difference between the measured bus voltage and the reference bus voltage of the receiving end becomes less than the tolerance limits. The existing ULTC control method controls each ULTC considering only its bus voltage of the receiving end. However, this method did not consider the coordinated control of the ULTCs of the system. In this paper, I proposed a coordinated control of the ULTC in the loop power system using the Jacobian matrix. To show the validity of the proposed method, I made simulations for three cases: no action of the ULTC, the control of the ULTC by the existing control method, and the control of the ULTC by the coordinated control among the ULTCs of the system. The simulation result shows that the proposed method has more improvement of the operation of the ULTC than other methods.

**Key Words** : ULTC, Coordinated Control, Reactive power compensator

### 1. 서 론

급속한 산업의 발전과 생활 수준 향상에 힘입어 전력 수요가 크게 증가하고 있다. 또한 전기 응용기기, 컴퓨터설비, 가정용 전기, 전자 제품 등이 널리 보급되어 일상 생활에서 전기 의존도가 점점 높아져서 양질의 전력을 수용자에게 공급할 필요성이 갈수록 증대하고 있다.

전력 계통은 원거리의 발전기와 수많은 수용가를 연결시키기 위하여 각종 송전선로와 배전선로로 구성되어 있으며 또한, 여러 가지 송배전 전압 계급으로 이루어진다. 그리고, 어떤 곳에서도 전압의 변경이 필요한 곳이면 변압기가 설치되어야 한다.

변압기에는 시시각각 변동하는 전압을 제어하기 위하여 변압기의 비율을 제어할 수 있는 탭이 구비되어 있다. 부하시 탭절환기(ULTC)는 동작속도가 느리고, 불연속적인 계단식 제어시스템이다. 탭동작시 전압변동이 발생하고 전기적인 과도현상으로 기계적인 접점이 마모된다. 그러므로 과도한 탭 동작은 기기의 수명을 단축시킬 뿐 아니라 변압기의 고장을 유발하여 광역 정전을 일으킬 수 있다. 따라서, 전압 품질을 만족하는 범위 안에서 탭의 동작 횟수를 최소한으로 하는 것이 ULTC의 제어 목표라고 할 수 있다. 특정한 조건에서 ULTC는 역동작을 일으켜 전압붕괴를 촉진시킬 수 있으므로 ULTC는 적절히 제어되어야 한다.

Calvic[1]은 부하시 탭 절환기 변압기에 의해 제어되는 동적인 전압 모델을 구하였고 Medanic[2]은 Calvic의 모델을

이용하여 계통의 안정성을 연구하였다. Yorino[4]는 Medanic[2]에서 이용한 리아푸노프 정리를 사용하여 상호간섭 현상을 피할 수 있는 불감대의 영역을 구하였다. 김홍균[4]은 루프 계통에서의 부하시 탭 절환기간의 상호 동작 협조 부족에 의하여 발생하는 진동 현상을 계통내의 탭 절환기들이 동시에 동작하는 것은 무시하고 상위측과 하위측 이 동작될 때에 대하여만 해석하였다.

루프 전력 계통은 비선형 특성을 가지고 ULTC는 이산적인 특성을 가진다. 이 논문에서는 효율적인 ULTC의 협조제어를 위하여 모든 변압기들과 계통의 상태 그리고 전력 방정식을 이용하여 변압기들의 탭 크기를 결정하였다.

제한한 방법을 3기 11모선 망 계통에 적용하여 그 유용성을 입증하였다.

### 2. ULTC 제어특성 및 모델[1,4,5]

일반적인 ULTC 변압기는 탭절환 장치를 가진 변압기, 모터구동요소, 선로전압강하 보상기를 포함하는 자동 전압조정기, 측정용 전압·전류 변성기(CT, PT)로 구성된다. 탭절환 장치와 모터 구동장치는 한 스텝씩 동작하는 구조이고 동작시간은 10초 이내이다. 자동전압 조정기의 입력요소는 불감대와 지연시간으로 구성된다. 각 요소는 조정 가능한데 불감대의 조정점위는 0.6~6%이고, 지연시간의 조정범위는 10~180초인데 이것은 순시 전압 변동에 의한 빈번한 탭절환을 방지하기 위한 목적으로 사용된다. 선로 전압 강하 보상기는 부하 변동에 따른 기준 전압을 보상하기 위하여 사용된다. 측정용 변압기(PT)와 변류기(CT)는 고전압, 대전류를 저전압, 소전류로 바꾸어 준다. ULTC변압기의 동작원리는 그림 1과 같이 측정된 모선 전압(V)과 기준 모선 전압( $V_r$ )의 차인 전압 편차가 불감대 경계값보다 크면 카운터가

\* 正 會 員 : 全州大學 工學部 助敎授 · 工博  
接受日字 : 2002年 12月 16日  
最終完了 : 2003年 7月 23日

작동하기 시작한다. 지연시간 이내에 전압편차가 불감대 경계값보다 작아지면 카운터를 영으로 복원하고 지연시간 이상 전압 편차가 경계값 이상으로 지속되면 탭은 동작하고 카운터는 다시 영으로 하여 다음 동작을 준비한다.

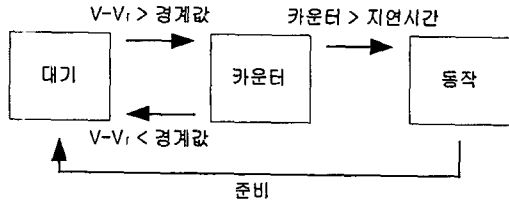


그림 1 ULTC의 동작 방법  
Fig. 1 Operation method of the ULTC

3. 제안한 시스템

계통에 설치되어있는 ULTC는 그림 2와 같이 표현할 수 있다. 이 모델을  $\Pi$ 등가 회로로 표현하면 그림 3과 같이 된다.

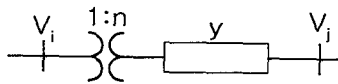


그림 2 ULTC 모델  
Fig. 2 ULTC model

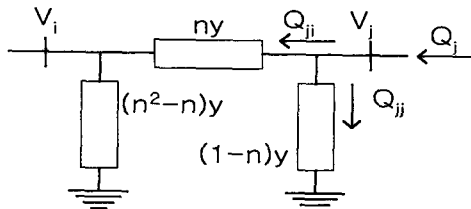


그림 3  $\Pi$ 등가 모델  
Fig. 3  $\Pi$  Equivalent circuit model of ULTC

ULTC가 동작되기 전에 계통의 상태에 따라 결정된 변압기 모선의 전압이 그림 3과 같이  $V_i, V_j$ 라고 가정한다. 변압기의 탭을 움직이는 목적은 계통의 무효 전력의 흐름을 변화시켜서 계통의 전압을 제어하는데 있다. 변압기 설치 모선의 전압이 기준 전압  $V_{iref}, V_{jref}$ 가 되도록 변압기 탭을 조정하는 과정은 다음과 같다.

변압기가 설치된 모선에서 부하단 측의 모선인  $j$ 모선에서 발생하는 무효 전력은 (1)과 같다.

$$Q_j = Q_{ji} + Q_{j\bar{j}} \quad (1)$$

식(1)을 변압기 설치 모선의 양단 전압과 어드미턴스로 표현하면 (2)와 같이진다.

$$Q_j = ny^* V_i^2 - ny^* (V_j V_i^* + V_i V_j^*) + y^* V_j^2 \quad (2)$$

여기서 위첨자 \* 는 공액복소수

$y$  : 모선  $i$ 와  $j$ 사이의 어드미턴스

$n$  : 변압기 탭

$i, j$ 모선의 전압이 기준 전압이었을 경우에  $j$ 모선에서 발생하는 무효 전력의 양은 (3)과 같이 진다.

$$Q_{jref} = n_{new} y^* [V_{iref}^2 - (V_{jref} V_{iref}^* + V_{iref} V_{jref}^*)] + y^* V_{iref}^2 \quad (3)$$

여기서 아래첨자  $ref$ 는 기준을 의미

$n_{new}$  : 새로운 탭값

그리고  $F_j = y^* [V_{iref}^2 - (V_{jref} V_{iref}^* + V_{iref} V_{jref}^*)]$ 라고 하면 (3)은 (4)와 같이 표현된다.

$$Q_{jref} = n_{new} F_j + y^* V_{iref}^2 \quad (4)$$

한편, 전력 방정식은 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (5)$$

계통이 수렴되어 있는 상태에서 ULTC의 변압기 탭만을 변화시키는 과정이므로 계통의 다른 요소들은 변하지 않는다고 가정한다. 그러면, 계통의 각 모선의 유효 전력과 위상 각이 변하지 않으므로 전력 방정식은 (6)과 같아진다.

$$[\Delta Q] = [J_{22}] \times [\Delta V] \quad (6)$$

식(6)으로부터 계통의 모선 전압이 변화됨으로써 계통의 무효전력의 흐름을 바꿀 수 있는 것처럼 역으로 계통의 무효전력의 흐름을 변화시킴으로써 모선의 전압을 바꿀 수 있는 것이다.

탭을 변화시켜서 보상하려는 전압의 크기는 각 모선의 전압을 기준전압으로 맞추는 것이 아니라 각 모선의 전압이 불감대의 경계값내에 위치하도록만 보상하는 것이다. 그러므로 보상되는 전압  $[\Delta V]$ 는 (7)과 같아진다.

$$\Delta V = \begin{cases} V_{ref} - V - DB & \text{if } V_{ref} - V > DB \\ V_{ref} - V + DB & \text{if } V_{ref} - V < (-DB) \end{cases} \quad (7)$$

여기서 DB는 변압기의 불감대의 크기

$V_{ref}$  : 모선의 기준 전압이고

$V$  : 모선의 실제 전압이다.

무효 전력의 흐름을 변화시켜서 모선의 전압을 허용 범위 내로 끌어들이는데 필요한 변압기 탭의 변화량은 다음과 같이 구할 수 있다.

원하는 무효 전력의 변화량은  $[\Delta Q] = [Q_{jref} - Q_j]$ 이므로 이를 (6)에 대입하면

$$[Q_{jref} - Q_j] = [J_{22}] \times [\Delta V] \quad (8)$$

(2)와 (3)을 (8)에 대입하고  $n_{new}$ 에 대하여 식을 풀어보면

$$[n_{new} F_j] = [J_{22}] \times [\Delta V] + [Q_j] - [y^* V_{iref}^2] \quad (9)$$

여기서  $[M] = [J_{22}] \times [\Delta V] + [Q] - [y^* V_{ref}^2]$  이라고 하면

$$[n_{new} F_i] = [M] \quad (10)$$

식(10)으로부터  $k$  변압기의 새로운 탭은 (11)으로 얻을 수 있다.

$$[n_{new k}] = \frac{[M_k]}{[F_{ik}]} \quad (11)$$

여기서  $k$ 는 변압기가 설치된 모선을 나타낸다.

#### 4. 제안한 시스템의 순서도

제안한 시스템의 전체적인 순서도는 다음 그림 4와 같다.

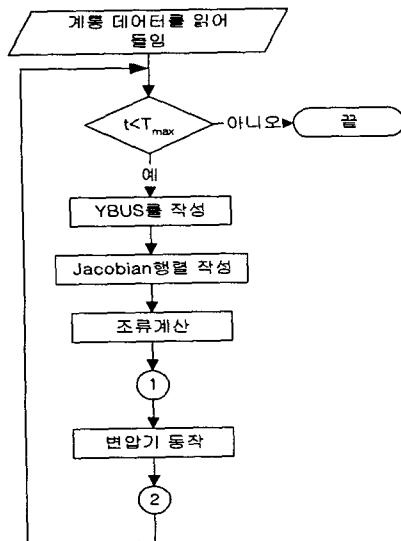


그림 4 제안한 시스템의 순서도  
Fig. 4 Flowchart of the proposed system

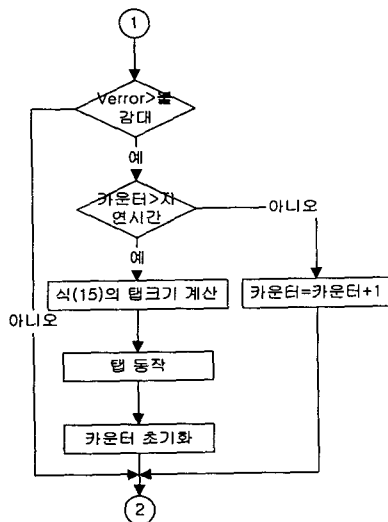


그림 5 변압기 탭 동작 방법  
Fig. 5 ULTC Tap operation method

제안한 시스템이 기존의 시스템과의 차이점은 기존에는 그림 1에서와 같이 각각의 변압기가 독립적으로 자기 자신의 모선 전압이 경계값을 벗어나고 벗어난 시간이 지연시간을 넘게되면 독립적으로 탭이 동작하던 방법에서 새로이 제안하는 방법은 계통의 변압기들 중에서 어느 하나라도 전압이 경계값을 벗어나고 벗어나 있는 시간이 지연시간을 초과하면 (11)을 통하여 계통 전체의 변압기의 탭들의 값을 새로이 정하는 것이다.

#### 5. 사례연구

제안한 시스템의 유용성을 보이기 위하여 Anderson[6]의 9모선 계통을 이용하였다. 9모선 계통에는 탭 절환기가 3기가 설치되어 있는 것을 그림 6과 같이 6번과 8번 모선에 배전용 탭 절환기 2기를 추가하였다. 쉽게 표현하기 위하여 각 변압기에 다음과 같이 번호를 붙였다.

변압기들의 번호는 다음과 같다.

- 변압기1 : 모선1과 모선4사이
- 변압기2 : 모선2과 모선7사이
- 변압기3 : 모선3과 모선9사이
- 변압기4 : 모선6과 모선10사이
- 변압기5 : 모선8과 모선11사이

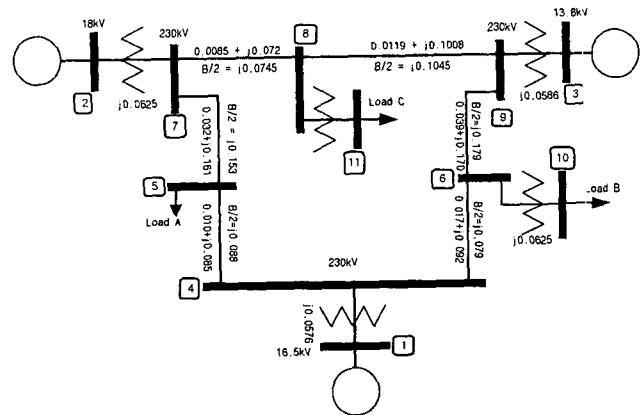


그림 6 11모선 계통도  
Fig. 6 11 Bus Power system

표 1 유효전력과 무효전력량  
Table 1 Real and Reactive Power

모선번호	유효전력(p.u)	무효전력(p.u)	
		최대값	최소값
2	1.63	0.5	-0.3
3	0.85	0.5	-0.3
5	-1.25	-0.5	

계통 선로들의 저항, 임피던스 그리고 선로 충전용량은 그림 6에 나타나 있다. 모의 실험에서 1번 모선을 슬랫 모

선으로 선택하였다. 2번과 3번 발전기에서 발전하는 유효전력량과 발전 가능한 무효전력량의 최대, 최소 값과 5번 모선의 부하량은 표 1에 나타나 있다.

각 모선의 기준 전압은 표2에 나타나 있다. 각 모선의 기준 전압은 변압기 동작의 기준이 되기 때문에 중요한 역할을 한다 모의 실험에서는 Anderson[6]의 9모선 계통의 결과 전압의  $\pm 0.5\%$  범위 내에서 기준 전압으로 정하였고 추가되는 두 모선(10번 모선과 11번 모선)의 기준 전압은 1.0으로 하였다.

표 2 각 모선의 기준전압  
Table 2 Reference Bus Voltage

모선번호	기준전압(p.u.)
1	1.040
2	1.025
3	1.025
4	1.027
5	1.000
6	1.013
7	1.026
8	1.016
9	1.032
10	1.000
11	1.000

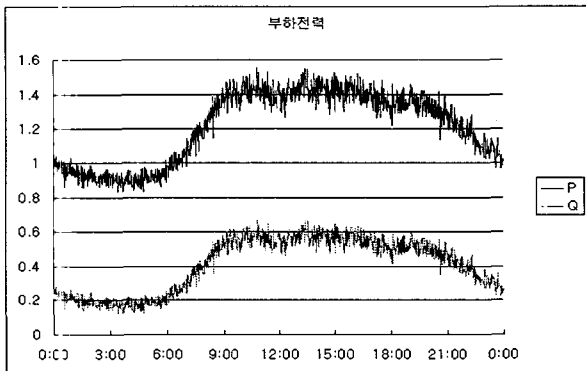


그림 7 부하 전력량  
Fig. 7 Load Power

10번 모선과 11번 모선의 부하 전력량은 그림 7과 같이 주어졌다. 부하 데이터는 하루동안의 전력량을 10초 단위로 각 모선의 전력량을 읽어 각 시간에 대한 변압기의 동작을 관찰하였다. 그러므로 총 8640개  $\times$  11모선의 유효 전력량과 무효 전력량을 읽어 들어서 조류계산을 실행하고 그 결과를 기준으로 변압기 동작을 판단하게 된다.

모의 실험의 목적은 5기의 탭 절환기를 제어하여 계통의 전압 품질을 향상시키면서 탭절환기의 동작횟수를 줄이는데 있다.

모의 실험에서 모든 변압기들은 0.9~1.1p.u.까지 동작을 하며, 변압기 탭은 32단계로 각 탭의 크기는 0.00625p.u.을 갖는다.

비교 분석을 위하여 3가지의 모의 실험을 행하였다.

- ① 변압기들이 동작하지 않은 경우,
- ② 변압기들이 지역적인 정보만으로 동작한 경우(기존의 방법으로 변압기가 동작될 때)와
- ③ 제안한 시스템으로 변압기들이 협조제어하여 동작된 경우에 대하여 알아보았다.

모의 실험의 결과는 다음 그림8-18에 나타나 있다.

그림8은 6번 모선의 전압을, 그림 9는 11번 모선의 전압을 나타낸 것이다. 6번 모선의 기준 전압은 1.013이고 11번 모선의 기준 전압은 1.0이다. 그림 8과 9에서 나타나 있듯이 제어를 안 하였을 때보다 기존의 방법과 새로이 제안한 방법 모두 전압이 기준 전압에 근접한 것을 볼 수 있다. 자세한 비교 분석을 위하여 그림 10과 11처럼 전압의 평균값과 표준편차를 사용하였다.

그림에서 사용한 범례는 다음과 같다.

NoControl은 ULTC를 제어하지 않았을 때, TransOnly나 Trans는 기존의 방법으로 ULTC를 제어하였을 경우이고 New는 새로이 제안한 협조제어 방법으로 ULTC를 제어한 경우이다.

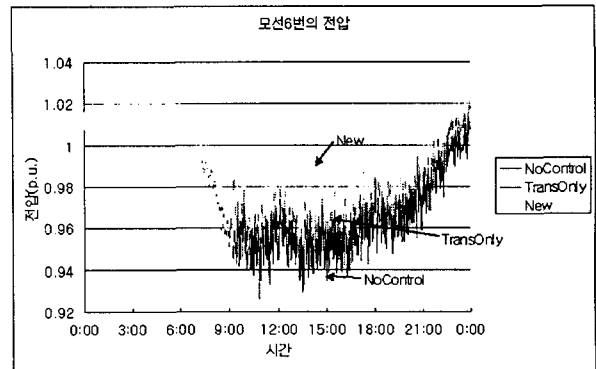


그림 8 6번 모선 전압  
Fig. 8 Bus6 : bus voltage

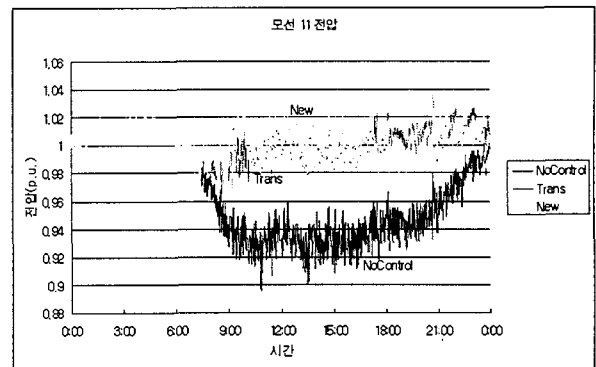


그림 9 11번 모선 전압  
Fig. 9 Bus11 : bus voltage

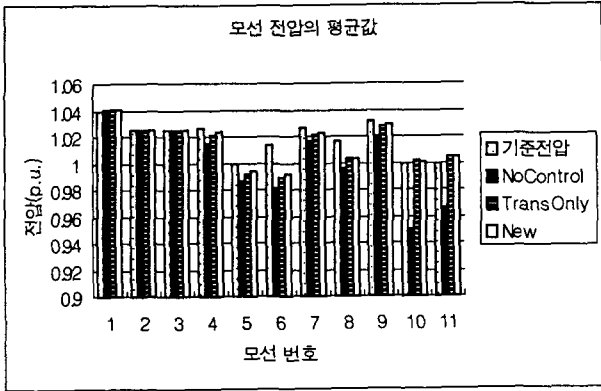


그림 10 모선전압의 평균값  
Fig. 10 Average value of the bus voltage

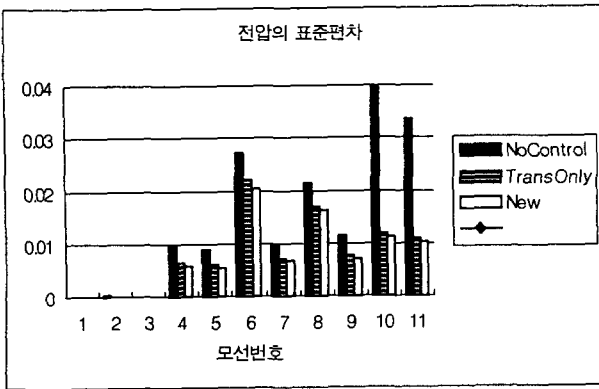


그림 11 모선전압의 표준편차  
Fig. 11 Standard deviation of the bus voltage

그림에서 보듯이 새로운 방법이 기존의 방법보다 기준 전압에 근접하고 표준 편차도 더 작은 것을 알 수 있다. 그림 12-17에서는 변압기들의 탭의 동작에 대하여 분석하였다.

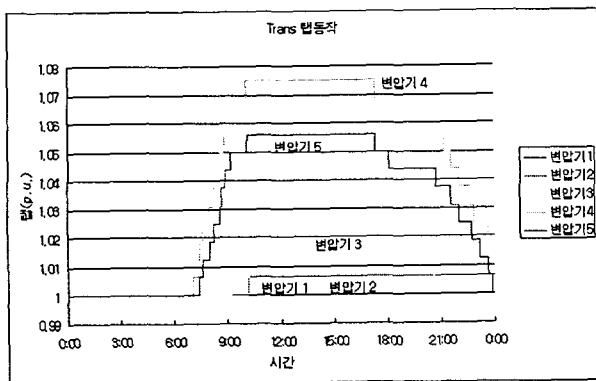


그림 12 탭동작 : 기존의 방법으로 제어하였을 때  
Fig. 12 Tap operation : existing control mode

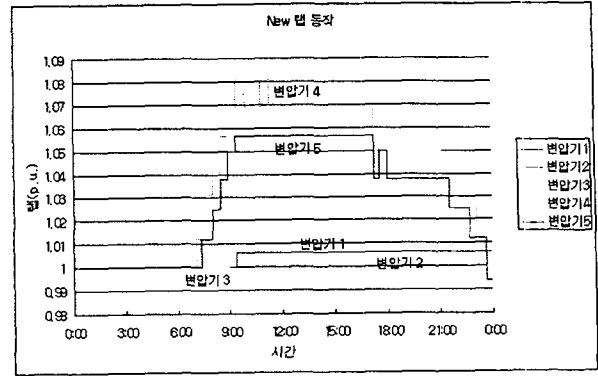


그림 13 탭 동작 : 새로운 방법으로 제어하였을 때  
Fig. 13 Tap operation : New control mode

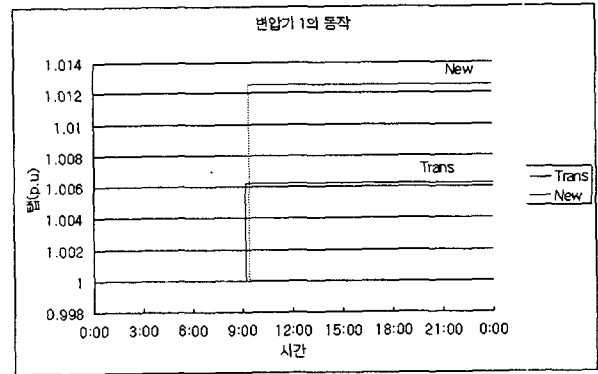


그림 14 변압기 1의 동작  
Fig. 14 Operation of the ULTC #1

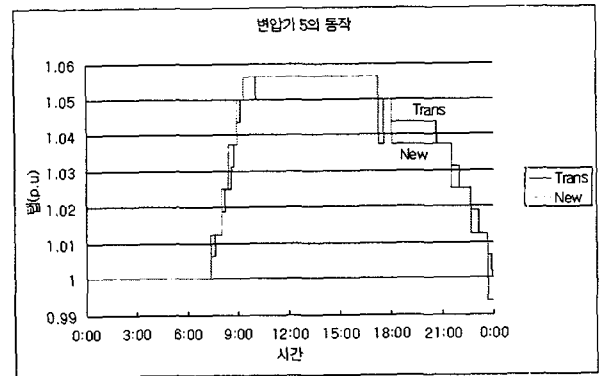


그림 15 변압기 5의 동작  
Fig. 15 Operation of the ULTC #5

변압기5의 동작을 살펴보면 두 방법 모두 같은 경향으로 움직이는 것을 볼 수 있다. 그러나 동작된 시간과 횟수에서 조금 차이가 남을 알 수 있다.

새로이 제시된 협조 제어 방법에서는 1번 변압기가 기존의 방법에 비해 탭이 높음을 알 수 있다. 이는 새로이 제시된 방법은 전체적인 계통의 전압을 기준 전압으로 유지하는데 발전단에서부터 보상을 하는 것을 알 수 있다.

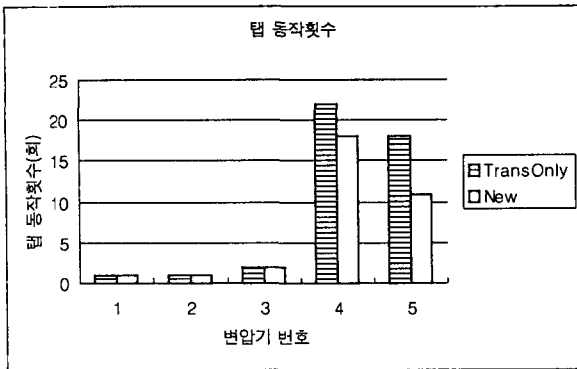


그림 16 탭의 동작횟수  
Fig. 16 Tap operation times

그림 16는 각각의 방법으로 동작하였을 때의 탭 동작 횟수를 나타내고 있다.

탭 동작 횟수는 새로운 방법에서 탭 동작이 적은 것을 볼 수 있다. 기존의 방법에 비해 새로이 제시된 방법이 변압기 1, 2, 3에서는 탭 동작 시간은 차이가 있으나 동작 횟수에 변함이 없다. 변압기 4와 변압기 5에서는 기존의 방법으로 제어한 경우보다 각각 18%와 39%의 탭 동작 횟수의 감소가 있었다.

코의 실험은 Pentium4, 1.48GHz, 128MB Ram에 OS는 Windows XP상에서 실행하였다. 그림 17은 11모선 계통을 하루에 대하여 모의 실험을 하였을 때에 걸리는 시간을 나타낸다. 제어를 안 하였을 때가 가장 빠르고 다음으로 새로이 제안한 협조제어 방법 그리고 마지막으로 기존의 방법임을 알 수 있다.

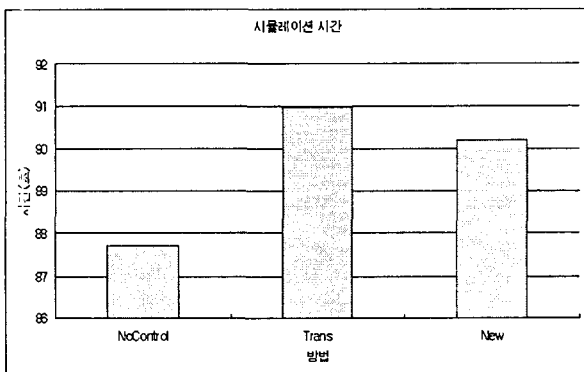


그림 17 모의 실험의 계산 시간  
Fig. 17 Simulation time

### 6. 결 론

변압기들은 지역적인 정보만으로 동작되고 있다. 그리고, 하위 변압기의 동작은 상위 변압기의 동작에 거의 영향을 미치지 못한다. 그러나 역으로 상위 변압기의 동작은 하위 변압기들에 많은 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 그러므로 상위 변압기와 하위 변압기들을 적절히 협조제어를 할 경우 하위 변압기들의 동작횟수를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

이러한 사실을 바탕으로 지역적으로 변압기 설치 모선의 전압이 허용 범위를 벗어난 변압기만을 동작하지 않고 전 계통의 상황을 고려하여 전 계통의 변압기들을 협조 제어함으로써 계통의 전압을 기존의 방법보다 기존 전압에 더 근접하였으며 또한 변압기들의 탭 동작이 줄어들었음을 모의 실험을 통하여 증명하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] M.S. Calovic, "Modeling and analysis of under - load tap changing transformer control system" IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, Vol. Pas-103, No. 7, July 1984, pp. 1909-1915.
- [2] M. Larsson and D. Karlsson, "Coordinated control of cascaded tap changers in a radial distribution network," Proc. of IEEE/KTH Stockholm Power Tech. Conf., Sweden, June 1995, pp. 686-691.
- [3] N. Yorino, M.Danyoshi and M. Kitagawa, "Interaction among multiple controls in tap change under load transformers," Proc. of IEEE/PES winter meeting, Jan. 1996, 96 WM 310-3 PWRs.
- [4] 김홍균, "다중 부하시 탭 절환기의 협조 제어," 서울대학교 대학원 석사학위논문, 1997.
- [5] 문경섭, "전압안정도를 고려한 SVC와 ULTC의 협조제어," 서울대학교 대학원 석사학위논문, 1998
- [6] Paul M. Anderson, "Power System Control and Stability", IEEE Pres, 1977

### 저 자 소 개



#### 이 송 근(李松根)

1987년 상파울로 대학교 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 전주대학교 공학부 조교수

Tel : 063-220-2723, Fax : 063-220-2056  
E-mail : songklee@jeonju.ac.kr