

커패시터의 최적 스케줄링을 고려한 ULTC의 협조 제어

論 文
55A-6-4

Coordinated Control of ULTC Considering the Optimal Operation Schedule of Capacitors

朴鍾泳* · 南淳烈† · 朴鍾根**
(Jong-Young Park · Soon-Ryul Nam · Jong-Keun Park)

Abstract - This paper proposes a coordinated control method for under-load tap changers (ULTCs) with shunt capacitors to reduce the operation numbers of both devices. The proposed method consists of two stages. In the first stage, the dispatch schedule is determined using a genetic algorithm with forecasted loads to reduce the power loss and to improve the voltage profile during a day. In the second stage, each capacitor operates according to this dispatch schedule and the ULTCs are controlled in real time with the modified reference voltages considering the dispatch schedule of the capacitors. The performance of the method is evaluated for the modified IEEE 14-bus system. Simulation results show that the proposed method performs better than a conventional control method.

Key Words : Capacitor, Coordinated Voltage Control, Genetic Algorithm, Multi-Stage Voltage Control, Under-Load Tap Changer

1. 서 론

전력계통 운전에서 효율적인 전압/무효전력 제어를 통해 전력 손실을 줄이고 전압 품질을 높일 수 있다. 일반적인 전압제어는 기기가 설치된 지점의 전압만을 기준으로 동작하기 때문에 앞서 말한 효율적인 운전을 위해서는, ULTC (under-load tap changer)나 분로 커패시터(shunt capacitor) 등의 전압제어기들을 협조 제어하는 것이 필요하다.

일반적으로 전압 제어는 1차, 2차, 3차의 3단계로 구분한다[1]. 1차 제어는 발전기에 설치된 AVR (automatic voltage regulator)로 대표되는 전압제어인데, 수 초의 범위에서 매우 빠르게 동작한다. 2차 제어는 지역적인 전력계통의 전압을 유지하는 목적으로 이루어지며, ULTC나 커패시터, 동기조상기 등의 전압제어기들을 통해 이루어지게 된다. 2차 제어는 보통 수 초에서 수 분 사이의 동작 속도를 가지게 된다. 3차 제어는 2차 제어가 이루어진 상태에서 안전도나 경제성을 고려하여 계통의 전압을 제어하는 것을 말하며 1차, 2차에 이용되지 않은 기기들을 통해 이루어지게 된다.

지금까지 하루 동안의 2차 제어에 필요한 최적해를 찾기 위하여 여러 가지 알고리즘들이 제시되어 왔다[2-9]. 배전계통의 피더(feeder)에 설치된 커패시터의 제어를 위해 다이내믹 프로그래밍(dynamic programming)이 이용되거나[2],

변전소에서의 최적 전압 제어 방법이 제시되었다[3]. 논문[4]에서는 계산량을 줄이기 위해 최적화 문제를 변전소 레벨과 피더 레벨의 두 개의 문제로 분리하여 다이내믹 프로그래밍과 퍼지로지(fuzzy logic) 알고리즘을 이용하였다. 논문[5]에서는 퍼지집합이론을 이용해 다목적 최적 스케줄링 문제(multi-objective optimal scheduling procedure)를 풀어서 AVR의 정정치와 커패시터의 운전을 정하였으나, ULTC는 고려되지 않았다. 논문[6], [7]에서는 ULTC가 고려되지 않은 커패시터의 운전에서 뉴럴 이론이 이용되었고, 논문[8]에서는 커패시터와 ULTC를 동시에 고려하였다. 논문[9]에서는 유전자 알고리즘(genetic algorithm, GA)을 이용한 시간 구간 방법(time-interval base control method)이 제시되었다.

ULTC와 다른 전압제어기들의 협조 제어방법에 대한 논문들은 다음과 같다[10-14]. ULTC의 불필요한 탭 동작은 변압기의 수명을 짧게 하고 전력계통에 과도현상을 유발하기 때문에, ULTC 협조제어의 목적은 일반적으로 적은 동작 횟수 내에서 원하는 제어 목적을 이루는 것이다. 논문[10]에서는 앞에서 말한 3단계의 전압제어를 기반으로 AVR과 ULTC를 포함한 무효전력제어기들의 제어 방법을 제시하고 있다. 논문[11]에서는 ULTC와 STATCOM (static compensator)의 협조 제어를 제시하고 있는데, STATCOM의 출력을 기반으로 ULTC를 제어하고 있다. 논문[12]에서는 배전계통에서 SVC(static VAR compensator)와 ULTC의 협조제어를 통해, SVC의 운전 여유를 확보하고 있다. 논문[13]에서는 뉴럴 네트워크(artificial neural network)를 이용한 ULTC와 STATCOM의 협조제어 방법을 제시하고 있고, 논문[14]는 퍼지로직을 이용한 ULTC의 제어방법을 제시하고 있다.

앞서 말한 대부분의 연구들은 최적 스케줄을 구하는 문제와 협조제어를 별개로 다루고 있으나, 본 논문에서는 최적

* 교신저자, 正會員 : 明知大學校 電氣工學科/차세대 전력 기술 연구 센터 研究教授 · 工博
E-mail : ptsouth@mju.ac.kr

* 正會員 : 서울大學校 電氣工學部 博士課程

** 正會員 : 서울大學校 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2006年 4月 13日

最終完了 : 2006年 5月 9日

스케줄을 고려한 협조제어 방법을 제시하고자 한다. 우선 유전자 알고리즘을 통하여 커패시터의 최적 스케줄을 구하게 된다. 그리고 실제 운전에서 이렇게 구하여진 커패시터들의 동작을 고려하여 ULTC를 운전하게 된다. IEEE 14 모선 계통에서의 모의를 통해 기존의 제어방법과 제시된 제어방법을 비교하였으며, 이를 통해 제시된 제어방법의 유용성을 검증하였다.

2. ULTC의 기존 제어 방법

일반적으로 ULTC의 동작은 구동모터의 회전에 의해 이루어진다[15]. ULTC 변압기의 제어시스템은 탭 절환장치와 모터구동요소를 포함하고 있는 변압기, 불감대(dead band)와 지연시간(time delay) 요소, 선로전압강하 보상을 포함하는 자동전압조정기, 그리고 전압과 전류를 측정하는 장치로 구성되어 있다. 동작원리는 그림1과 같이 전압편차가 불감대 경계값보다 크면 카운터가 작동하기 시작하고, 지연시간 이내에 전압편차가 불감대 경계값보다 작아지면 카운터는 초기화되며 지연시간 이상으로 전압편차가 경계값 이상을 지속하면 탭이 동작하고 카운터가 초기화된다. 자동으로 제어되는 커패시터는 ULTC와 유사한 방법으로 불감대와 지연시간을 가지고 동작하게 된다[16].

일반적인 ULTC 제어 시스템에서 탭의 동작은 2차측의 전압이 불감대 내에서 유지되도록 동작하게 된다. 이것에 대한 이산방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n(t+1) = n(t) - d \cdot f(e(t), \tau(t)) \quad (1)$$

$$\tau(t+1) = g(e(t), \tau(t)) \quad (2)$$

$$f(e, \tau) = \begin{cases} 1 & \text{if } e > \epsilon \text{ and } \tau > T_d \\ -1 & \text{if } e < -\epsilon \text{ and } \tau < -T_d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$g(e, \tau) = \begin{cases} \tau + 1 & \text{if } e > \epsilon \text{ and } \tau > 0 \\ \tau - 1 & \text{if } e < -\epsilon \text{ and } \tau \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$e = V - V_{ref} \quad (5)$$

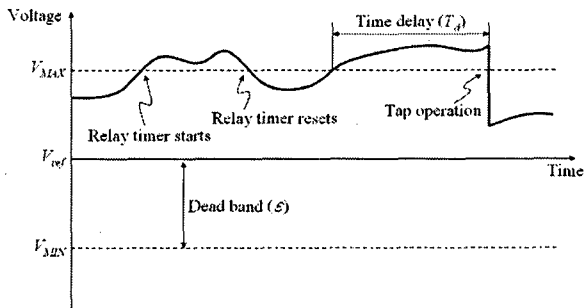


그림 1 ULTC 제어동작의 예
Fig. 1 Conventional ULTC control scheme

여기에서 n 은 ULTC의 탭 위치, d 는 탭의 스텝 크기, e 는 전압편차, T_d 는 지연시간, ϵ 은 불감대, τ 는 카운터, V

는 현재전압, V_{ref} 는 기준전압을 나타낸다.

3. ULTC와 커패시터의 협조제어 방법

전력계통에서 전압제어의 주요 목적은 기준전압에 대한 전압의 편차를 줄이고 전력손실을 줄이면서, 동시에 제어 기기들의 동작 횟수를 줄이는 데 있다. 그런데 지연시간이나 불감대 등과 같은 제어기기들의 비선형 특성 때문에 일반적인 방법으로 원하는 목적을 이루는 것은 어렵다. 뿐만 아니라 ULTC와 커패시터의 협조제어가 이루어지지 않을 경우에는 [17]에서 제시된 것과 같은 이유로, 두 기기 사이의 상호 작용으로 인해 불안정 현상을 야기하는 진동 현상이 발생할 수 있다. 또한 ULTC의 지연시간이 커패시터의 지연시간보다 짧을 경우에는 ULTC의 탭이 최대치나 최소치에 도달하여 더 이상 동작할 수 없을 때만 커패시터가 동작하게 된다.

일반적으로 ULTC를 제어 할 때에는 기준전압을 1.0 pu로 설정하고 제어하게 된다. 그러나 이 기준전압을 정하는데 있어서 커패시터의 동작을 고려함으로써 ULTC의 불필요한 동작을 방지할 수 있다. 만약 커패시터의 동작 스케줄을 미리 알 수 있다면 ULTC의 동작횟수를 줄이고 전체적으로 전력계통의 손실 또한 줄일 수 있다.

이 논문에서 제안하는 두 기기 간의 협조 제어 방법에서는 부하예측치를 이용하여 커패시터의 최적 스케줄을 결정하고, ULTC를 통해 부하예측치와 실제 부하량의 차이를 보정하는 방식으로 제어하게 된다. ULTC를 실시간 운전에서 이용하는 이유는 ULTC가 커패시터에 비해 넓은 동작 범위를 가지고 있기 때문이다.

3.1. 커패시터의 최적 스케줄

전압제어기기들의 최적 스케줄은 부하예측치를 이용해 다음의 목적함수의 해를 구함으로써 구하게 된다.

$$\min J = w_1 \sum_{h=1}^{24} L_h + w_2 \sum_{h=1}^{24} \sum_{n=1}^N D_{n,h} \quad (6)$$

$$= J_1 + J_2$$

여기에서 w_1, w_2 는 전력손실과 전압편차에 대한 가중치이고, N 은 계통에서의 총 모선 수, L_h 는 시간 h 에서 전력손실의 비율, $D_{n,h}$ 는 모선 n 에서 시간 h 에 전압과 1.0 pu의 차이의 절대값이다. 이 목적함수에서 J_1 은 전력손실을 나타내고 J_2 는 전압편차를 나타낸다. 목적함수 (6)은 다음과 같은 제약 조건들을 가지게 된다.

$$V_{\min} < V_{n,h} < V_{\max} \quad (7)$$

$$\sum_{h=2}^{24} |TAP_{p,h} - TAP_{p,h-1}| \leq MK_{Tp} \quad (8)$$

$$\sum_{h=2}^{24} |C_{q,h} \oplus C_{q,h-1}| \leq MK_{Cq} \quad (9)$$

여기에서 $V_{n,h}$ 는 시간 h 에 모선 n 에서의 전압, V_{min}, V_{max} 는 각각 모선 전압의 최소, 최대 한계치, $TAP_{p,h}$ 는 시간 h 에 탭 p 의 위치, MK_{Tp} 는 ULTC의 최대 동작횟수, $C_{q,h}$ 는 시간 h 에 커패시터 q 의 상태(꺼짐이나 켜짐), MK_{Cq} 는 커패시터 q 의 최대 동작횟수를 나타낸다. 목적함수 (6)의 최적해를 찾는 데 있어서, 각 탭의 위치 $TAP_{p,h}$ 는 2차측 전압을 1.0 pu로 유지하도록 움직였다는 가정 하에서, 각 커패시터의 상태 $C_{q,h}$ 를 구하였다.

목적함수 (6)의 최적화 문제는 GA를 이용하여 풀었는데, 그 이유는 이산 비선형 (discrete nonlinear) 특성을 가진 문제를 푸는데 적합하기 때문이다. 커패시터의 상태를 코드화하는 데 있어서 각 커패시터는 24 비트 길이로 코드화 되었다. 각 비트는 커패시터의 상태를 나타내는데, 0은 꺼진 상태를 나타내고 1은 켜진 상태를 나타낸다. 이 최적화 문제를 풀면 다음과 같이 커패시터 q 의 동작 스케줄 T_q 가 나오게 된다.

$$T_q = \{t_{q,1}, t_{q,2}, \dots, t_{q,Kq}\} \quad (q = 1, \dots, Q) \quad (10)$$

여기에서 Q 는 커패시터의 총 개수이고, $t_{q,k}$ 는 커패시터 q 의 k 번째 동작 시간, Kq 는 커패시터 q 의 총 동작횟수를 나타낸다. 각 커패시터는 식 (10)의 스케줄에 따라 동작하게 되고, 이 스케줄은 하루 전에 ULTC의 제어부로 전달되게 된다.

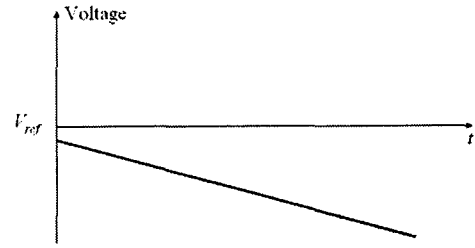
3.2. ULTC의 협조 제어

제안된 ULTC의 제어에서는 커패시터 동작 정보를 이용하여, ULTC의 기준전압을 조정함으로써 협조제어를 하게 된다. 제어를 하지 않을 경우 ULTC의 2차측 전압이 그림 2(a)처럼 변하는 경우를 생각해 보자. 여기에서 커패시터는 최적 스케줄에 의해 T_{cap} 에 동작된다고 가정한다. 그림2(b)에서 볼 수 있듯이 고정된 V_{ref} 를 사용하는 경우에는 네 번의 ULTC 동작이 있었고, 그림2(c)와 같이 커패시터의 동작을 고려하여 V_{ref} 를 조정하는 경우에는 ULTC가 두 번 동작하여 동작 횟수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 조정된 V_{ref} 를 사용하는 경우에는 전압의 오버슈트(overshoot)가 줄어들음을 볼 수 있다.

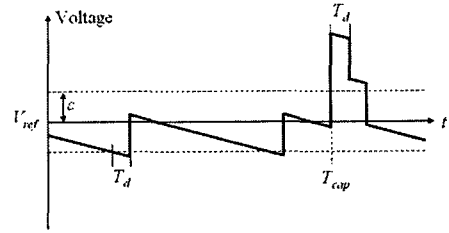
ULTC의 기준 전압을 조정하는 데 이용하기 위하여, 식 (11)과 같이 정의되는 커패시터의 동작에 의한 전압 편차를 조류해석을 통해 미리 구하게 된다.

$$\Delta VC_{n,q} = \text{커패시터 } q \text{의 동작에 의해 발생하는 모선 } n \text{에 서의 전압 편차} \quad (11)$$

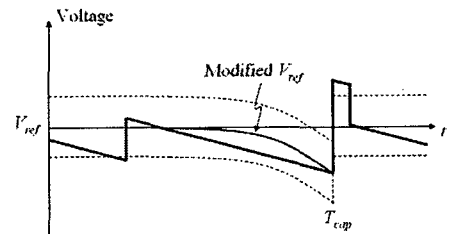
실제로는 계통의 상태에 따라 $\Delta VC_{n,q}$ 의 크기가 변하게 되지만, 그 변화량은 커패시터에 의한 전압변동에 비해 아주 작기 때문에 $\Delta VC_{n,q}$ 는 일정하다고 가정하였다.



(a) 제어하지 않을 경우



(b) 고정된 V_{ref} 의 경우



(c) 조정된 V_{ref} 의 경우

그림 2 ULTC 2차측의 전압 파형

Fig. 2 Voltage profile at the secondary bus of ULTC

제안하는 제어 방법에서는 ULTC의 기준 전압은 다음 식에 따라 결정된다.

$$e = V - V_{ref,p}(t) \quad (12)$$

$$V_{ref,p}(t) = V_{ref,p}^0 + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^{K_q} \Delta VC_{p,q} \cdot e^{\frac{t-t_{q,k}}{\tau_{ref}}} \cdot f_C(t_{q,k}) \cdot u(t_{q,k}-t) \quad (13)$$

$$f_C(t_{q,k}) = \begin{cases} +1 & \text{if capacitor } q \text{ becomes OFF at operation time } t_{q,k} \\ -1 & \text{if capacitor } q \text{ becomes ON at operation time } t_{q,k} \end{cases} \quad (14)$$

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

여기에서 $V_{ref,p}(t)$ 는 시간 t 에 ULTC p 의 조정된 기준 전압이고, $V_{ref,p}^0$ 는 ULTC p 의 기준전압(1.0 pu), Q 는 커패시터의 총 개수, K_q 는 커패시터 q 의 총 동작 횟수, $t_{q,k}$

는 커패시터 q 의 k 번째 동작 시간, $\Delta VC_{p,q}$ 는 식(11)의 모선 n 이 ULTC p 의 2차측 모선일 때의 전압 변동, 그리고 τ_{ref} 는 조정 기준전압의 시정수이다. 시정수 τ_{ref} 를 크게 하면 ULTC가 동작할 시간 여유가 늘어남으로써 탭의 잦은 동작을 방지할 수 있으나 ULTC의 기준전압이 1.0pu에서 벗어나는 시간이 길어지게 된다. 반대로 너무 짧게 잡으면 커패시터가 동작하기 바로 직전에야 기준전압이 수정되어서 커패시터의 동작을 고려한 효과가 없어지게 된다. 이렇게 조정된 ULTC의 기준전압에 의해 그림2에서와 같이 커패시터의 동작을 고려해서 ULTC를 제어하게 된다.

정리하면 제시한 방법은 부하예측치를 기반으로 하여 커패시터의 동작 스케줄을 결정하게 되고, 그 스케줄을 고려해서 ULTC를 제어하게 된다. 따라서 실제 부하치가 예측치와 차이가 나는 경우 최적동작을 보장할 수는 없게 되나, 지금까지 연구되어 온 부하예측치를 고려한 커패시터 스케줄링만을 실제통에 적용하는 경우에 비해 ULTC의 동작을 통해 그 차이에 의한 부작용을 완화시키게 된다. 특히 협조제어가 이루어지지 않은 경우에 발생할 수 있는 ULTC와 커패시터의 불필요한 동작을 방지한다는 데에 그 의의가 있다.

4. 모의 결과

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 그림3의 IEEE 14모선 시스템에서 모의를 하였다. 1번 모선이 슬랙 모선이고, 두 개의 커패시터 C1과 C2가 6번 모선에, 그리고 커패시터 C3이 9번 모선에 설치되어 있다고 가정하였다. 두 개의 ULTC T1과 T2는 각각 15단계의 탭 위치를 가지고 있고 $\pm 5\%$ 범위에서 동작한다고 가정하였다. 그리고 동기조상기(synchronous condenser)들은 무효전력 출력량이 제한이 없다고 가정하여 결과적으로 발전기와 같이 취급하였다. 표1과 표2에서는 커패시터와 변압기의 데이터를 보여주고 있다. 침두 부하는 IEEE 14모선 데이터의 120%라고 가정하였고, 부하는 50%의 정전력 부하와 50%의 정임피던스 부하로 구성하였다. 하루 동안의 부하 변화는 부하예측치에서 임의로 10% 범위내에서 변동한다고 가정하였고, 식(6)에서의 가중치 w_1, w_2 는 각각 0.5로 설정하였다.

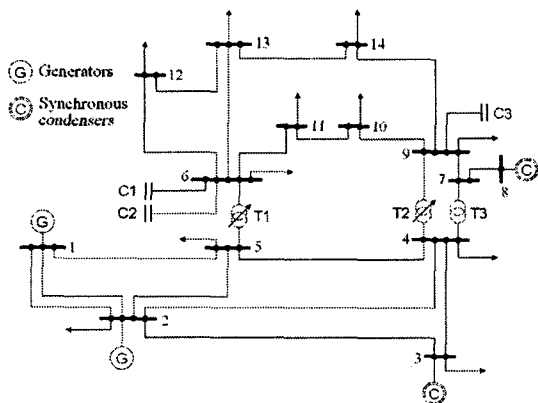


그림 3 IEEE 14모선 시스템
Fig. 3 Modified IEEE 14-bus system

표 1 커패시터 데이터

Table 1 Capacitor data in the system

커패시터	위치	용량 [pu]
C1	6	0.1
C2	6	0.1
C3	9	0.1

표 2 변압기 데이터

Table 2 Transformer data in the system

변압기	위치		임피던스 [pu]
	1차측	2차측	
T1	5	6	0.25202j
T2	4	9	0.55618j
T3	4	7	0.20912j

표 3 커패시터의 동작 스케줄

Table 3 Dispatch schedule of capacitors (1=ON, 0=OFF)

시간	0	12	24
C1	000000001111111111111111000		
C2	0000001111111111111111110000		
C3	000000011111000000000000000		

표 4 각 모의 사례의 조건

Table 4 Conditions for the case study

		ULTC	커패시터
기존 제어 방법	사례1	$T_d = 90$ sec.	$T_d = 90$ sec.
	사례2	$T_d = 90$ sec.	$T_d = 60$ sec.
커패시터 스케줄에 따라 동작	사례3	$T_d = 60$ sec. $V_{ref} = 1.0$ pu	스케줄에 따라 동작
	사례4	$T_d = 90$ sec. $V_{ref} = V_{ref}(t)$ (13)	

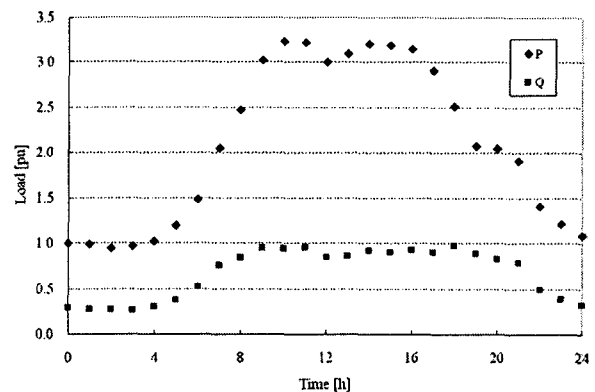
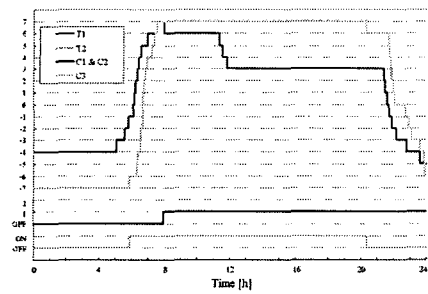
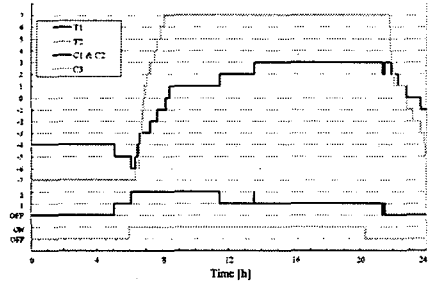


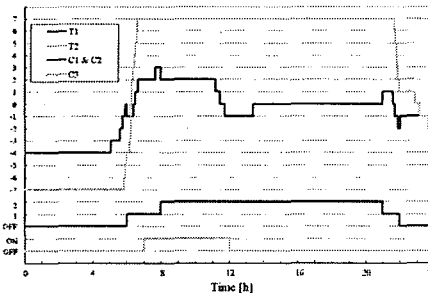
그림 4 하루 동안의 부하 총합의 변화
Fig. 4 Total sum of the forecasted load in the system during a day



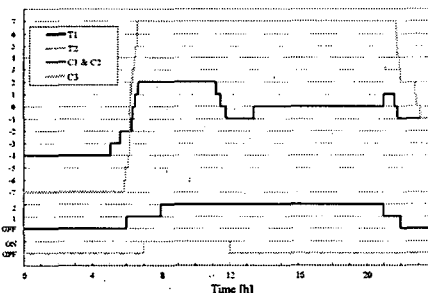
(a) 사례1



(b) 사례2



(c) 사례3



(d) 사례4

그림 5 ULTC와 커패시터의 동작
Fig. 5 Operations of ULTCs and capacitors

표3에서 주어진 커패시터의 스케줄은 그림4에서 제시된 부하예측치에 대해 3.1 절에서 제시된 방법에 따라 GA를 통해 구한 결과이다. GA의 파라미터들은 논문[9]에 근거해서 정하였는데, 세대 당 개체수, 교배율, 돌연변이율은 각각 70, 0.5, 0.2로 하였다.

불감대 ϵ 을 1%로 하고, 표4의 각 사례에 대해서 모의 하였다. 사례1과 사례2에서는 ULTC와 커패시터의 협조제어 없이 각각 2장에서 설명된 기존의 방법대로 운전하였다. 사례1에서는 ULTC의 지연시간이 커패시터보다 짧아 ULTC

가 커패시터보다 먼저 동작하였고, 사례2에서는 ULTC의 지연시간을 더 길게 하였다. 사례3과 사례4에서는 커패시터가 표3에서 주어진 최적 스케줄에 따라 동작하였다. 사례3에서는 ULTC의 기준전압을 1.0 pu로 고정하였고, 사례4에서는 이 논문에서 제시된 바와 같이 조정된 기준전압 $V_{ref}(t)$ 를 적용하였으며 시정수 τ_{ref} 는 10분으로 하였다.

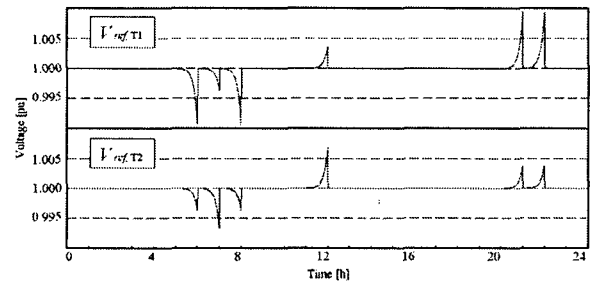


그림 6 ULTC의 조정된 기준 전압
Fig. 6 The modified reference voltage of ULTC

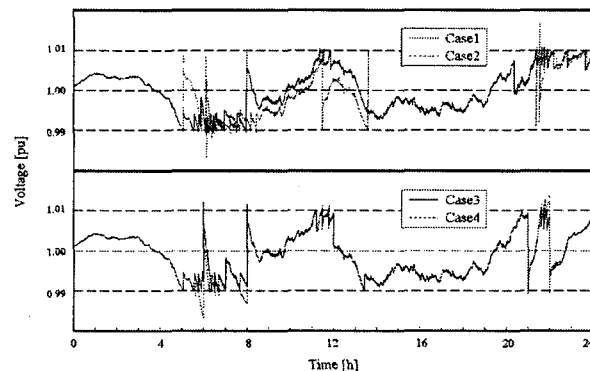


그림 7 모선6에서의 하루 동안의 전압 변화
Fig. 7 Voltage magnitude at bus6 during a day

표 5 모의 결과 정리

Table 5 Summary of the simulation results

		사례1	사례2	사례3	사례4
평균전압편차 [pu]		0.02436	0.02453	0.02509	0.02516
총 전력손실 [kWh]		676.44	674.76	672.76	672.73
동작 횟수	ULTC	50	43	45	39
	커패시터	3	14	6	6
	합계	53	57	51	45

그림5는 ULTC와 커패시터의 하루 동안의 동작기록을 보여주고 있다. 사례1에서는 오전 8시에 T1과 T2가 탭 위치의 최대치에 도달하였으며, C2는 하루 종일 동작하지 않았다. 대조적으로 사례2에서는 오전 6시에 모든 커패시터가 동작하였다. 저녁 9시 부근에서는 T1과 C1, C2가 그들 사이의 상호 작용으로 인해 진동현상을 나타내었다. 이 결과들을 통해 ULTC와 커패시터의 동작에 있어서 지연시간이 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

사례3에서는 오전 6시와 8시, 저녁 10시 부근에서 커패시

터의 동작에 따른 T1의 불필요한 동작을 볼 수 있다. 오전 6시에는 T1이 탭을 증가시키고 C1이 켜지게 된다. 그 결과로 T1에서의 전압이 불감대보다 높게 상승하게 되어 T1의 탭이 내려가게 된다. 만약 C1이 켜지는 것을 고려해서 T1의 기준전압을 더 낮게 조정하였다면 T1의 불필요한 동작을 방지할 수 있었을 것이다. 오전 8시에도 비슷한 현상이 일어났고, 저녁 10시에는 반대로 T1의 탭이 내려간 후에 C1이 꺼져서 전압이 불감대 아래로 내려가게 되었다. 그 결과로 T1의 탭이 다시 올라가는 동작을 나타내었다. 여기서도 마찬가지로 만약 커패시터의 동작을 고려하여 기준전압을 높게 조정하였다면 T1의 동작을 줄일 수 있었을 것이다.

사례4에서는 ULTC가 불필요한 동작 없이 탭의 위치가 -4에서 +2사이에서 움직이고 있다. 그림6은 식(13)에 의해 구해진 조정된 기준전압 $V_{ref}(t)$ 의 하루 동안의 변화를 보여주고 있다.

모의 결과는 표5에 정리되어 있다. 하루 동안의 평균 전압 편차는 사례3과 사례4에서 사례1과 사례2에 비해 조금 더 크게 나타난다. 전압 파형의 예로서 그림 7은 6번 모션에서의 하루 동안의 전압 변화를 보여주고 있다. 총 동작횟수 측면에서 볼 때 사례3과 사례4의 결과가 더 좋은 결과를 나타내고 있다. 사례1에서 ULTC는 사례3에 비해 더 많은 동작 횟수를 나타내고 있는데, 이것은 커패시터 C2가 동작하지 않았기 때문이다. 사례 2에서는 커패시터가 더 많이 동작하는 것은 물론이고, ULTC도 커패시터와의 상호 진동 현상으로 인해 더 많이 동작하였다. 사례3에서는 사례4와 비교해 볼 때 평균 전압편차나 총 전력손실은 비슷한 결과를 보였으나, 커패시터 동작의 영향으로 인해 ULTC가 더 많이 동작하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 커패시터의 동작을 고려한 ULTC의 협조 제어방법을 제시하였다. 먼저 부하예측치와 GA를 통해 커패시터의 최적 스케줄을 구한 다음에 각 커패시터는 이 스케줄에 따라 운전되고, ULTC는 커패시터들의 동작을 고려하여 기준 전압을 조정하면서 부하예측치와 실제 부하량의 차이를 보정하는 방식으로 운전되게 된다. 제안된 제어 방법에서는 약간의 전압 편차를 허용함으로써 무효전력제어기기의 동작 횟수를 줄이고 있다.

제안된 제어 방법은 IEEE 14모션 계통에서 기존의 방법과 비교함으로써 검증되었다. 모의 결과는 제안된 방법이 전압제어기기의 총 동작횟수를 감소시키고 전력손실 또한 감소시키는 것을 보여주었다. 그리고 제안된 제어방법에 의해 ULTC는 더 많은 부하 변동에 대응할 수 있는 동작 여유를 확보할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업의 지원으로 수행되었음 (차세대전력기술연구센터)

참 고 문 헌

- [1] H. Vu, P. Pruvot, C. Launay, and Y. Harmand, "Improved voltage control on large-scale power system," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 1295-1303, Aug. 1996.
- [2] Y. Y. Hsu and H. C. Kuo, "Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 140, no. 6, pp. 433-438, Nov. 1993.
- [3] F. C. Lu and Y. Y. Hsu, "Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, no. 6, pp. 639-645, Nov. 1995.
- [4] Y. Liu and X. Qui, "Optimal reactive power and voltage control for radial distribution system," *Proc. IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA*, no. 1, pp. 85-90, July 2000.
- [5] T. Niimura, R. Yokoyama, and B. J. Cory, "A fuzzy coordination approach for multi-objective voltage and reactive power scheduling of an electric power system," *Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, no. 1, pp. 267-272, March 1993.
- [6] N. I. Santoso and O. T. Tan, "Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 1, pp. 266-272, Jan. 1990.
- [7] Y. Y. Hsu and C. C. Yang, "A hybrid artificial neural network-dynamic programming approach for feeder capacitor scheduling," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 1069-1075, May 1994.
- [8] A. Saric, M. Calovic, and M. Djucanovic, "Neural-net based coordinated control of capacitors and ULTC transformer in daily operation of radial distribution systems," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 43, pp. 169-177, 1997.
- [9] Z. Hu, X. Wang, H. Chen, and G. Taylor, "Volt/VAR control in distribution systems using a time-interval based approach," *IEE Proc. Gener. Transm., Distrib.*, vol. 150, no. 5, pp. 548-554, Sep. 2003.
- [10] S. Corsi, P. Marannino, N. Losignore, G. Moreschini, and G. Piccini, "Coordination between the reactive power scheduling function and the hierarchical voltage control of the EHV ENEL system," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 686-694, May 1995.
- [11] 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 controller compensation with existing substation equipment for long term VAR management," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 2, pp. 1034-1040, April 1994.

- [12] K. M. Son, K. S. Moon, S. K. Lee, and J. K. Park, "Coordination of an SVC with a ULTC reserving compensation margin for emergency control," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 15, no. 4, pp. 1193-1198, Oct. 2000.
- [13] G. W. Kim and K. Y. Lee, "Coordination control of ULTC transformer and STATCOM based on an artificial neural network," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 2, pp. 580-586, May 2005.
- [14] B. Kasztenny, E. rosolowski, J. Izykowski, M. M. Saha, and B. Hillstrom, "Fuzzy logic controller for on-load transformer tap changer," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 13, no. 1, pp. 164-170, Jan. 1998.
- [15] M. S. Calovic, "Modeling and analysis of under-load tap-changing transformer control systems," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 103, no. 7, pp. 1909-1915, Jul. 1984.
- [16] C. Taylor, Power system voltage stability, McGraw-Hill, 1994, pp. 174-179.
- [17] N. Yorino, M. Danyoshi, M. Kitagawa, "Interaction among multiple controls in tap change under load transformers," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 1, pp. 430-436, Feb. 1997.

저 자 소 개



박종영(朴鍾泳)

1976년 8월 16일생. 1999년 서울대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 석사. 2001~현재 동 대학원 전기공학부 박사 과정.

Tel : 02-880-7258

E-mail : drago@snu.ac.kr



남순열(南淳烈)

1996년 서울대학교 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 명지대학교 전기공학과 연구교수. 차세대전력기술연구센터 연구원.

Tel : 031-330-6361

E-mail : ptsouth@mju.ac.kr



박종근(朴鍾根)

1973년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1979년 일본 동경대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 서울대학교 전기공학부 교수.

Tel : 02-880-7258

E-mail : parkjk@snu.ac.kr