

배전계통 전압/무효전력 보상을 위한 LTC변압기와 SC의 협조운전 알고리즘

<sup>0</sup>최준호<sup>\*</sup> · 김재철<sup>\*\*</sup> · 남해곤<sup>\*</sup> · 문승일<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>전남대학교 전기공학과, <sup>\*\*</sup>숭실대학교 전기제어시스템공학부, <sup>\*\*\*</sup>서울대학교 전기컴퓨터공학부

Cooperation Algorithms of LTC and SC for Distribution Volt/Var Regulation

<sup>0</sup>Joon-Ho Choi<sup>\*</sup> · Jae-Chul Kim<sup>\*\*</sup> · Hae-Kon Nam<sup>\*</sup> · Seung-Il Moon<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>ChonNam National Univ., <sup>\*\*</sup>Soongsil Univ., <sup>\*\*\*</sup>Seoul National Univ.

**Abstract** - In this paper, the on line volt/var control algorithms of the *Load Tap Changer* (LTC) transformer and *Shunt Capacitor*(SC) are proposed for distribution volt/var regulation. In the existing volt/var control of the distribution substation, the voltage of feeders and var of distribution systems is mainly controlled by the LTC transformer tap position and on/off status of the shunt capacitor. The LTC and shunt capacitor bank has discrete operation characteristics and therefore it is very difficult to control volt/var at the distribution networks within the satisfactory levels. Also there is limitation of the operation times of the LTC and shunt capacitor bank because it is affects on their functional lifetime. The proposed volt/var control algorithm determine an optimal tap position of LTC and on/off status of shunt capacitors at a distribution network with the multiple feeders. The mathematical equations of the proposed method are introduced. Simple case study was performed to verify the effectiveness of the proposed method.

- $V_{nom}$  : 공칭전압
- $SC(t)$  : SC 온, 오프 상태
- $\alpha$  : LTC 시간지연 계수
- $Q_s$  : 배전계통 무효전력 수요
- $Q_c$  : SC Var 용량
- $\alpha_1, \alpha_2$  : SC 상, 하한 계수
- $\alpha'_1, \alpha'_2$  : 협조운전하에서 SC 상, 하한 계수
- $T_{lb}, T_L$  : 협조운전하에서 LTC탭 상, 하한치

약어

- $K$  : LTC 탭 개수
- $\nabla V_k(t)$  : 전압 오차
- $a_k$  : LTC 탭 간격
- $db$  : LTC 대밴드
- $dt$  : LTC 시간지연
- $T_k(t)$  : LTC 탭 위치
- $c_k(t), g_k(t)$  : LDC 카운터
- $f_k(t)$  : LTC 탭 절환 동작
- $e_k(t)$  : 전압 조정기 오차
- $V_{ser}(t)$  : 송출기준전압
- $V_{cc}$  : LDC 기준전압
- $Z_{eq}$  : LDC 등가 선로 임피던스
- $I(t)$  : 부하 전류
- $V_{sc}(t)$  : 송출전압
- $V_{tap,k}(t)$  : k번째 탭이 위치했을때 주변압기 2차측 전압
- $Z_{MTR,k}(t)$  : k번째 탭이 위치했을때 주변압기 임피던스
- $N$  : 급전선 개수
- $V_{n,max}$  : n 급전선의 수용가 최고 전압
- $V_{n,min}$  : n 급전선의 수용가 최소 전압
- $V_{min}$  : 수용가 허용 최소전압(0.94 [p.u.])
- $V_{max}$  : 수용가 허용 최고전압(1.06 [p.u.])

1. 서론

최근 전력수요 증가, 고품질 전기, 전자 부품의 사용 및 전력전자 소자의 사용 증가로 전력계통의 전력 품질은 악화되고 있으며 고품질 전력에 대한 수용가의 수요가 급증하고 있는 실정이다. 전력품질 문제로는 대표적으로 전압 변동, 플리커, 순간전압강하, 고조파 왜곡 등의 문제가 있다. 배전계통에서 전력품질의 문제중 정상 상태에서 가장 중요한 문제점은 전압변동 및 역률 저하이다. 일반적으로 수용가에 사용되는 전기 기기는 정격 전압에서 운전될 때 가장 효율이 좋아지도록 정격전압을 기준으로 설계되어 있다. 따라서 공급전압이 이 정격전압을 유지못하고 이보다 높아지거나 또는 낮아지면 우선 그 효율이면서 다소간의 나쁜 영향을 미치게 된다. 예를 들어 설명하면 백열전구의 경우 공급전압이 정격값보다 5[%]만 저하되어도 광도가 8[%]감소되고 반대로 공급전압값이 정격값보다 5[%]만 상승되면 수명은 45[%]나 단축된다. 또한 배전계통의 역률이 저하되면 공급전압을 유지하기 힘들뿐 아니라 전체적인 손실이 증가하게 된다.

일반적으로 모든 국가에서는 수용가 전압의 적정수준 유지를 위해 전기법규상 이를 규정하여 의무화하고 있어, 전력회사는 이를 적절히 유지하기 위하여 별도의 보상장치를 적용하고 있다.

배전계통에서 전압 및 무효전력 보상은 일반적으로 변전소 주변압기에 부하 탭절환기(LTC)를 채용하고 변전소의 캐퍼시터를 적용하여 수용가의 전압을 표준 범위 내에 조정하고 배전계통의 무효전력을 보상하고 있다. 즉 배전계통 전압/무효전력 보상의 목적은 주 변압기에서 배전계통으로의 무효전력 공급흐름과 급전선의 전압을 허용범위내에 유지하는 것에 있다 [1-5]. 그러나 이 두 설비의 적절한 협조운전은 실질적으로 이루어지지 않아 효율성이 떨어진다고 볼 수 있다. 이와 관련된 기존의 연구를 살펴보면, 인공지능-퍼지 다이내믹 프로그램을 이용한 방법 [1], 경험적 제어 방법[2,5] 등이 배전계통의 전압/무효전력 보상을 위해 제안되었다. 그러나 이러한 방법들은 배전계통에 존재하는 급전선간 부하 부동율을 고려하지 않아 실제 적용하기에는 무리가 있다고 판단된다.

따라서 급전선간 부하 부동율을 고려한 새로운 방식의 전압/무효전력 보상 알고리즘 개발이 필요하다. 본 논문에서는 국내 배전계통의 전압/무효전력을 보다 효율적

으로 관리하기 위해 LTC와 SC의 협조운전 알고리즘 제안하였다. 제안된 협조운전 알고리즘은 다중 급전선을 가지는 배전용 변전소의 LTC 변압기의 탭 위치 및 캐패시터의 온, 오프 동작을 최적으로 조정하는 방식으로 LTC 변압기의 탭은 [2-3]의 방법을 적용하여 결정하고 캐패시터의 온, 오프 동작은 무효전력 흐름 및 LTC 탭 위치에 따라 결정되는 협조운전 방식으로 On-line 방식이다. 사례연구에서는 실제 배전용 변전소의 계통 데이터를 이용하여 제안한 알고리즘의 유효성을 검증하였다.

## 2. 제안된 전압/무효전력 알고리즘

### 2.1 전형적인 LTC 변압기 및 SC 모델

전형적인 LTC 변압기의 제어에서 변압기의 탭은 이산적으로 조정된다. LTC 탭 절환은 LTC의 탭 간격만큼씩 조정되며 전압오차가 지정된 시간동안 지정된 테드밴드를 초과할 때 이루어지도록 하는 것이 일반적이다. 즉 탭 절환 동작은 시간지연 및 테드밴드에 의존하며 이는 불필요한 탭 절환 동작을 방지하기 위해 적용된다.

전형적인 LTC 변압기모델의 이산방정식은 다음의 식 (1)-(5)와 같이 주어진다 [3-4].

$$T_k(t+1) = T_k(t) - \alpha_k f_k(e_k(t), c_k(t)) \quad (1)$$

$$c_k(t+1) = g_k(e_k(t), c_k(t)) \quad (2)$$

$$f_k(e_k, c_k) = \begin{cases} 1, & \text{if } e_k = 1, \quad c_k > dt \\ -1, & \text{if } e_k = -1, \quad c_k < -dt \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$g_k(e_k, c_k) = \begin{cases} c_k + 1, & \text{if } e_k = 1, \quad c_k \geq 0 \\ c_k - 1, & \text{if } e_k = -1, \quad c_k \leq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$e_k(\nabla V_k, db) = \begin{cases} e_k = 1, & \text{if } \nabla V_k > db \\ e_k = -1, & \text{if } \nabla V_k < db \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

전형적인 캐패시터 모델의 간략화된 이산 방정식은 다음식과 같이 주어진다.

$$SC(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } SC \text{ is on} \\ 0, & \text{if } SC \text{ is off} \end{cases} \quad (6)$$

### 2.2 LTC 변압기 전압 제어모델

기존의 전압조정 방식으로 널리 쓰이는 선로전압강하 보상방식(LDC: Line Drop Compensation)은 배전용 변전소의 부스전압 및 벅크 전류를 이용하여 부하 중심점의 전압을 일정하게 하는 방식이다. 이러한 방식은 급전선간 부하가 일정할 경우에는 아주 유용한 방식이지만 실제 존재하는 급전선간 부동율을 본다면 개선의 여지가 필요하다. 실제 현재 모든 배전용 변전소의 각 급전선에는 CT를 설치하여 부하 전류를 측정하고 이를 기록하여 배전 자동화 시스템의 데이터베이스로 구축하고 있다. 그러나 이러한 급전선간 부동율은 현재 전압 조정에 이용되고 있지는 않다. 이를 고려한 방법으로 [3-4]에서는 급전선간 부동율을 고려한 방식을 제안하였다. 기존 LDC 방식에서 송출기준점 및 송출전압은 다음의 식과 같이 주어진다.

$$V_{ser}(t) = V_{ce} + Z_{cq} \times I(t) \quad (7)$$

$$V_{sc}(t) = V_{tap,k}(t) - Z_{MTR,k}(t) \times I(t) \quad (8)$$

식 (1)-(5) 및 (7)-(8)을 볼 때 송출전압은 송출기준점 전압( $V_{ser}$ )  $\pm$  테드밴드(db) 범위내에서 조정이 되고 히스테리시적인 특징을 가지게 된다. 배전계통에서 계절 별, 시간대 별, 급전선 별 부하 부동율의 변화를 고려하여 기존의 LDC 전압조정 방식에서 LDC 정정치를 정확하

게 구하는 것은 상당히 어려운 문제이다. 이를 극복하기 위해 주기적으로 LDC정정치를 다시 계산하여 정정하는 방식을 사용하지만 한계가 존재한다 [3-4].

본 논문에서 사용하는 방식은 최적화 문제를 통해 최적의 LTC오차 및 탭 위치를 결정하는 방식이다. 이 방식에서 목적함수는 급전선 별 최고, 최저 전압 수용가의 전압이 공칭전압에 가장 근접하도록 정의하였으며 다음의 최적화 문제를 통하여 얻어진다

$$\text{Min}_k J = \sum_{n=1}^N \{ (V_{nom} - V_{n,max})^2 + (V_{nom} - V_{n,min})^2 \} \quad (9)$$

s. t.

$$V_{n,min} \geq V_{min}$$

$$V_{n,max} \geq V_{max}$$

$$V_{n,min} \geq \min(F(V_{sc}))$$

$$V_{n,max} \geq \max(F(V_{sc}))$$

식 (9)를 통해 최적의 송출전압에 해당하는 탭이 결정되며 LTC 제어기의 LTC의 오차( $e_k(t)$ )는 다음과 식과 같이 수정된다.

$$e_k(\hat{T}_k(t), T_k(t-1)) = \begin{cases} e_k = 1 & \text{if } \hat{T}_k(t) > T_k(t-1) \\ e_k = -1 & \text{if } \hat{T}_k(t) < T_k(t-1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

제안된 방식에서 LTC변압기의 반한시 시간지연 특성은 다음의 식과같이 구현 가능하다.

$$dt(t) = \begin{cases} \frac{dt}{\alpha(\hat{T}_k(t) - T_k(t-1))} & \text{if } \hat{T}_k(t) \neq T_k(t-1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

제안된 방식에서 시간지연 특성은 기존 방식보다 크게 적용하는 것이 LTC변압기의 불필요한 탭절환 방지를 위해 적절하다 [4].

### 2.3 SC 제어모델

일반적으로 SC는 중부하시 계통의 무효전력 수요를 적정 수준으로 조정하기 위해 배전용 변전소에 설치한다. SC가 동작함에 따라 배전용 변전소 2차측 저압 선로의 무효전력 및 전압에 변화를 주게 되어 무효전력 및 전압을 보상하게 된다. 이의 제어방식으로 가장 널리 쓰이는 방식은 배전용 변전소 2차측의 무효전력 수요를 측정하여 일정 수준이상 또는 이하로 되면 SC를 투입, 개방하는 방식이 적용된다. 무효전력 수요를 기반으로 한 일반적인 SC의 제어 모델은 다음의 식과 같다.

$$SC(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } Q_s > \alpha_1 Q_c \text{ during } dt_c \\ 0 & \text{if } Q_s < \alpha_2 Q_c \text{ during } dt_c \end{cases} \quad (12)$$

### 2.4 협조 제어 알고리즘

협조 제어 알고리즘의 주 목적은 배전용 변전소의 전압/무효전력 조정장치인 LTC와 SC의 효율적인 운용이다. 앞 절에서 살펴본 바와 같이 LTC와 SC는 현재 각각 독립적인 제어방식으로 경험적인 방식이나 프로그램 방식으로 자기 독립적으로 제어하고 있다. 따라서 LTC와 SC의 효율적인 협조 운전이 이루어진다면 배전용 변전소의 전압/무효전력 조정이 보다 효율적으로 이루어질 것이다. 본 논문에서 제안한 협조운전 방식은 그림 1에 나타내었다. SC의 일일 동작 횟수는 2-4회 이하로

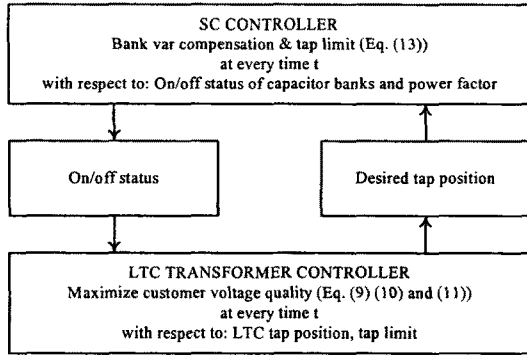


그림 1 제안된 협조운전알고리즘

LTC 변압기의 동작횟수와 비교해 볼 때 매우 적다. 따라서 SC의 투입 및 개방 시점을 LTC와 협조운전하여 LTC변압기의 동작횟수를 줄이는 것이 바람직하다. 배전계통에서 SC를 투입하면 배전계통의 무효전력 보상이 이루어지게 되고 급전선의 전압이 상승하게 되는데 이때 LTC 변압기의 탭과 협조운전이 가능하고 투입된 SC가 개방할 때의 경우에도 마찬가지로 협조운전이 가능하다. 즉 LTC 변압기의 최고, 최저탭 근처로 상승하도록 되어있고 SC투입/개방 시점 근처에 도달했다면 식 (12)의 SC 상, 하한 계수  $\alpha_1, \alpha_2$  를 조정하여 투입 및 개방하면 LTC의 불필요한 동작을 방지할 수 있게 된다. 따라서 이 때  $\alpha_1, \alpha_2$  의 재조정이 필요하며 다음식과 같이 조정하여 협조운전을 실시한다.

$$SC(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } \hat{T}_k(t) > T_U \text{ and } Q_s > \alpha'_1 Q_c \text{ during } dt \\ 0, & \text{if } \hat{T}_k(t) < T_L \text{ and } Q_s < \alpha'_2 Q_c \text{ during } dt \end{cases} \quad (13)$$

SC의 시간지연은 LTC의 시간지연과 동일하게 재 조정된다. 결과적으로, 제안된 협조제어 운전알고리즘에서 LTC변압기의 탭은 MLDC방식 [3-4]로 결정되고 이의 값이 지정된 상, 하한치를 벗어날 경우 배전계통의 무효전력 수요와 시간지연으로부터 협조운전하는 방식이다. 식 (13)에서  $\alpha'_1, \alpha'_2$  는 배전용 변전소 별로 통계적 해석 방법으로 결정되어 진다.

### 3. 사례 연구

#### 3.1 모의 계통

모의 배전계통은 국내 배전계통의 전형적인 형태를 가

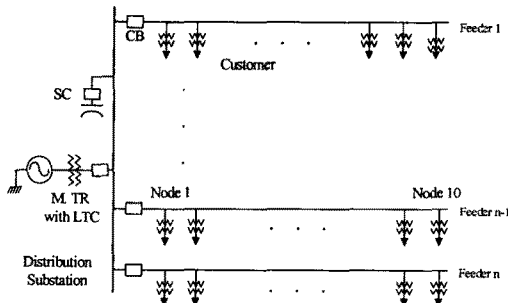


그림 2 모의 계통

지며 그림 2에 나타내었으며 이의 파라미터는 표1에 나타내었다. 그림 3에는 모의 계통의 7, 9월 부하 곡선을 나타내었다.

#### 3.2 사례 연구 결과

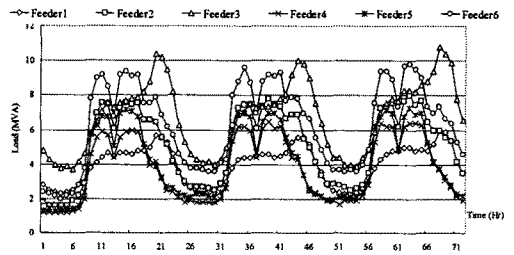
모의 계통과 부하곡선을 기본으로 제안된 방법과 기존 방법의 전압 조정의 결과를 시뮬레이션하였다. 기존방식과 제안된 방식의 조건으로 표 2에는 기존방법과 제안된 방법의 제어 상수를 나타내었다. 그림 4-5의 결과를 보면 제안된 방식이 기존방식보다 우수함을 알 수 있다. 표 3에는 기존 방식과 제안된 방식의 탭 동작횟수를 나타내었다. 탭 동작횟수는 평균적으로 기존방법과 제안된 방법이 거의 동일함을 알 수 있었다.

표 1 모의 계통 파라미터

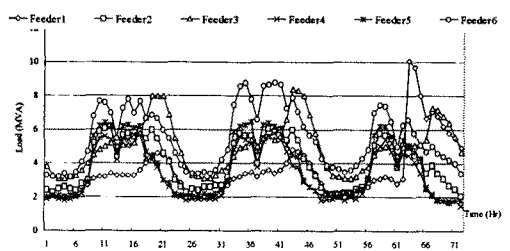
주변압기	임피던스	0.0042+j15 [p.u.]
	용량	45/60 [MVA]
급전선	정상 임피던스	0.0347+j0.0746 [p.u./km]
	개수	6
	급전선별 노드 수	10
수용가	노드 간격	1 [km]
	노드 최대부하	0.01 [p.u.]
	최대부하시	저압선: 5 [%]
	전압강하	중상변압기: 3 [%]
SC	용량	20 [MVar]

표 2 제어 상수 비교

구분	기존방법	제안방법
보상 임피던스 (p.u.)	0.124+j0.064	식 (9)-(11)
SC 계수	$\alpha_1, \alpha_2 : 0.7, 0.5$	$\alpha'_1, \alpha'_2 : 0.6, 0.5$
SC 시간지연(분)	20	20/5 (식 (13))
LTC 시간지연(분)	4	5
탭 수	17	17
db	0.0125	식 (9)-(11)
$T_U, T_L$	8, -8	6, -1



가)7월 부하곡선



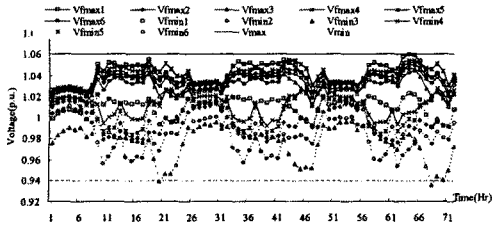
나)9월 부하곡선

그림 3 모의 계통 부하곡선

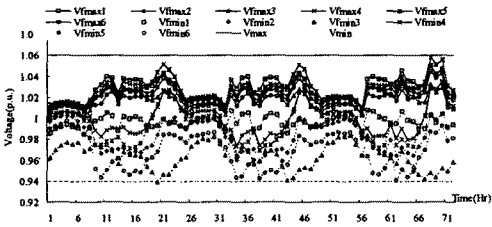
계통에 존재하는 급전선 별 부하 부동율을 고려한 방식으로 매우 효율적이고 쉽게 실 계통에 적용될것이라 판단된다.

[참고 문헌]

- [1] Yuan-Yih Hsu and Feng Chang Lu, "A Combined Artificial Neural Network-Fuzzy Dynamic Programming Approach to Reactive Power/ Voltage Control in A Distribution Substation", *IEEE Trans. on PWRs*, Vol. 13, No. 4, pp. 1265-1271, Nov. 1998
- [2] Mesut E. Baran and Ming-Yung Hsu, "Volt/Var Control at Distribution Substations", *IEEE Trans. on PWRs*, Vol. 14, No. 1, pp. 312-318, Feb. 1999
- [3] Joon-Ho Choi and Jae-Chul Kim, "Advanced Voltage Regulation Method at the Power Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems", *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 15, No. 2, pp. 691-696, Apr. 2000
- [4] Joon-Ho Choi and Jae-Chul Kim, "The online voltage control of ULTC transformer for distribution voltage regulation", *International Journal of EPES*, Vol. 23, No. 2, pp. 91-98, Feb. 2001
- [5] Vesna Borozan, Mesut E. Baran, and Damir Novosel, "Integrated Volt/Var Control in Distribution Systems", *IEEE WM 2001*, pp. 1484 -1489, Feb. 2001

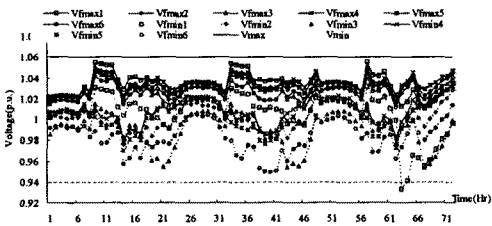


가) 기존 방식

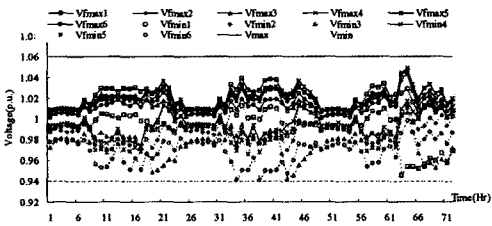


나) 제안된 방식

그림 4 모의 배전계통의 전압 프로파일(7월)



가) 기존 방식



나) 제안된 방식

그림 5 모의 배전계통의 전압 프로파일(9월)

표 3 탭 동작횟수 비교

구분	기존방법	제안방법
7 월	48	53
9 월	59	55

4. 결론

본 논문에서는 배전 전압/무효전력 제어를 위한 LTC와 SC의 협조운전 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방식은 다중 급전선을 가지는 배전계통의 전체적인 무효전력과 각 급전선 전압을 최적으로 조정하는 방식으로 기존 방법과 비교하여 비교우위의 성능을 가짐을 사례연구로 증명하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 실제 배전