

CVR을 위한 전압 계측 기반 전압 및 무효전력 협조제어

Voltage Measurement-based coordinated Volt/VAR Control for Conservation Voltage Reduction

고 석 일* · 최 준 호* · 안 선 주* · 윤 상 윤*
(Seok-Il Go · Joon-Ho Choi · Seon-Ju Ahn · Yun-Sang Yun)

Abstract - In this paper, the voltage measurement-based coordinated Voltage/VAR control (VMCVVC) algorithm for conservation voltage reduction(CVR) is proposed. The proposed algorithm has the purpose of enhancing the CVR effect through coordinated control of the voltage control devices such as the distributed energy resources and the load tap changer(LTC) transformers. It calculates the references of the voltage control devices such that the bus voltages are maintained at as close to the lower operation limit as possible. For this purpose, firstly, the distribution system is divided into LTC transformer control zones through topological search. Secondly, the reactive power references of the reactive power control devices are determined such that the voltage profile of the section is flattened. Finally, the tap references of the LTC transformers are calculated to lower the voltage profile. The effectiveness of the proposed algorithm is demonstrated through case studies using IEEE test network.

Key Words : Conservation voltage reduction, Coordinated control, Load tap changer, Voltage-var optimization

1. 서 론

효율적이고 안정적인 전력공급을 위한 에너지 소비 감소 및 피크 부하 절감은 전력 공급자 및 소비자의 오랜 화두이며, 다양한 관련 기술이 개발되어 왔다. 이러한 에너지 저감 기술의 하나로 CVR (conservation voltage reduction)이 대두되었다. CVR은 전력회사들이 계통의 전압을 감소시켜 에너지 소비를 강제적으로 줄이기 위해 시행한 기술[1]로, 80~90년대에 에너지 절감 및 피크 수요 감소 효과에 대한 다수의 CVR 실증이 수행되었다 [2-6]. 그러나 이제까지는 CVR 제어의 대상인 부하가 연계된 배전계통의 전압 제어자원의 부족으로 인해 그 적용이 제한적이였다. 최근, 신재생에너지 및 에너지 저장장치 기반의 분산형 전원 (distributed generation, DG) 및 이의 안정적 운영을 위한 전압 제어기기 들의 배전계통 유입 증대는 CVR 기술의 적용 확대를 가속시키고 있으며 고도화를 위한 기술의 필요성을 증대시키고 있다.

기존의 CVR 연구는 크게 세가지 측면에서 수행되어 왔다. 첫째, 변전소 주 변압기 단위의 LDC(line drop compensation) 방식을 이용한 CVR 방식이다[7]. 그러나 주 변압기의 LDC 전압제어는 배전계통의 동적 부하변동, 계통 토폴로지 변경에 따른 대

응, 분산전원 등의 영향 반영 및 실제 운영시의 여유도 확보 문제 등으로 CVR 효과가 제한적이다. 둘째, SCADA(supervisory control and data acquisition) 기반 또는 AMI(advanced metering infrastructure) 계측기반의 CVR 방식이 있다[8,9]. 이러한 방식은 특정 제어지점에 대한 전압 계측을 통한 탭 제어 방식을 사용하므로 역시 그 효과가 제한적이다. 셋째, 조류계산 기반의 전압-무효전력 최적화 기법(voltage-var optimization, VVO)을 사용한 방식들이 있다[10-13]. 이 방식은 손실최소화 및 CVR 극대화를 위한 실시간 통합 최적화 제어 방식을 제안하고 있다. 그러나, 제안한 방식들은 추정된 부하가 정확하다는 가정하에 그 계산 방식을 제시한 것으로 실제 배전계통 운영시에는 실제 계통의 부하를 반영하는 것이 쉽지 않다. 또한 전역 최적해 방식을 사용함으로써 배전계통내의 제어기기에 주기적으로 많은 제어 신호를 야기 시킴으로써 실제 운영시에 적용이 쉽지 않은 단점이 있다.

이와 같은 문제점을 극복하기 위해, 본 논문에서는 부하 추정 없이 계측된 전압 정보와 토폴로지 정보만을 이용하여 각 제어기기의 CVR 제어 지령치를 결정하는 측정전압 기반 전압/무효전력 협조제어(voltage measurement-based coordinated Voltage/VAR control, VMCVVC) 알고리즘을 제안한다. 이종의 제어기기 간 제어역할 분담을 통해 연산자체를 단순화한 방식을 제안하였다. 제안 방식은 크게 세 부분으로 구성된다. 첫째, 복잡한 연산을 완화하기 위해 토폴로지 처리를 통한 제어기기와 계측 모선간의 식별을 수행하며 최종적으로 제어 구간을 분리한다. 둘째, 계통의 전압을 계통 운영 전압 범위 안에서 최소로 유지하도록 하기 위해 무효전력 제어기기를 이용한 구간 전압의 평활화를 수행한다. 셋째, 최종적으로 LTC 변압기와 같은 전압 제어기기를 이

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Chonnam National University, Korea
E-mail: drk9034@jnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University,
Korea

Received : October 7, 2017; Accepted : November 23, 2017

용한 CVR을 수행한다. 상하위 전압 제어기간의 협조 제어를 위해 하위 구간의 전압 제어 여유를 반영하여 상위 구간의 전압 제어 해가 도출되도록 하였다. 또한 계통의 전압 위배가 발생할 경우, 전압 위배 우선순위 기준에 따라 계통의 전압을 제어하도록 하였다.

본 논문의 제 2장에서는 기존의 CVR 제어기법의 문제점을 분석하였다. 제 3장에서는 제안한 계측기반의 협조제어 CVR 방식의 알고리즘을 요약하였다. 제 4장에서는 모의 계통에 대한 사례 연구를 수행하였다. 기존 방식들과의 비교분석을 통해 제안한 알고리즘의 정확도를 입증하였다.

2. 기존 CVR 제어 기법의 문제점

CVR 제어 기법은 계측기반의 LDC 방식과 부하 추정에 의한 전역최적해 도출 방식으로 구분할 수 있다.

LDC 방식은 변전소 주변압기의 OLTC(on-load tap changer) 제어방식으로 널리 사용되고 있으며, CVR 목적으로도 쉽게 구현이 가능하다는 장점이 있으나 배전계통의 부하변동, 토폴로지 변경, 분산전원 등의 영향 및 실제 운영시의 여유도 확보 문제 등으로 많은 CVR 효과를 기대하기 어렵다는 단점이 있다.

부하 추정에 의한 조류계산 기반의 전역 최적화 제어기법은, 고/저압 수용가의 kW 추정치 또는 변압기 설치 용량 등을 이용하여 배전계통의 특정 지점(피더 인출단 또는 원격 제어가능 개폐기)의 계측 값을 분배하여 각 구간의 부하를 추정하고 이를 이용한 조류계산 기반의 전역 최적해 도출 기법을 통해 제어 해를 도출하는 방식이다. 이 방식은 LDC 제어 기법에 비해 극대화된 CVR 효과를 얻을 수 있다는 장점이 있으나 두 가지 문제점이 존재한다. 하나는 부하 추정과정의 오차를 무시한다는 점이다 [11]. 피더 인출단의 계측 전력을 분배하는 방식은 그 분배 기준에 따라 구간별 부하가 상이할 수 있으며 무엇보다도 그 값이 제어하려고 하는 현재의 실제값과는 차이가 있을 수 밖에 없다는 것이다. 원격 제어가능 개폐기 단위의 측정치를 사용하는 경우 역시 구간 내의 부하의 분포 문제가 있으며 계측기기 자체의 정밀도 문제도 있을 수 있다. 최근에는 저압측에 AMI의 계측 정보를 이용할 수 있는 가능성이 높아지고 있으나 배전변압기 단위 또는 특정 구간 부하 단위로 그 측정치를 합산하는 과정에서 구간 내 손실을 무시할 수밖에 없으며 측정데이터의 동시성 문제도 존재한다. 따라서 부하 추정방식은 실제부하와의 오차가 발생할 수밖에 없으며 전역 최적해 도출방식은 추정된 부하가 참값이라고 가정하여 구해진 제어 값이므로 부하 추정의 오차는 제어 지령치 자체의 신뢰도에 많은 영향을 줄 수밖에 없다. 또한 특정 계측 시점의 정보를 이용하여 전역 최적화 방식으로 제어 지령치를 결정하는데는 수십초에서 수분의 시간이 요구되어진다. 이는 구해진 최적의 제어 지령치가 적용되는 시점의 부하가 달라질 수 있어 실제 부하에 적합한 제어 지령치가 적용되지 못할 수 있다.

부하 추정의 오차에 의한 전압 제어기기 지령치 계산의 영향을 확인하기 위해 그림 1은 간단한 배전계통을 모의하였다. 모의 계통은 하나의 주 급전선에 OLTC와 SVR(step voltage regulator)

이 1대씩 설치되어 있고 2기의 DG이 연계되어 있는 계통이다. 총 유효전력 1.9489MW, 총 무효부하 1.2300Mvar의 부하를 임의로 배분하여 실제 부하로 산정하였다. 비교를 위해 각 부하를 랜덤 함수를 이용하여 $\pm 5\%$ 오차를 적용하였다. 실제부하를 가정하고 오차 $\pm 5\%$ 가 적용된 부하는 부하 추정으로 구해진 부하로 가정하였다.

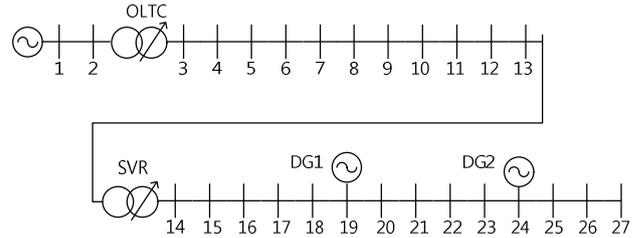


그림 1 부하 추정 오차의 영향 확인을 위한 모의계통
Fig. 1 Test network for load calculation error

그림 2는 기본 부하와 $\pm 5\%$ 의 편차가 있는 부하를 이용한 최적해의 전압 프로필을 비교하였다. 본 논문에서는 초기 부하 조건에 대해 모든 제어기기의 단위 제어 간격(DG의 경우 무효전력 제어 간격, 전압 제어기기의 경우 탭 위치)을 가변하면서 반복적인 조류계산을 수행하여 최적해를 선택하였다. 그림 2의 결과에서 알 수 있듯이 약간의 부하추정 오차에 대해서도 상이한 전압 제어 결과를 보임을 알 수 있다.

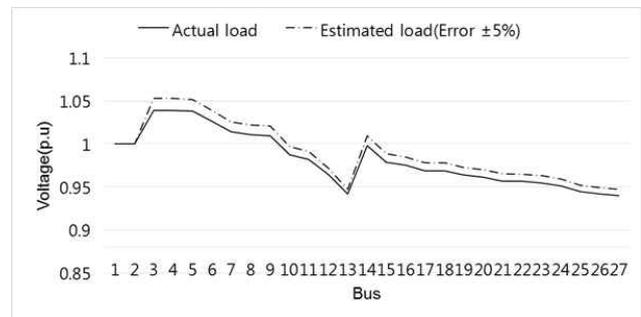


그림 2 모의 계통에 대한 부하 산정 오차의 영향
Fig. 2 Effect of load calculation error for test network

3. 계측기반 CVR 협조제어 알고리즘

본 논문에서 제안하는 VMCVVC 알고리즘의 개념을 그림 3에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 단순 탭 제어만으로는 전압 프로필을 평탄화(탭(tap) 제어기기와 무효전력 제어기간 협조제어를 통해)하는 경우에 비해 제어효과가 적음을 알 수 있다. 무효전력 제어 지령값은 구분된 각 구역별로 모선의 전압을 평탄화하는 것을 목적으로 결정되기 때문에 그림 3과 같이 무효

전력 제어기기 연계점의 전압이 그 구역의 변압기 2차측 모선의 전압과 동일하게 되는 무효전력 값을 내도록 결정한다.

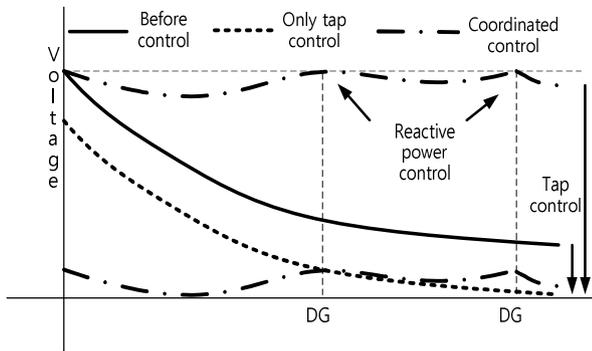


그림 3 VMCVVC의 CVR 제어 개념
Fig. 3 CVR concept of proposed VMCVVC

제안하는 알고리즘은 배전시스템의 계측된 전압을 이용하여 전압 제어기기의 전압 제어 지령치를 결정한다. 그림 4는 제안된 알고리즘의 전체 흐름도를 나타내고 있다.

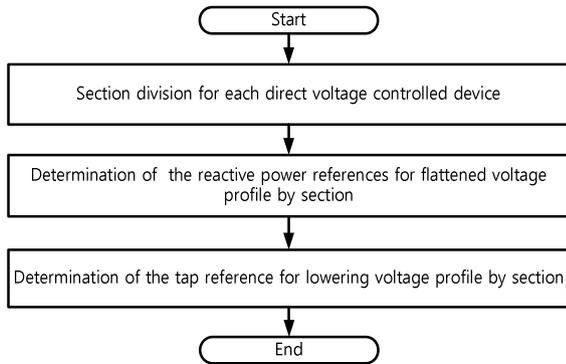


그림 4 제안하는 알고리즘의 전체 흐름도
Fig. 4 Overall flow chart of the proposed algorithm

제안하는 알고리즘은 크게 세부분으로 나눌 수 있으며, 첫 번째는 배전시스템의 직접전압 제어기기(탭 제어기기)별로 제어구역을 분할하는 과정이다. 두 번째는 각 제어구역의 전압평탄화를 위한 DG 및 SVC(Static VAR compensator)와 같은 무효전력 제어 지령치를 계산하는 부분이다. 배전시스템의 전압 제어기기들은 각 제어기기의 전압제어 특성이 있어 제어 후의 전압을 선형적으로 예측이 가능하다. 무효전력 제어기기들은 전압프로필을 평탄화하도록 제어하여 시스템의 전압 운영 범위 안에서 최대한 낮게 전압을 낮출 수 있다. 마지막으로 각 제어구역의 CVR 제어를 위한 직접전압 제어기기의 지령치를 계산하는 부분이다. 탭 제어기기들은 하위 전압 전체 제어가 가능하므로 운영 범위 안에서 최소 전압이 되도록 낮춘다.

3.1 직접전압 제어기기 별 제어구역 분할

탭 제어방식의 직접전압 제어기기는 상위의 탭 변동은 하위(부하측) 구역 전압에 영향이 있지만, 하위의 탭 변동은 상위(전원측) 구역 전압에 영향이 거의 없는 특성을 지닌다. 본 논문에서는 이러한 특성을 이용하여 직접전압 제어기기 별로 제어구역을 분할하여 CVR 제어를 수행하는 방안을 제시하였다. 이는 연산의 단순화를 통해 제안하는 CVR 방식의 현장 적용성을 높여려는 의도이다.

제어구역 분할을 위해 다음과 같은 토폴로지 처리과정을 수행한다. 우선 계통 전체의 직접전압 제어기기를 검색하면서 계통 내 존재하는 직접전압 제어기기의 전체 수를 파악한다. 파악된 직접전압 제어기기의 2차측 모선부터 다음 모선에 연결된 선로 정보를 확인한다. 선로가 직접전압 제어기기인 경우는 현재 구역의 직접전압 제어기기와 관계를 짓는다. 연속적으로 다음 모선을 찾아가면서 모든 모선을 검색한다. 선로가 없는 경우, 즉 말단 모선은 검색을 종료하고 다음 직접전압 제어기기 구역을 검색한다. 모든 직접전압 제어기기 별 구역을 위의 과정으로 처리하고 종료한다.

그림 5는 직접전압 제어기기 제어영역 기준으로 구역을 구분한 간단한 예를 보였다. Tr1의 영역에는 1, 2, 3번 모선이 포함되며 Tr2는 4, 5번 모선이 소속되어진다. 나머지 전압 제어기기와 모선들도 구역별로 구분되어진다. 구역 구분과 함께 직접전압 제어기기들간의 상하 관계가 정의된다. 제어 지령치는 구분된 구역별로 연산되며 각 구역의 소속된 제어기기만으로 연산을 하기 때문에 연산을 단순화할 수 있다.

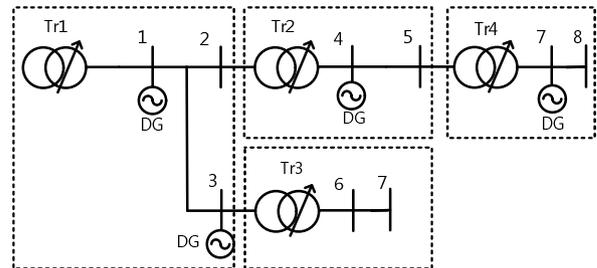


그림 5 직접전압 제어기기 별 제어구역 분할
Fig. 5 Area classification by voltage control device

3.2 전압 평탄화를 위한 무효전력 제어기기 제어

시스템의 전압을 제어하기 위한 무효전력 제어의 중요한 요소는 모선의 민감도가 있다. 모선의 민감도는 선로 파라미터와 네트워크 토폴로지에 의한 네트워크 임피던스로부터 결정된다. DER 연계점 모선의 유효전력(P)과 무효전력(Q)의 변화에 대한 민감도로 자코비안(Jacobian) J 의 행렬로 나타낼 수 있다. 전압 크기 및 위상각은 특정 DG 모선에서 P 와 Q 의 변화에 따라 변하는 상태 변수이다. 민감도 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial \delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (1)$$

무효전력에 대한 전압 민감도 행렬 $[\partial V/\partial P]$ 과 무효전력에 대한 전압 민감도 행렬 $[\partial V/\partial Q]$ 은 각각 DER 연계점 모선에서 P 와 Q 변화로 인한 모선 전압 변동을 나타낸다. 각 서브 행렬에는 크기가 $n \times n$ 이며, n 은 계통의 모선의 수이다. j 번 모선에서의 DER Q 의 변동으로 인한 모든 모선의 전압 변화는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta V_i = \left[\frac{\partial V_i}{\partial Q_j} \right] \cdot \Delta Q_j^{DG} \quad (2)$$

여기서, i 는 모선 번호, j 는 DG 연계점 모선 번호, ΔQ_j^{DG} 는 j 번 모선에 연계된 DG무효전력 출력 변동 지령치이다. ΔV_i 와 $[\partial V/\partial Q]$ 은 $n \times 1$ 의 크기를 갖는다.

무효전력에 대한 전압 민감도를 이용하여 구역내 전압 민감도를 구할 수 있다. 앞서 구분된 구역별로 무효전력 지령치 연산을 위해 구역별 민감도 행렬을 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 이는 무효전력 제어기기 연계점 모선 전압과 변압기 2차측 모선 전압과 같아지도록 하는 무효전력을 구하는 것이기 때문에 무효전력 연계점 모선 전압 민감도에서 변압기의 2차측 모선 전압 민감도의 차가 구역내 민감도가 된다. DER의 연계점 모선 전압을 변압기 2차측 모선 전압과 같아지도록 하는 분산전원의 무효전력 지령치는 다음과 같이 결정한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{j,1}^{DG} \\ \vdots \\ \Delta Q_{j,m}^{DG} \end{bmatrix} = KX_k^{-1} \begin{bmatrix} V_{i,k}^{TR} - V_{j,1}^{DG} \\ \vdots \\ V_{i,k}^{TR} - V_{j,m}^{DG} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$KX_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{j,1}^{DG}}{\partial Q_{j,1}^{DG}} & \frac{\partial V_{i,k}^{TR}}{\partial Q_{j,1}^{DG}} & \frac{\partial V_{j,1}^{DG}}{\partial Q_{j,m}^{DG}} & \frac{\partial V_{i,k}^{TR}}{\partial Q_{j,m}^{DG}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial V_{j,m}^{DG}}{\partial Q_{j,1}^{DG}} & \frac{\partial V_{i,k}^{TR}}{\partial Q_{j,1}^{DG}} & \frac{\partial V_{j,m}^{DG}}{\partial Q_{j,m}^{DG}} & \frac{\partial V_{i,k}^{TR}}{\partial Q_{j,m}^{DG}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, k 는 변압기 기준으로 구분된 구역번호, m 은 구역에 소속된 DG의 총 수, $V_{i,k}^{TR}$ 변압기 2차측 모선 전압, $V_{j,m}^{DG}$ 분산전원이 연계된 모선 전압, $\partial V_{j,m}^{DG}/\partial Q_{j,m}^{DG}$ j 번 모선에 연계된 분산전원의 무효전력에 대한 연계점 전압 민감도, $\partial V_{i,k}^{TR}/\partial Q_{j,m}^{DG}$ j 번 모선에 연계된 분산전원의 무효전력에 대한 k 구역 변압기 2차측 i 번 모선 전압 민감도, KX_k 는 k 구역내 무효전력에 대한 전압 민감도 행렬이다.

구역 내에서 무효전력 지령치를 결정하는 것은 다음과 같다. 입력으로 현재 계측된 전압 정보가 입력되고 계측된 전압을 이용하여 식 (3)을 이용하여 각 무효전력 지령치를 결정한다. 무효전

력 제어 지령치가 제약조건을 위배하는 경우에는 무효전력 제어 지령치를 제약조건으로 고정한다. 결정된 무효전력 지령치를 이용하여 식 (2)와 같이 계통의 전압 변화를 예측할 수 있다. 무효전력 출력 변동(ΔQ_j^{DG})이 허용 범위 내가 될 때까지 위 과정을 반복하고 허용범위를 만족하면 무효전력 제어 지령치 연산을 종료한다.

3.3 제어구역 별 CVR 제어

무효전력 제어를 통한 전압 평탄화 후 직접전압 제어기기 제어구역 별 CVR 제어를 수행한다. CVR을 위한 제어 지령치 연산의 흐름도를 그림 6에 도시하였다.

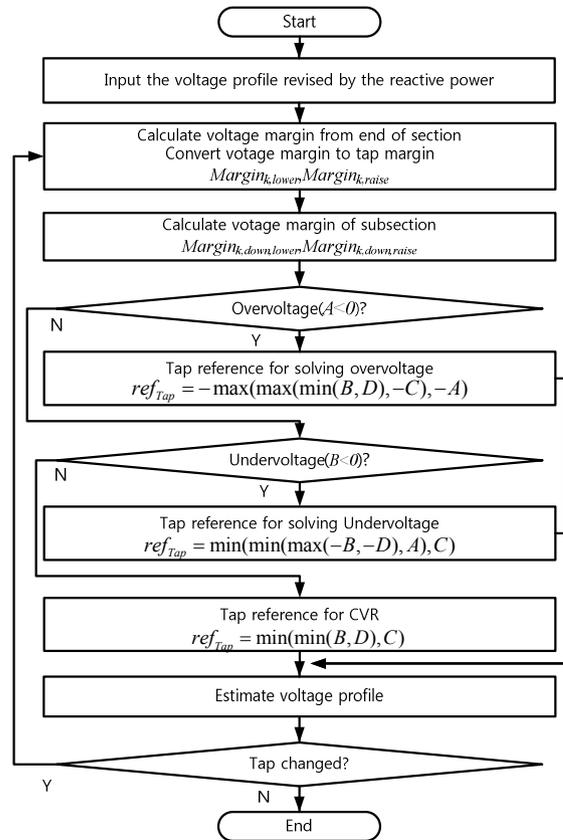


그림 6 직접전압 제어기기 CVR 제어 플로우 차트
Fig. 6 Flow chart of CVR control by voltage control device

전압 평탄화를 위한 무효전력 지령치가 적용된 계통에 대해 직접전압 제어기기의 지령치를 연산해야 하므로 조정된 무효전력이 반영된 전압이 필요하다. 각 구역의 최고, 최저 전압을 이용하여 각 구역의 전압 여유를 계산한다. 제안하는 알고리즘은 탭 변동 여유를 구하기 위해 직접전압 제어기기 탭 변동치를 식 (5) 및 식 (6)과 같이 적용하였다.

$$Margin_{k,lower} = \begin{cases} \text{floor}(\frac{\min(V_{i,k}) - V_{min,limit}}{\Delta tap_k}) \times \Delta tap_k & \min(V_{i,k}) \geq V_{min,limit} \\ \text{ceil}(\frac{\min(V_{i,k}) - V_{min,limit}}{\Delta tap_k}) \times \Delta tap_k & \min(V_{i,k}) < V_{min,limit} \end{cases} \quad (5)$$

$$Margin_{k,raise} = \begin{cases} \text{floor}(\frac{V_{max,limit} - \max(V_{i,k})}{\Delta tap_k}) \times \Delta tap_k & V_{max,limit} \geq \max(V_{i,k}) \\ \text{ceil}(\frac{V_{max,limit} - \max(V_{i,k})}{\Delta tap_k}) \times \Delta tap_k & V_{max,limit} < \max(V_{i,k}) \end{cases} \quad (6)$$

여기서, $Margin_{k,lower}$ 과 $Margin_{k,raise}$ 는 각각 k 구역의 전압상승 및 하강의 여유분을 의미하며, $V_{i,k}$ 는 k 구역 내 i 번 모선의 전압을 나타낸다. 또한 $V_{min,limit}$ 과 $V_{max,limit}$ 는 배전계통의 운영 최저 전압 및 최고 전압을 의미하며, Δtap_k 은 k 구역 직접전압 제어기의 1탭당 전압 변동치이다.

직접전압 제어기 제어는 하위 구역 전체에 영향을 주기 때문에 하위 구역의 전압 여유를 고려하여야 한다. 하위 구역의 전압 여유를 반영하기 위하여 전압 여유를 구하는 순서는 말단 구역부터 연산을 한다. 하위 구역 전압 여유를 반영하는 것은 하위 구역에서 제어할 수 있는 여유까지 반영하여야 하기 때문에 식 (7) 및 식 (8)과 같이 탭 여유를 구할 수 있다.

$$tapstep_{k,lower} = tap_{k,max} - tap_{k,state} \quad (7)$$

$$tapstep_{k,raise} = tap_{k,state} - tap_{k,min} \quad (8)$$

여기서, $tapstep_{k,lower}$ 과 $tapstep_{k,raise}$ 는 각 구역의 상승 및 하강 탭 전압 여유 값이다. 또한 $tap_{k,max}$, $tap_{k,min}$ 및 $tap_{k,state}$ 은 각각 변압기 최대, 최소 및 현재 탭 위치이다. 탭 여유까지 반영된 하위 구역 전압 여유는 식 (9) 및 식 (10)과 같다. 이 식의 구역 별 전압 여유는 상위의 전압 지령치를 결정할 때 적용된다.

$$Margin_{k,down,lower} = margin_{k,lower} + tapstep_{k,lower} \times \Delta tap_k \quad (9)$$

$$Margin_{k,down,raise} = margin_{k,raise} + tapstep_{k,lower} \times \Delta tap_k \quad (10)$$

탭 제어기 최종 지령치를 구할 때는 최상위 직접전압 제어 기기부터 하나씩 연산한다. 탭 지령치 연산의 운영 범위 내에서 운전되어야 하므로 제약 조건으로는 과전압, 저전압이 발생하지 않도록 탭 지령치를 구한다. 우선 순위로는 과전압 해소, 다음 순위로는 저전압 해소이다. 과전압과 저전압이 없을 때에는 전압 상·하한치 안에서 전압이 가장 낮게 유지하도록 하는 탭 지령치를 구한다. 상·하한 모두 위배하는 경우는 하한 제약을 무시하는 것으로 한다. 탭 지령치를 구할 때 그림 7에 나오는 4가지의 전압 값을 이용하여 구할 수 있다. A점은 현재 구역의 올릴 수 있는 여유, B점은 현재 구역의 내릴 수 있는 여유, C점은 하위 구역의 올릴 수 있는 여유, D점은 하위 구역의 내릴 수 있는 여유로 정의할 수 있다. 우선, 제어 지령치는 과전압이 발생하는 경우 ($A < 0$), 식 (11)을 이용하여 결정한다. 다음으로 저전압만 발생하는 경우, 식 (12)를 이용하여 결정한다. 마지막으로 과전압과

저전압이 없을 경우, 식 (13)으로 결정한다. 예를 들면 그림 7은 전압위배가 없는 상황으로 식 (13)을 적용할 수 있으며 최종적으로 B의 크기가 C보다 작기 때문에 $ref_{Tap} = -B$ 가 도출된다. 만약 말단 구역의 전압 지령치를 구할 경우 C와 D가 존재하지 않으므로 A와 B만으로 변압기 탭 지령치를 결정한다.

$$ref_{Tap} = -\max(\max(\min(B,D), -C), -A) \quad (11)$$

$$ref_{Tap} = \min(\min(\max(-B,-D), A), C) \quad (12)$$

$$ref_{Tap} = -\min(\min(B,D), C) \quad (13)$$

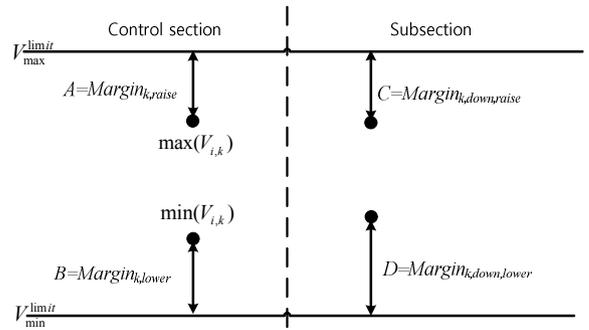


그림 7 탭 지령치 연산을 위한 여유

Fig. 7 Margin for tap reference calculation

4. 사례연구

제안하는 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 배전계통의 전압 운영 범위는 $\pm 6\%$ 로 설정하였다. 배전계통에 설치된 OLTC는 제어 범위가 ± 8 탭으로 한 탭당 0.0125(p.u)를 제어 가능하고 SVR은 ± 16 탭으로 한 탭당 0.00625(p.u)를 제어 가능하다. 시뮬레이션 대상 계통은 69 모선 배전계통을 이용하였다 [14]. 총 부하는 유효전력 3.7919MW, 무효전력 2.6914Mvar이다. 기존의 제어 방식들과 비교를 통해 제안하는 알고리즘을 검증하였다. 69 모선 배전계통을 그림 8과 같이 수정하여 모의 계통을 구성하였다. 표 1은 계통의 설치된 DG의 정보를 나타내고 있고 OLTC와 SVR은 제어 가능하다. 기존의 제어 방식들과 비교를 통해 제안하는 알고리즘의 효용성을 검증하였다. 시뮬레이션에 사용된 LDC 제어 기법은 기존의 전형적인 LDC 제어 기법을 적용하였으며 '전역최적'은 전수조사를 통해 평균 전압이 가장 낮게

표 1 DG 출력 정보

Table 1 DG output information

Bus	Type	Active power (MW)	Reactive power maximum limit (MVar)	Reactive power minimum limit (MVar)
19	DG1	0.05	0.12	-0.12
24	DG2	0.05	0.12	-0.12

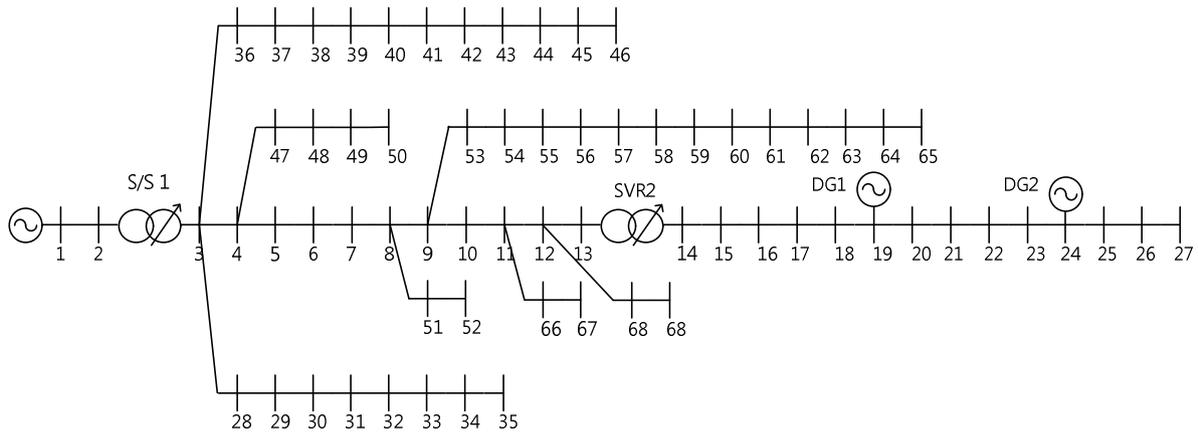


그림 8 수정된 69모선 배전계통
 Fig. 8 Modified 69 buses distribution network

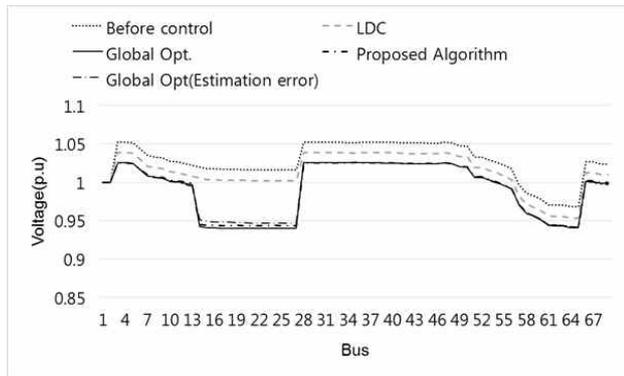


그림 9 시뮬레이션 결과 (전압 프로파일)
 Fig. 9 Simulation results (voltage profile)

하는 제어 지령치를 구하였다. ‘전역최적(오차율)’은 실제 부하를 ±5% 오차를 적용하여 부하 추정 오차를 적용하였다.

그림 9는 각 기존 제어 방식과 제안하는 알고리즘의 제어 결과를 그래프로 나타내었다. ‘기본’은 제어하기 전 계통의 전압프로필을 나타내고 ‘LDC’ 기존 제어 방식이 LDC 기법을 이용하여 제어할 경우 전압프로필을 나타낸다. ‘전역 최적’은 조류계산 기반의 전역 최적화를 통해 구해진 결과를 나타내며 ‘전역최적(오차율)’은 부하 추정에서 5% 오차율이 발생할 경우 조류계산 기반으로 최적 제어 지령치를 구한 후 전압 프로필을 나타낸다. 그림에서 보듯이 기존 LDC 기법에 비해 제안하는 알고리즘과 조류계산 기반의 최적화 기법이 효과가 좋은 것으로 확인된다. 이는 LDC 제어기법은 다른 기법에 비해 전압프로필을 최저 전압에 가깝게 유지하지 않는 것을 볼 수 있다. 제안하는 알고리즘과 조류계산 기반의 최적화 기법과 거의 동일한 결과를 도출하였지만 제어 결과는 최적화 기법에 비해 효과가 낮은 것을 볼 수 있다. 부하 추정 오차율이 적용되었을 경우에는 실제 부하와의 오차율 때문에 최적의 결과와 다른 결과를 도출하는 것을 확인하였다. 제안하는

표 2 시뮬레이션 결과 (제어 지령값 및 CVR 효과)
 Table 2 Result of simulation (Control values and CVR effect)

Method	기기	reference	CVR 효과(MW)
LDC	OLTC	+3 tap	0.0272
	SVR	0 tap	
	DG1	0 Mvar	
	DG2	0 Mvar	
전역최적	OLTC	+2 tap	0.0597
	SVR	-9 tap	
	DG1	0.01 Mvar	
	DG2	0.09 Mvar	
알고리즘	OLTC	+2 tap	0.0581
	SVR	-9 tap	
	DG1	0.12 Mvar	
	DG2	0.12 Mvar	
전역최적(오차율)	OLTC	+2 tap	0.0579
	SVR	-7 tap	
	DG1	-0.035 Mvar	
	DG2	-0.09 Mvar	

알고리즘은 계측된 전압값만을 이용하여 연산하기 때문에 부하 추정에 의한 영향이 없이 동일한 결과를 도출하였다.

표 2는 각 제어 기법에 의해 결정된 제어 지령치를 나타내고 있다. CVR 효과는 CVR factor가 0.5일 때 저감되는 전력을 나타낸다. 표에서 보듯이 제안하는 알고리즘이 오차율이 적용된 전압 제어 방식에 비해 더 효과가 큰 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 부하 추정에 의한 조류계산 기반 전압제어 기법의 문제점을 파악하고 이를 보완하기 위해 계측된 전압을 직접

적으로 활용하여 배전계통의 전압을 제어하는 방안을 제시하였다. 제안하는 알고리즘은 분산전원과 같은 무효전력제어기와 직접전압 제어기기와의 협조제어를 통해 CVR 효과를 높이도록 개발되었다. 복잡한 연산을 완화하기 위해 계통을 제어가능한 직접전압 제어기기 단위로 구분하고, 계통의 전압을 계통 운영 전압 범위 안에서 최소로 유지하도록 하기 위해 무효전력 제어기기는 계통의 전압을 평탄화한 후 최종적으로 직접전압 제어기기를 이용한 계통 운영 최저 전압 제어를 수행하는 협조제어 방식을 제안하였다. 계통의 전압 위배에 대한 제어 방안으로 전압 위배 우선순위 기준에 따라 계통의 전압을 제어한다. 시뮬레이션을 통해 실제 부하와 부하 추정 오차가 적용된 최적 전압 제어 지령치가 다름을 확인하였으며 제안하는 알고리즘이 최적 전압 제어에 가깝게 결정되는 것을 확인하였다.

본 연구를 배전계통의 실시간 전압 제어에 활용할 수 있으며 CVR 제어를 통해 배전계통의 운영 효율을 향상할 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

이 논문은 전남대학교 학술연구비(과제번호: 2016-2657) 지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] J. C. Erickson and S. R. Giligan, "The effects of voltage reduction on distribution circuit loads," IEEE Trans on PAS, vol. PAS-101, no. 7, pp. 2014-2018, July 1982.

[2] D. Kirschner and P. Ciorsetto, "Statistical tests of energy savings due to voltage reduction," IEEE Trans on PAS, vol. PAS-103, no. 6, pp. 1205-1210, June 1984.

[3] D. Kirshner, "Implementation of conservation voltage reduction at Commonwealth Edison," IEEE Trans on PWRs, vol. 5, no. 4, pp. 1178-1182, November 1990.

[4] D. Lauria, "Conservation voltage reduction (CVR) at Northeast utilities," IEEE Trans on PWRD, vol. 2, no. 4, pp. 1186-1191, October 1987.

[5] J. D. Steese, S. Merrick, and B. Kennedy, "Estimating methodology for a large regional application of conservation voltage reduction," IEEE Trans on PWRs, vol. 5, no. 3, pp. 862-870, August 1990.

[6] A. Dwyer, R. E. Nielsen, J. Stangl, and N. S. Markushevich, "Load to voltage dependency tests at BC Hydro," IEEE Trans on PWRs, vol. 10, no. 2, pp. 709-715, May 1995.

[7] Z. Wang and J. Wang, "Review on implementation and assessment of conservation voltage reduction," IEEE

Trans on PWRs, vol. 29, no. 3, pp. 1306-1315, May 2014.

[8] T. Wilson and D. Bell, "Energy conservation and demand control using distribution automation technologies," Rural Electric Power Conf., pp. C4-1-12, 2004.

[9] R. Neal, "The use of AMI meters and solar PV inverters in an advanced Volt/VAr control system on a distribution circuit," IEEE PES Transmission and Distribution Conf., pp. 1-4, 2010.

[10] M. Manbachi et al., "Real-time adaptive VVO/CVR topology using multi-agent system and IEC 61850-based communication protocol," IEEE Trans on SE, vol. 5, no. 2, pp. 587-596, May 2014.

[11] A. Arif et al., "Load modeling-A Review," IEEE Trans on SG, vol. PP, pp. 1-13, 2017.

[12] R. Caldon, S. Spelta, V. Prandoni, and R. Turri, "Co-ordinated voltage regulation in distribution networks with embedded generation," 18th Int. Conf. Exhibit. Elect. Distrib., pp. 1-4, 2005.

[13] F. Bignucolo, R. Caldon, and V. Prandoni, "Radial MV networks voltage regulation with distribution management system coordinated controller," EPSR, vol. 78, no. 4, pp. 634-645, June 2008.

[14] K. Prasad, N. C. Sahoo, A. Chaturvedi and R. Ranjan, "A simple approach in branch current computation in load flow analysis of radial distribution systems," Int. Jr. for Elec. Engi. Edu., vol. 44, no. 1, pp. 49-63, May 2007.

저 자 소 개



고 석 일 (Go Seok-II)

1984년 3월 30일생. 2010년 전남대학교 전기공학과 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
E-mail : riseisgood@nate.com



최 준 호 (Choi Joon-Ho)

1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대학교 전기공학과 교수.
E-mail : joono@chonnam.ac.kr



안 선 주 (Ahn Seon-Ju)

2002년 서울대학교 전기공학과 졸업.
2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
현재 전남대학교 전기공학과 부교수.
E-mail : sjahn@jnu.ac.kr



윤 상 윤 (Yun Sang-Yun)

2002년 숭실대학교 대학원 졸업(박사).
2009년 LS산전 전력연구소 책임연구원.
2016년 한전 전력연구원 책임연구원.
현재 전남대학교 전기공학과 부교수.
E-mail : drk9034@jnu.ac.kr