

지역 계통 구성과 Integer programming을 이용한 전압 및 무효전력 제어방안 연구

論 文

57-4-2

A Study on Voltage and Reactive Power Control Methodology using Integer Programming and Local Subsystem

金泰均* · 崔倫赫[†] · 徐湘受** · 李炳峻**
(Tae-Kyun Kim · Yun-Hyuk Choi · Sang-Soo Seo · Byong-Jun Lee)

Abstract - This paper proposes an voltage and reactive power control methodology, which is motivated towards implementation in the Korea power system. The main voltage control devices are capacitor banks, reactor banks and LTC transformers. Effects of control devices are evaluated by local subsystem's cost computations. This local subsystem is decided by 'Tier' and 'Electrical distance' in the whole system. The control objective at present is to keep the voltage profile within constraints with minimum switching cost. A robust control strategy is proposed to make the control feasible and optimal for a set of power-flow cases that may occur important event from system. This studies conducted for IEEE 39-bus low and high voltage contingency cases indicate that the proposed control methodology is much more effective than PSS/E simulation tool in deciding switching of capacitor and reactor banks.

Key Words : Voltage control, Integer programming, Optimization, Local subsystem

1. 서 론

경제가 성장함에 따라 부하는 지속적으로 증가되고, 이에 따라 계통은 한계 운전조건 가까이에서 운전하게 되며, 동시에 전력계통의 규제완화에 따라 계통 운전 조건의 불확실성은 더욱 높아지고 있다. 또한 최근 구미 선진국에서 빈발하고 있는 대형 정전사고는 무효전력 수급 불균형에 의한 계통의 전압불안정에 기인한다. 무효전력은 주파수와 달리 국지적인 특성을 가지므로 과거에는 적절한 지침에 의거하여 무효전력 제어기기 설치개소에서 국부적인 조작으로 운용되었다. 이러한 문제로 인하여 현대 전력계통에 있어서 전압 제어는 경제적 운영과 안전도 확보라는 측면에서 매우 중요한 문제로 대두되고 있고, 계통 전압의 자동제어가 중요해졌다.

계통 전압의 자동제어는 전력계통에 고장이 발생한 이 후 송전계통의 전압을 매우 빨리 정상운전 값으로 회복하고, 무효전력 예비력을 지속적으로 관리하여 전압붕괴 발생의 예방을 위한 무효전력 운전여유를 증가시키므로 계통의 전압 안전도를 개선시킬 뿐만 아니라, 계통 전압을 최적 운전점 근처에서 운전토록 하여 계통 손실을 저감시키는 역할을 한다. 그러나 계통에는 다양한 형태의 전압제어 설비가 비선형적인 상호작용을 하고 있으므로 실제의 대규모 전력계통

에 전압제어 문제를 적용, 적절한 제어효과를 얻는 데에는 상당한 어려움이 있다.

최근 컴퓨터와 통신망의 비약적인 발전에 따라 협조제어 내지는 통합제어가 가능해져 유럽의 여러 선진국에서는 각국의 계통 특성에 따라 1차적 전압제어(Primary Voltage Control: PVC)는 물론 2차적 전압제어(Secundary Voltage Control: SVC)와 3차적 전압제어(Tertiary Voltage Control: TVC)의 계층적 전압제어방식을 개발하여 80년대 말부터 운영하고 있다[1]. 발전기를 이용하여 계통전압을 제어하는 Fast Voltage Control 방식으로 독립적인 전압제어를 시행하기 위해 전력계통을 몇 개의 작은 전압제어 지역으로 구분하고, 각 전압지역에 전압제어 기준모선(Pilot bus)을 설정, 이의 전압을 일정치 이내로 유지하기 위하여 전압지역 내에 있는 발전기의 단자전압을 협조 제어하는 것이다[2]. 그러나 현대 전력계통의 구조가 전기적으로 더욱 더 복잡화되고 있으므로 전력계통을 몇 개의 독립적인 전압제어 지역으로 구분하고 하나의 기준 모선으로 각 전압지역의 모선들을 제어하는 것은 상당한 어려움이 있다. 북미의 BPA (Bonneville Power Administration)에서는 유럽과는 달리 변압기 탭과 STACON을 이용한 전압제어 방식을 개발 2000년 초부터 운전 중에 있다. 변압기 탭 및 STACON과 같은 느린 동작 특성을 갖는 무효전력 제어 설비들을 이용하여 계통전압을 자동 제어하는 Slow Voltage Control 방식으로 계통을 몇 개의 독립적인 전압제어 지역으로 나누지 않고, 전체 계통 대상으로 전압제어를 시행하고 있다.

효과적인 무효전력 관리는 우선 무효전력 설비투자의 저감과 최근 선진각국에서 발생하고 있는 전압붕괴를 예방할 수 있으며, 무효전력 손실의 저감과 궁극적으로는 송전용량의 증대에도 기여한다. 또한 모든 버스의 전압을 규정이하로 자동 조정함으로써 전압의 질적 향상에도 직접적으로 커

* : 韓電 電力研究院 責任研究員

** : 高麗大 工大 電氣工學科 博士課程

** : 高麗大 工大 電氣工學科 教授

[†] 교신저자, : 高麗大 工大 電氣工學科 博士課程

E-mail : lover9000p@korea.ac.kr

接受日字 : 2007年 11月 4日

最終完了 : 2008年 2月 26日

다란 기여를 하게 된다. 그리고 우리나라 계통의 경우 문제가 되고 있는 부상전력의 융통측면에서도 그 효과가 기대된다.

이에 본 논문에서는 BPA의 운영 방안을 참고하여 느린 동작 특성을 갖는 무효전력 제어 설비들의 특성을 바탕으로 integer programming을 이용하여 전압과 무효전력을 제어하는 방안인 AVC(Automatic Voltage Control)을 제안한다. 본 제어 방안은 기본적으로 SCADA 정보를 이용하여 계통의 전압이 적절한 범위 내에 있는지를 확인한 후, 계통의 전압이 적절한 범위 내에 있지 않다면 이를 정상 운전 범위로 이동시키기 위하여 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터의 제어 효과를 조류계산으로 분석한다. 즉, 계통 운영자가 정한 전압 기준을 벗어나는 모선(전압 위반 모선)이 발생하였을 경우에 지역 계통을 구성하고 integer programming을 이용하여 투입할 무효전력 제어기기(Control Device)를 결정한다[3]. 이때 미리 투입 비용을 정해놓은 여러 후보 제어기기 중에서의 각 제어기기 별로 조류계산을 통해 가장 적은 비용이 소요되는 제어기기 순으로 투입 순서를 결정한다.

2. 본 론

2.1 AVC(Automatic Voltage Control) 구조

전압 자동 제어 방안의 제어 구조는 그림 1과 같다. 본 논문에서 제안하는 제어 방안은 SCADA를 통해서 측정된 데이터와 각 제어기기의 상태를 입력 받고 SCADA 데이터를 상태 추정을 통하여 모델의 상태를 입력 받는다. 이렇게 입력된 데이터를 바탕으로 최적의 무효전력 제어기기의 스위칭 동작을 결정한다. 그리고 계통 운영자에게는 경고 메시지를 통하여 현재 계통의 상황이나 조치 사항 등을 제공하여 주게 된다. 이때 주요한 제어 방안은 동작 특성이 느린 기기의 제어를 수단으로 하며 가능한 제어수단은 다음과 같다.

- 1) 조상설비 스위치 on/off
- 2) 변압기 탭 조정

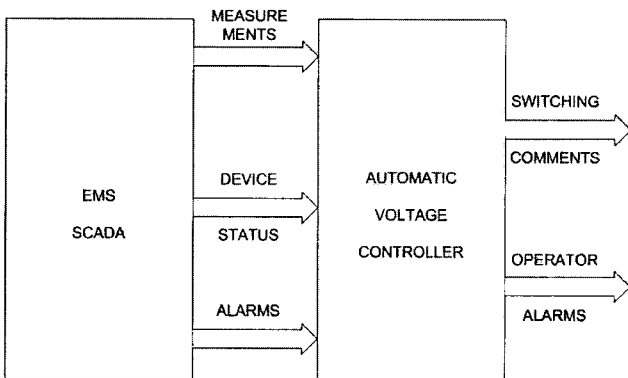


그림 1 AVC 구조
Fig. 1 Automatic Voltage Control Framework

주로 이 두 가지 방안을 통하여 계통의 전압을 일정 수준으로 유지하기 위한 알고리즘을 구현한다. 이러한 제어의 목적은 다음과 같이 여러 가지로 설정될 수 있다. 그러나 본 논문에서는 주로 전압 유지를 목적으로 한다.

- 1) 전압유지
- 2) 스위칭 동작 최소화
- 3) 무효전력 여유 최대화
- 4) 순환 무효전력 조류 완화
- 5) 유효 및 무효전력 손실 감소
- 6) 사고에 대한 무효전력 여유 스크리닝
- 7) 전압 불안정 모니터링

2.2 Integer programming을 이용한 제어기기의 결정

본 논문에서 고려되는 무효전력 제어기기는 셉트 커패시터, 셉트 리액터, 변압기 탭 이렇게 세 가지를 고려한다. 이러한 제어 설비는 다음 식 1에서와 같이 비용함수로 정식화되어 제어기기의 우선순위를 정하게 된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } \sum_{i=1}^n |k_i| C_i + \sum_{m=1}^M p_m [F_m(k_1, \dots, k_n) + \lambda g_{cir,m}(k_1, \dots, k_n)] \quad (1) \\
 & \text{s.t. } \sum_{i=1}^n |k_i| \leq N_{sw} \\
 & k_i \in -1, 0, 1
 \end{aligned}$$

여기서 n은 제어기기의 수, m은 모선의 수, C_i 는 i번째 제어기기의 스위칭 비용 함수, F_m 은 페널티 함수, k_i 는 제어기기 상태, $g_{cir,m}$ 순환 무효조류 페널티 함수, p_m 은 조류계산 결과에 의한 가중치를 의미한다. k_i 가 -1은 커패시터/리액터뱅크의 개방과 변압기 탭의 한 탭 감소를 의미하고, 0은 스위칭이 발생하지 않은 것을 의미하며, +1은 커패시터/리액터뱅크의 투입과 변압기 탭의 한 탭 증가를 의미한다. 비용 C_i 는 커패시터/리액터뱅크와 변압기 탭의 스위칭에 따른 비용으로써, 이 값은 스위칭 동작 후에 증가하게 되며, 커패시터/리액터뱅크와 변압기 탭은 서로 다른 스위칭 비용 C_i 를 갖게 된다. N_{sw} 는 1회 제어가 실시될 때마다 제어동작이 가능한 제어기기의 최대 개수를 나타내고 운영자들은 한번에 두 개 이상의 제어기기가 동작하는 것을 꺼려하기 때문에 보통 1로 둔다. N_{sw} 이 1로 설정되면 k_i 의 i모선은 하나만 선택되어 변할 수 있다. 계통전압 제어 시에 일반적으로 변압기의 유지보수 비용이 커패시터뱅크보다 높으므로, 커패시터/리액터뱅크의 스위칭에 의하여 계통 전압이 원하는 수준으로 제어된다면 변압기 탭 제어는 사용하지 않고, 또한 변압기 탭 제어가 시행되는 경우에도 한번에 한 개의 탭씩만 제어되도록 한다.

이러한 사항들이 정식화에 포함되게 하기 위하여 변압기 탭의 스위칭 비용 C_i 를 커패시터/리액터뱅크의 스위칭 비용보다 더 높게 한다. 커패시터/리액터뱅크 스위칭 시, 가능하다면 커패시터나 리액터뱅크를 계통에 투입하기 전에 이미 투입되어 있는 뱅크를 개방하도록 하여, 항상 전압제어를 위한 커패시터 및 리액터뱅크의 투입가능 수를 최대로 유지토록 한다. 즉, 임의 모선의 전압이 낮은 경우, 커패시터

뱅크를 추가로 투입하기 보다는 이미 투입되어 있는 리액터 뱅크의 개방을 통해 모션전압이 원하는 수준으로 상승할 수 있다면 이를 전압 제어 시에 먼저 고려하도록 한다. 이러한 사항을 비용함수 정식화에 포함토록 하기 위하여, 커패시터/리액터 뱅크의 투입과 개방에 관하여 스위칭 비용 C_i 를 각각 달리하고, 투입시의 비용 C_i 가 개방 시보다 더 높게 한다. 이러한 일련의 과정을 integer programming이라 부르고 각 제어기기 별로 식 (1)과 같은 비용함수로 계산되어지고 계산 결과를 바탕으로 하여 현재 단계에서 제어되어야 하는 제어기기가 선정되게 된다.

2.2.1 제어기기의 우선순위

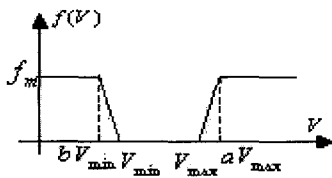


그림 2 페널티 함수
Fig. 2 Penalty Function

앞 절에서 설명 했듯이 제어기기의 우선순위는 제어기기의 페널티 함수에 의하여 결정된다. 다음 그림 2는 제어기기의 페널티 함수를 나타낸다. 그림 2에서 보듯이 전압 유지를 위한 범위가 있고 이 범위 안에서 페널티 함수 값은 0이 되고 그 외의 전압 유지 범위를 벗어나는 경우에 대하여는 즉, aV_{max} ($a > 1$) 보다 높거나, bV_{min} ($b < 1$) 보다 낮다면 매우 큰 값인 f_m 이 페널티 함수 값이 된다. 여기서 V_{max} 와 aV_{max} 사이 그리고 bV_{min} 과 V_{min} 사이는 선형 함수로 정의된다. 이러한 전압유지 범위 밖의 페널티 값에 의하여 제어기기의 우선순위를 정할 수 있다. 본 논문에서 제어기기의 우선순위는 다음과 같이 정하였다.

- 1) 전압이 낮은 경우
 - ① 리액터 제거
 - ② 커패시터 투입
 - ③ 탭 변환
- 2) 전압이 높은 경우
 - ① 커패시터 제거
 - ② 리액터 투입
 - ③ 탭 변환

통상적인 제어기기의 특성상 변압기 탭보다는 조상설비의 스위칭 동작이 우선순위가 높게 형성되어 있으며, 이는 계통 운영자의 판단에 따라 우선순위는 페널티 함수의 값으로 조정될 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이, 변압기 탭의 스위칭 비용 C_i 가 커패시터/리액터 뱅크의 스위칭 비용보다 매우 크도록 정의하고, 제어기기 C_i 의 투입시($k_i = 1$)가 개방시($k_i = -1$)보다 더 크도록 정의한다. 이렇게 하면 변압기 탭의 한 탭 증가가 가장 큰 비용을 발생하고, 커패시터/리액터 뱅크의 개방이 가장 적은 비용을 발생하게 되므로, 비용

함수를 최소화하기 위하여 커패시터/리액터 뱅크의 개방을 제어의 최우선 수단으로 고려하게 된다.

2.3 지역 계통의 구성

전력계통에서의 무효전력은 유효전력과 달리 지역적 특성을 갖는다. 그러므로 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터의 스위칭 동작으로 인한 계통의 파급효과는 국지적인 특성을 가질 수밖에 없다. 이러한 이유에서 제어기기 스위칭에 의한 영향을 계통 전체를 통하여 분석하는 것은 상당한 계산량과 시간을 요하게 된다. 그러므로 본 절에서는 계통의 물리적, 전기적 특성을 이용하여 전압 위반이 발생한 모션이 생기면 그 모션에 영향을 미치는 제어기기를 선정하고 각각의 제어기기가 전압 위반 모션에 미치는 영향을 분석하기 위해서 전압 위반 모션과 해당 제어기기를 중심으로 하는 지역 계통을 구성한다.

2.3.1 물리적 거리를 통한 지역 계통의 구성

전력계통은 각 구성 요소들이 송전선로나 변압기 등을 통하여 연결되어 있으며, 이러한 연결은 지역 계통을 구성하는데 하나의 파라미터로 적용될 수 있다. 다음 그림 3은 계통의 물리적 연결을 통하여 지역 계통을 구성하는 개념을 보여준다[4].

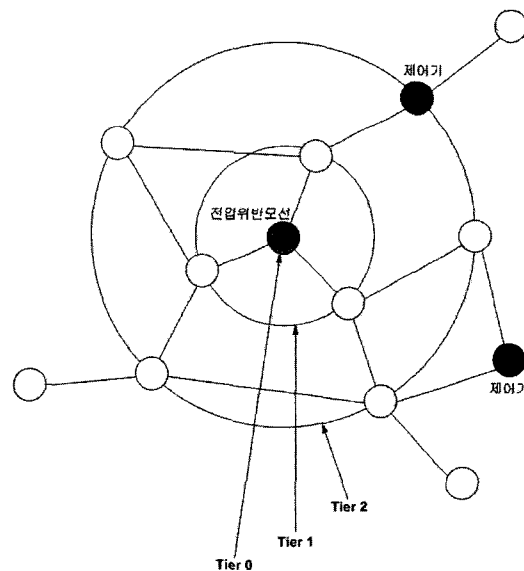


그림 3 지역 계통 구성 개념도
Fig. 3 Local Subsystem Structure

본 논문에서는 Tier 즉, '군'이라는 개념을 이용 하는데 이는 같은 군에 있는 경우 물리적으로 같은 층의 연결 구성을 갖는다는 것을 의미한다. 제어기기의 스위칭 동작에 의한 계통의 영향 평가를 위해 사용되기 때문에 이러한 군은 사용자가 스위칭을 하고자 하는 각 후보 제어기기를 기준으로 하여 적절한 군을 구성하게 된다. 그림 3을 보면 군0에 전압 위반 모션이 존재하고 물리적 연결을 고려하여 계통

운영자가 고려하는 최대 근까지 전압 위반 모선을 중심으로 하는 지역 계통을 구성하게 된다. 이 때 그림에서 과란 원형의 모선들은 제어기기를 나타낸다. 즉 전압 위반 모선을 중심의 지역계통 내에서 제어 가능한 제어기기를 표시했고 이 제어기기가 제어 가능한 범위를 정하기 위해서 새로운 군을 구성하게 된다. 이러한 군은 계통 운영자가 정해진 기준까지 구성하게 된다.

2.3.2 전기적 거리를 통한 지역 계통의 재구성

전기적 거리의 개념은 두 모선의 전기적 결합성을 나타내는 지수로 기본적인 전력 조류 방정식의 자코비안 행렬 중에서 전압과 무효전력 사이의 관계를 이용하여 감도 행렬로서 재구성한 것이다[5]. 즉, 전력계통 내의 두 모선이 전압 측면에서 얼마만큼의 결합도가 있는가는 이들 두 모선간의 전압 변화 감소(Attenuation of voltage variation) 정도를 이용해서 정량화 될 수 있다. 이 감소(Attenuation)는 조류계산의 자코비안 행렬 중 Q-V 행렬의 역행렬인 V-Q 감도행렬의 각 열(column)을 대각 요소로 나눔으로써 쉽게 구할 수 있다.

입의 해에서 전력조류 방정식을 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)에서 전압과 무효전력의 식을 분해하면 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta Q_i = \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right] \Delta V_i \quad (3)$$

$$\Delta V_i = \left[\frac{\partial V}{\partial Q} \right] \Delta Q_i \quad (4)$$

여기에서 $[\partial Q/\partial V]$ 는 식(2)에서 보면 전력조류 계산의 자코비안 행렬이다. 식(4)의 $[\partial V/\partial Q]$ 는 $[\partial Q/\partial V]$ 의 역행렬로 감도행렬(sensitivity matrix)이라고 한다.

계통에서 어떤 i모선과 j모선 사이의 전압의 연관성에 대하여 고려하여 본다. j모선 전압의 미소변화에 따른 i모선 전압의 미소변화를 a_{ij} 라는 지수로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta V_i = a_{ij} \Delta V_j \quad (5)$$

a_{ij} 는 식(4)을 이용하면 다음 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$a_{ij} = \frac{(\partial V_i / \partial Q_j)}{(\partial V_j / \partial Q_j)} \quad (6)$$

일반적으로 a_{ij} 와 a_{ji} 는 다르지만 대칭적(symmetric)인 특성을 고려하여 다음과 같이 전기적 거리를 정의한다.

$$D_{ij} = D_{\bar{j}} = -\log(a_{ij} \cdot a_{ij}) \quad (7)$$

이렇게 계산된 전기적 거리를 이용하여 앞 절에서의 지역 계통을 재구성하게 된다. 이는 제어기기의 계통에의 영향을 전기적 거리를 이용하여 영역을 정의해 줌으로써 전기적으로 감도가 작은 모선들을 제외하는 역할을 하여 적절한 지역 계통의 구성을 가능하게 한다.

2.3.3 지역 계통의 구성 절차

먼저, 각각의 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터를 갖고 있는 모선을 중심으로 전기적 거리 개념을 이용하여 지역계통을 선정한다. 다음, 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터의 제어 효과는 지역계통 조류계산을 수행하여 분석한다. 즉, 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터의 제어 효과는 지역계통의 선정과 조류계산 수행을 통해 분석되어 온라인 제어가 가능하다. 여기서, 지역계통은 제어효과를 빠르게 분석하기 위하여 계산적인 목적으로 선정되는 것이며, 각각의 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터의 제어 결과를 전체 계통을 대상으로 비용함수를 통해 정량화 한 후, 비용이 최소값을 갖는 제어기기의 제어 결과를 최적해로 결정한다.

지역 계통 선정을 위해서는 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터를 갖고 있는 각각의 모선들과 기타 모선간의 전기적 거리를 계산해야 하는데, 대규모 계통의 경우 모든 모선에 대한 전기적 거리를 계산하는 것이 필요하지 않으므로 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터를 갖고 있는 모선으로부터 계통 운영자가 정해놓은 기준 이상의 변전소 이후에 있는 모선은 제어에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하여 무시한다. 또한 현재 개발한 AVC 알고리즘의 경우 발전기 단자전압의 제어는 고려하지 않으므로 지역계통 구성 시에 발전기 모선을 제외한다. 즉, 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터를 갖고 있는 각각의 모선에 대하여, 이 모선으로부터 계통 운영자가 정해놓은 기준 이하의 변전소 이내에 있는 모선들 중 발전기 모선을 제외한 모선들로 각각의 지역계통을 구성토록 한다. 시험계통 검증을 위해서 본 논문에서는 8군의 구성을 기본으로 하였고 전기적 거리의 기준값을 8로 정의하여 사례연구를 하였다. 지역계통에 포함되는 모선들의 부분집합(subset)을 S라고 하면, 다음과 같이 지역 계통이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_0 \\ \Delta Q_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial Q_0 / \partial V_0 & \partial Q_0 / \partial V_s \\ \partial Q_s / \partial V_0 & \partial Q_s / \partial V_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_0 \\ \Delta V_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, ΔQ_0 와 ΔV_0 는 부분집합 S의 외부에 있는 모선들과 관련된 요소이고, ΔQ_s 와 ΔV_s 는 부분집합 S의 내부에 있는 모선들과 관련된 요소이다. $\Delta V_0 = 0$ 이라고 가정하였으므로, 즉 부분집합 S 내부에 있는 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터를 조정한다 하더라도 부분집합 S 외부에 있는 모선들의 전압변화에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 가정하였으므로, 위의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta Q_s &\approx [\partial Q_s / \partial V_s][\Delta V_s] \\ \Delta V_s &\approx [\partial V_s / \partial Q_s][\Delta Q_s] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 표현된 부분집합 S로 구성되는 지역계통은 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터를 갖고 있는 각각의 모선에

대하여 각각 생성되며(즉, 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터를 갖고 있는 모선의 수만큼 생성됨), 이는 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터를 갖고 있는 모선으로부터 발전기 모선을 제외한 모선으로 구성된다. 최종적으로 이 지역계통으로부터 즉, 부분집합 S의 V-Q 감도행렬로부터 제어기기를 갖고 있는 모선과 기타 모선과의 전기적 거리를 계산한 후, 이 값이 계통 운영자에 의해 정해진 기준값 이내로 되는 모선들로 축소된 지역계통을 구성하고, 이를 전압제어 효과 분석 시에 사용하게 된다[6]. 이 때 부분집합 S 외부에 있는 모선들의 경우, 제어기기의 조절에 따라 전압 변화가 없다고 가정했지만 실제 조류계산 상의 결과에는 분명한 차이가 있다. 따라서 지역계통 외부의 모선들은 다음과 같은 가정을 통해 전압을 감시하게 되고 만약 기준치를 벗어나는 모선이 발생할 경우, 그 모선을 새로운 전압제어 대상 모선으로 지정한다. 식 (10)의 i는 지역계통 내부의 모선이고 j는 외부의 모선이다.

$$\begin{aligned} \Delta V_j &\approx \Delta V_i \cdot \alpha, \quad 0 \leq \alpha < 1 \\ V_{\min} &\leq \Delta V_j \leq V_{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

2.4 투입 제어기기 결정 과정

지역계통을 구성하는 절차를 포함한 전체적인 최적 제어기기를 구하는 과정을 정리하면 다음과 같다.

단계 1) 전압이 기준치를 벗어난 모선 발생(전압제어 대상 모선)

단계 2) 전압제어 대상 모선을 중심으로 8개 변전소 이내에 있는 모선들로 구성된 지역계통 구성(이때, 발전기 모선은 부하 모선으로 대체함)

단계 3) 지역계통에 대하여 전기적 거리 계산 후, 전기적 거리가 기준값 이내로 되는 모선들만 포함하는 축소 지역계통 생성

단계 4) 축소 지역계통 내에 변압기 탭, 병렬 커패시터 및 리액터를 갖고 있는 각각의 모선(전압제어 모선)을 중심으로 단계 2와 단계 3을 수행하여, 전압제어 모선마다 각각의 축소 지역계통 생성

단계 5) 각각의 전압제어 모선을 중심으로 생성된 각각의 축소 지역계통을 대상으로, 전압제어 대상모선의 전압을 정상상태로 유지하기 위한 제어량을 조류계산을 통해 결정

단계 6) 단계 5에서 구해진 각각의 제어량 및 제어동작(투입 및 개방)을 고려하여 최적화 문제의 비용함수 값을 계산

단계 7) 비용함수의 값을 최소로 가지는 제어요소, 제어량 및 제어동작을 최적화 문제의 해로 선정

2.5 AVC 알고리즘 순서도

그림 4는 본 논문에서 수행된 AVC 알고리즘 순서도를 나타낸다. 먼저, 계통데이터와 제어기기 데이터를 읽어 들인다. 그리고 각 제어기기를 포함하는 계통 데이터를 재구성하고 재구성된 계통데이터의 조류계산을 수행하여 전압 유지위반 여부를 체크하게 된다. 전압 위반 여부가 나타난 경

우 앞에서 설명한 비용 함수를 이용하여 적절한 제어기기를 선정하게 된다. 제어기기 선정 후 전압유지 위반 여부를 재평가하여 위반이 일어나지 않은 경우 알고리즘은 종료 되고, 위반이 발생한 경우 다른 제어기의 추가 투입을 고려하게 된다. 여기서 만약 투입할 만한 제어기기가 없으면 알고리즘은 종료된다. 이러한 반복 과정을 통하여 전압 유지를 위한 적절한 제어기기의 투입 순서가 정해지게 되고 사용자는 제어기기의 투입에 따른 계통의 변화에 대한 정보를 얻을 수 있다.

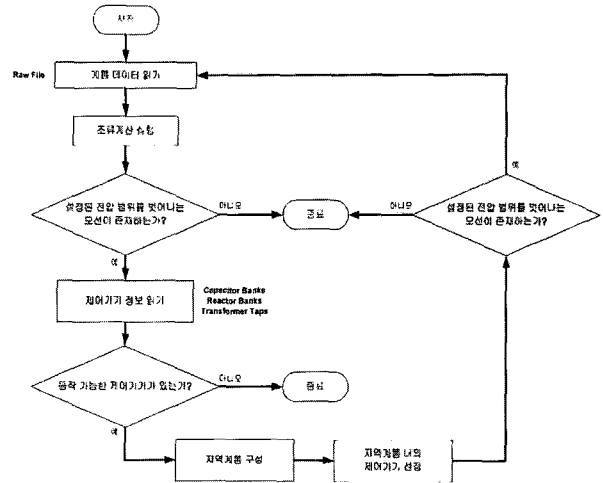


그림 4 알고리즘 순서도
Fig. 4 Algorithm Flow Chart

2.6 사례연구

본 절에서는 제안된 알고리즘을 사례연구를 통하여 검증한다. 즉, 시험계통의 상정사고 시나리오에 따라서 전압이 위반된 모선의 전압 유지를 위해 투입되는 제어기기를 PSS/E 결과와 비교한다. 비교 대상으로 PSS/E를 선정한 이유는 개발된 알고리즘이 비용함수 최소화를 목적으로 전압 패널티를 계산할 때 변압기 탭, 셉트 커패시터 및 리액터 조절에 따른 조류계산을 수행하여 동일한 환경에서 비교할 수 있기 때문이다. 사용된 계통은 IEEE 39모선 계통이다. 식(1)의 비용함수 설정 값은 다음과 같다.

표 1 페널티 함수 값
Table 1 Penalty Function Value

범위	페널티 함수 값
$V_{\min} < V < V_{\max}$	0
$V > aV_{\max}$	1000
$V < bV_{\min}$	1000
$V_{\max} < V < aV_{\max}$	$f_m = 1000 \times 0.1 \times (V - V_{\max})$
$bV_{\min} < V < V_{\min}$	$f_m = 1000 \times 0.1 \times (V_{\min} - V)$

이 때 a는 1.012로 b는 0.012로 정한다. 순환 무효조류 페널티는 현재 제어 목적이 전압 유지이므로 0으로 가정한다.

표 2 제어순서와 스위칭 비용 함수 값
Table 2 Control Procedure and Switching Value

순서	저전압	비용	과전압	비용
1	리액터 개방	0	커패시터 개방	0
2	커패시터 투입	100	리액터 개방	100
3	탭 변환	200	탭 변환	200

2.6.1 IEEE 39모선

그림 5는 IEEE 39모선 계통을 나타낸다. 이 시험계통에서의 제어기기는 다음 절에서 나타내었다.

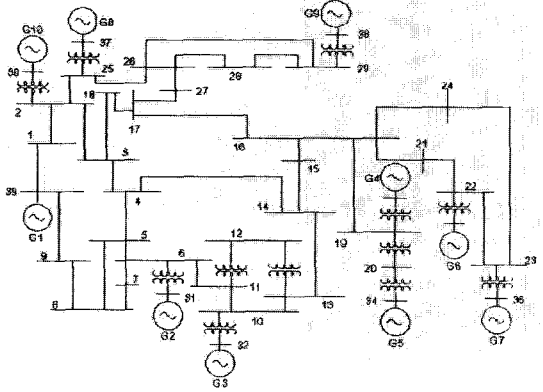


그림 5 IEEE 39 모선 계통도
Fig. 5 IEEE 39 Bus System Diagram

2.6.2 상정사고 시나리오

본 논문에서 다루고자 하는 상정사고는 저전압과 과전압 시나리오이며 그 내용은 아래와 같다.

- 1) 저전압 시나리오(모선 전압이 0.95pu이하)
 - ① 선로 5-6, 6-7 제거
 - ② 위반 모선 확인
 - ③ 위반 모선의 지역계통 내의 모선에 커패시터를 투입
 - ④ PSS/E와 결과 비교
- 2) 과전압 시나리오(모선 전압이 1.05pu이상)
 - ① 사고 제거 후 모선 4, 8, 12의 부하 탈락
 - ② 위반 모선 확인
 - ③ 위반 모선의 지역계통 내의 모선에 리액터를 투입
 - ④ PSS/E와 결과 비교

2.6.3 투입 제어기기

표 3과 4는 IEEE 39 시험계통에서 고려되는 제어기기를 나타낸다. 이 시험계통에는 선트 리액터와 선트 커패시터를 고려하였고, 저전압과 과전압 시나리오에 따라 제어기기의 투입 상태가 달라진다.

표 3 저전압 제어기기
Table 3 Low Voltage Control Devices

모선	조상설비		상태
	용량[Mvar]	뱅크	
3	80	2	OFF
7	50	5	OFF
9	80	3	OFF
12	50	5	OFF
16	50	5	OFF

표 4 과전압 제어기기
Table 4 High Voltage Control Devices

모선	조상설비		상태
	용량[Mvar]	뱅크	
3	80	2	ON
7	50	5	ON
9	80	3	ON
1	-50	5	OFF
4	-50	5	OFF
6	-50	5	OFF

2.6.4 모의 결과

제안된 알고리즘은 여러 개의 위반 모선이 발생할 경우 가장 위반이 큰 모선의 전압을 우선적으로 제어하게 된다. 따라서 다음 절의 결과에서는 가장 위반이 큰 모선의 전압 변화를 기술하였다. PSS/E의 경우 상정사고 시나리오에 따라서 계통이 변화된 이후의 전압 위반 모선을 판단할 시에 선트와 탭은 모두 고정으로 놓고 모의하였으며 실제 투입량을 결정할 시에 불연속적인 전압 제어 모드로 동작하게 하였다.

2.6.4.1 저전압 결과

표 5와 6에서 저전압 시의 PSS/E와 제안된 알고리즘의 결과를 나타내었다.

표 5 PSS/E 결과
Table 5 PSS/E Result

투입 전 위반모선		제어기기	상태	투입 후 위반모선	
모선	전압			모선	전압
4	0.8914	모선 7 50Mvar×5	ON	4	0.9258
5	0.8703			5	0.9257
7	0.8518			7	0.9359
8	0.8574			8	0.9302
13	0.9491			13	위반 제거
14	0.9192			14	0.9410
15	0.9426			15	위반 제거

표 6 제안된 알고리즘 결과

Table 6 Proposed Algorithm Result

투입 전 위반모선		Step	제어기기	상태	투입 후 위반모선	
모선	전압				모선	전압
7	0.8518	1	모선7 50Mvar	ON	7	0.8677
7	0.8677	2	모선7 50Mvar	ON	7	0.8840
7	0.8840	3	모선7 50Mvar	ON	8	0.8999
8	0.8999	4	모선7 50Mvar	ON	5	0.9141
5	0.9141	5	모선7 50Mvar	ON	5	0.9257
5	0.9257	6	모선9 80Mvar	ON	4	0.9309
4	0.9309	7	모선9 80Mvar	ON	4	0.9361
4	0.9361	8	모선9 80Mvar	ON	4	0.9415
4	0.9415	9	모선3 80Mvar	ON	4	0.9482
4	0.9482	10	모선3 80Mvar	ON	위반 제거	

표 5와 6의 결과를 비교하면 PSS/E의 경우 전압 위반이 발생한 모선에 설치되어 있는 제어기기만 동작하여 모선 13과 15를 제외한 다른 위반 모선들의 전압 유지에 실패하였다. 이것은 PSS/E의 제어 개념이 자기 모선 제어에 바탕을 두고 있기 때문이다. 제안된 알고리즘의 경우 가장 심각한 위반을 보이는 모선 7이 최우선 제어 대상이 되어서 모선 7의 전압을 올리기 위해서 모선 7에 설치된 커패시터를 투입 하던 중에 모선 7의 위반이 제거되고 위반모선이 모선 8, 5, 4 순으로 바뀌면서 순차적으로 모선 7, 9, 3의 커패시터가 동작하였다. 이러한 커패시터는 모선7의 지역계통 안에 포함되어 있는 제어기기로서 PSS/E의 결과와 비교하면 자기 모선의 제어기기 뿐만 아니라 지역계통 내의 제어기기가 제어에 참여하므로 결국 모든 모선의 전압 유지에 성공하였다.

2.6.4.2 과전압 결과

표 7과 8에서 과전압 시의 PSS/E와 제안된 알고리즘의 결과를 나타내었다.

표 7 PSS/E 결과

Table 7 PSS/E Result

투입 전 위반모선		제어기기	상태	투입 후 위반모선	
모선	전압			모선	전압
4	1.0513	모선4 -50Mvar	ON	4	위반 제거
5	1.0567			5	위반 제거
6	1.0549			6	위반 제거
7	1.0688	모선6 -50Mvar	ON	7	위반 제거
8	1.0673			8	위반 제거
9	1.0784	모선7 50Mvar	OFF	9	위반 제거
10	1.0518	모선9 50Mvar	OFF	10	위반 제거
11	1.0511			11	위반 제거
12	1.0766	모선9 50Mvar	OFF	12	1.0625
13	1.0521			13	위반 제거

표 8 제안된 알고리즘 결과

Table 8 Proposed Algorithm Result

투입 전 위반모선		Step	제어기기	상태	투입 후 위반모선	
모선	전압				모선	전압
9	1.0784	1	모선7 50Mvar	OFF	9	1.0774
9	1.0774	2	모선7 50Mvar	OFF	9	1.0763
9	1.0763	3	모선7 50Mvar	OFF	9	1.0735
9	1.0735	4	모선7 50Mvar	OFF	9	1.0707
9	1.0707	5	모선7 50Mvar	OFF	9	1.0680
9	1.0680	6	모선9 80Mvar	OFF	9	1.0653
9	1.0653	7	모선9 80Mvar	OFF	9	1.0626
9	1.0626	8	모선9 80Mvar	OFF	12	1.0528
12	1.0528	9	모선3 80Mvar	OFF	12	1.0507
12	1.0507	10	모선3 80Mvar	OFF	위반 제거	

표 7과 8의 결과를 비교하면 PSS/E의 경우 전압 위반 모선들 중에서 제어기기가 설치되어 있는 모선 4, 6, 7, 9의 제어기기가 동작하였다. 이 때 자기 모선의 전압이 전압 범위 안에 들어오게 되면 투입 가능한 제어기기가 남아있더라도 동작을 하지 않았다. 결국 650Mvar의 용량이 투입되어 있던 커패시터는 100Mvar만 개방되고 750Mvar의 용량이 투입 가능한 리액터는 150Mvar만 투입되어 모선 12의 전압 유지에 실패했다. 제안된 알고리즘의 경우 가장 전압 위반이 큰 모선 9의 지역 계통에 포함되는 모선 7, 9, 3의 커패시터가 차례대로 개방되어 모든 모선의 전압을 유지하였다. 시험계통에 대한 모의 결과 PSS/E의 경우 자기 모선의 전압 유지를 목적으로 하기 때문에 모든 전압 위반에 대해서 대처가 미흡할 수 있다. 반면, 제안된 알고리즘의 경우 동시에 여러 개의 제어기기의 선택이 불가능하고 제어기기를 순차적으로 선택하기 때문에 제어 시간의 문제가 발생한다.

3. 결론

최근 빈번히 발생하고 있는 광역정전의 주된 원인은 계통의 외란으로 인하여 발생된 무효전력 수급 불균형으로 인하여 전압 붕괴과정을 계통이 경험하게 되면서 발생하게 되었다. 이에 계통의 전압과 무효전력의 적절한 제어는 반드시 요구되며 우리나라의 경우에 있어서도 수도권 부하의 무효전력 불균형 해소를 위한 해결책이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 BPA에서 운영 중인 전압 제어 방안을 참고하여 우리나라 계통에 적용을 위한 AVC알고리즘을 구현하였다. 이때 사용되는 페널티 함수나 제어기기의 투입 여부를 결정하게 되는 제어 목적을 변형하였으며 개발된 알고리즘은 IEEE 39모선 계통을 통하여 검증하였다. 저전압과 과전압 상황에서 전압 위반 여부를 검사하여 위반 발생 시 적절한 제어기기의 투입 여부를 확인할 수 있었고 PSS/E와 결과 비교를 통해서 효율성을 검증하였다.

본 논문에서 모의한 상정사고 시나리오는 선로 제거에 의한 저전압 상황과 부하 탈락에 의한 과전압 상황이다. 저전

압 및 과전압 경우에 있어서 공통적으로 전압 위반이 발생한 모선에 설치된 제어기기는 제어에 참여할 수 있다. 그러나 PSS/E의 경우 그 이외의 모선에 설치된 제어기기는 동작하지 않기 때문에 조류계산을 베이스로 하는 모의에서 전압 위반을 100% 제거하지 못한다. 개발된 알고리즘은 근과 전기적 거리의 개념을 이용하여 위반된 모선을 중심으로 지역 계통을 구성하고 그 지역계통 내의 모선에 설치되어 있는 제어기기는 모두 제어에 참여할 수 있기 때문에 아주 심각한 계통 변화 때문에 더 이상 투입될 수 있는 제어기기가 없을 경우를 제외하면 전압 위반을 100% 제거할 수 있다.

개발된 알고리즘은 전압 위반 시에 전압 유지를 위해서 동작 가능한 제어기기가 존재하면 무한정 스위칭을 하게 된다. 그러나 실 계통 운영자는 스위칭을 되도록 줄이고자 노력하기 때문에 한전 계통에 효율적인 적용을 위해서 조상설비의 스위칭 동작을 최소화하는 문제가 있다. 또한 지역 계통을 구성하는 군이나 전기적 거리와 같은 파라미터의 적정 값을 결정하고 각 제어기기의 다양한 스위칭 패널티에 따른 영향을 평가하고 적정 값을 결정해서 본 알고리즘을 한전 계통에 적용함으로써 현재 조상설비의 수동 제어를 자동화하는 방안으로의 검증이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 산업자원부의 지원에 의해 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] S. Corsi, P. Marannino, N. Losignore, G. Moreschini, "Coordination Between the Reactive Power Scheduling Function and the Hierarchical Voltage Control of the EHV ENEL System." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No.2, May 1995.

[2] J.P. Paul, J.T. Leost, J.M. Tesson, "Survey of the Secondary Voltage Control in France : Present Realization and Investigations," IEEE Transactions on Power Systems, vol. PWRs-2, no.2, pp.505-511, 1987.

[3] A. Zobian, M. Ilic, "A Steady State Voltage Monitoring and Control Algorithm Using Localized Least Square Minimization of Load Voltage Deviations," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No.2, May 1996.

[4] J. Zaborsky, K. Whang, K. Prasad, "Fast Contingency Evaluation Using Concentric Relaxation," IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-99, Jan./Feb. 1980, pp.28-36.

[5] P. Lagonotte, "Structural Analysis Of The Electrical System: Application To Secondary Voltage Control in France", IEEE Trans. on Power Systems, vol.4, no. 2, May 1989.

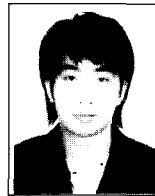
[6] C. W. Taylor, Power System Voltage Stability, McGraw-Hill Inc., 1994.

저 자 소 개



김 태 군 (金 泰 均)

1964년 11월 28일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년~현재 한전 전력연구원 책임연구원. 주요 관심분야 : 전력계통 해석, 운영 및 계획
Tel : 042-865-5834
Fax : 042-865-5844
E-mail : tkkim@kepri.re.kr



최 윤 혁 (崔 倫 赫)

1981년 8월 25일생. 2005년 고려대 전자전파공학과 졸업. 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 주요 관심분야 : 전력계통 전압안정도 및 제어
Tel : 02-3290-3781
Fax : 02-3290-3697
E-mail : lover9000p@korea.ac.kr



서 상 수 (徐 湘 受)

1979년 7월 7일생. 2003년 고려대 전기공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 주요 관심분야 : 전력계통 전압안정도, 해석 및 제어
Tel : 02-3290-3781
Fax : 02-3290-3697
E-mail : sance97@korea.ac.kr



이 병 준 (李 炳 峻)

1961년 7월 16일생. 1987년 고려대 전기공학과 졸업. 1994년 아이오와 주립대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 고려대 전기공학과 교수. 주요 관심분야 : 전력계통 해석, 안정도 및 제어
Tel : 02-3290-3242
Fax : 02-3290-3697
E-mail : leeb@korea.ac.kr