

Coordination of UPFC and Reactive Power Sources for Steady-state Voltage Control

박지호[†] · 이상덕^{*} · 정태영^{*} · 정기석^{*} · 백영식^{**} · 서규석^{***}

(Ji-Ho Park · Sang-Duk Lee · Tae-Young Jyung · Ki-Seok Jeong · Young-Sik Baek · Gyu-Seok Seo)

Abstract - This paper presents a new method of local voltage control to achieve coordinative control among UPFC(Unified Power Flow Controller) and conventional reactive compensation equipments, such as switched-shunt and ULTC(Under-Load Tap Changing) transformer. Reactive power control has various difficult aspects to control because of difficulty of system analysis. Recently, the progress of power electronics technologies has lead to commercial availability of several FACTS(Flexible AC Transmission System) devices. The UPFC(Unified Power Flow Controller) simultaneously allows the independent control of active and reactive power flows as well as control of the voltage profile. When conventional reactive power sources and UPFC are used to control system voltage, the UPFC reacts to the voltage deviation faster than the conventional reactive power sources. Keeping reactive power reserve in an UPFC during steady-state operation is always needed to provide reactive power requirements during emergencies. Therefore, coordination control among UPFC and conventional reactive power sources is needed.

This paper describe the method to keep or control the voltage of power system of local area and to manege reactive power reserve using PSS/E with Python. The result of simulation shows that the proposed method can control the local bus voltage within the given voltage limit and manege reactive power reserve.

Key Words : Coordinative control, UPFC, ULTC, Switched-shunt, PSS/E, Python

1. 서론

지속적으로 증가하는 전력수요를 충족시키기 위해서는 새로운 발전소와 송전설비에 대한 투자가 필요하다. 하지만 이러한 투자는 여러 가지 환경적, 경제적 제약 때문에 지속적으로 증가할 수 없다. 송전설비에 대한 투자의 부족과 송전선로가 갖는 유도성의 특성 때문에 무효전력의 제어는 전력계통의 운영과 계획에서 매우 중요하다. 무효전력은 전압의 제어와 밀접한 관련이 있으며 현재의 고도정밀산업의 발달은 전압품질에 대한 중요성을 부각시키고 있다. 부하의 관점에서 무효전력은 전압안정도의 핵심인 전압붕괴 여유도에 초점을 둔다. 발전기는 무효전력 부족분을 공급할 수 있는 공급원이 될 수 있지만 장거리 송전에는 심각한 문제를 일으키므로 무효전력이 필요한 곳에서 보상해야만 한다. 따라서 계통전압안정화를 위해서는 무효전력에 대한 제어가 필수적이다. FACTS(Flexible AC Transmission System)장비는 기존의 전력설비의 여러 가지 제약조건을 극복하면서 전송효율을 극대화시킬 수 있고 전압제어에 광범위하게 적

용가능하다. 우리나라는 강진변전소에 UPFC(Unified Power Flow Controller)를 설치하는 것을 시작으로 계속적으로 FACTS 기기의 설치가 확대되고 있다. UPFC는 UPFC가 설치된 모선의 유효전력, 무효전력 그리고 전압을 동시에 제어할 수 있다. FACTS기기를 사용한 무효전력의 제어는 전압안정화에 크게 기여할 수 있다. 중부하시와 경부하시 모두에 대하여 적정전압을 유지하고 계통의 사고시 전압 안정성을 유지하는데 FACTS는 매우 효과적이다. 하지만 이러한 FACTS기기는 일반적으로 고가의 정밀기기이므로 최대한 효율적으로 이용해야만 한다. 따라서 기존의 전력용 콘덴서, ULTC(Under-Load Tap Changing)변압기등과 같은 무효전력보상설비와의 긴밀한 협조제어가 필요하다. 본 논문은 전력계통의 정상상태에서의 UPFC와 기존의 조상설비간의 제어 협조를 통한 지역 변전소의 전압제어와 전압안정화를 위한 순동무효전력 예비력확보에 관한 새로운 방법을 제안한다. 무효전력 예비력은 긴급상황에서의 전압 안정화에 매우 중요하다. 본 논문에서는 해석엔진 PSS/E를 이용하는 파이썬 프로그래밍을 사용하여 제어협조알고리즘을 구현하였다.

[†] 교신저자, 정회원 : 경북대 전기공학과 시간강사 · 공박
E-mail : pjh@ee.knu.ac.kr

^{*} 정 회원 : 경북대 대학원 전자전기컴퓨터학부 박사과정

^{**} 펠로우회원 : 경북대 전기공학과 교수 · 공박

^{***} 정 회원 : 거제대 선박전기와 조교수 · 공박

접수일자 : 2011년 3월 2일

최종완료 : 2011년 4월 26일

2. 본론

2.1 전압제어 설비의 정상상태 모델링

본 논문에서는 무효전력을 제어하여 전압을 제어할 수 있는 FACTS 기기 중에서 UPFC와 Switched-Shunt 그리고

탭을 제어하여 전압을 직접 제어하는 ULTC 변압기의 협조를 통한 전압 협조제어 알고리즘을 구현하였다.

2.1.1 UPFC 모델링

UPFC는 고압 송전선로에 고속으로 무효전력을 보상할 수 있는 설비로서 유효전력과 무효전력을 제어할 수 있는 다용도의 제어기이다. UPFC는 전송선로의 전력조류에 영향을 미치는 파라미터 즉 전압, 임피던스 그리고 위상각을 동시에 또는 선택적으로 제어하여 기존의 제어기로는 할 수 없는 실제적인 전력조류의 제어와 전송선로의 보상 문제를 다룰 수 있다. 그림 1은 UPFC의 등가회로를 나타낸 것이다. 병렬연결된 가지는 UPFC 모선의 전압크기를 제어하기 위해 무효전력을 발생 또는 흡수하는 STATCOM(Static Synchronous Compensator)이다. 직렬가지는 전송선로의 전력을 제어하기 위해 무효전력을 발생 또는 흡수하는 SSSC(Static Synchronous Series Compensator)이다. 이들은 내부에서 DC 링크를 통하여 결합되어 있다. PSS/E[1]의 UPFC 모델은 병렬연결소자 즉 V_{set} 값을 지정하여 송전단 전압크기를 유지하고 직렬연결소자를 이용하여 유효, 무효전력의 흐름을 제어한다. UPFC는 선택하는 동작모드에 따라 STATCOM 또는 SSSC으로도 동작이 가능하다. 우리나라는 현재 강진변전소 154kV 모선에 UPFC를 설치 운영하고 있다. 그림 1의 등가회로에서 모선 ij 간의 전력방정식을 세울 수 있고 UPFC의 전력방정식은 기존의 뉴턴-랩슨법의 전력조류계산법에 바로 결합되어 제어변수의 설정에 따라 전압크기, 유효전력 그리고 무효전력을 제어할 수 있다[2].

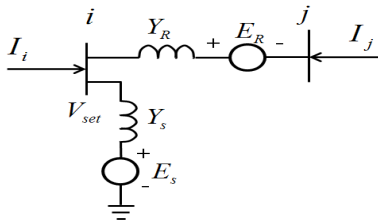


그림 1 UPFC의 등가회로
Fig. 1 The equivalent circuit of UPFC

2.1.2 Switched Shunt 모델링

Switched-shunt는 무효전력을 공급하는 커패시터와 무효전력을 흡수하는 리액터로 구성된다. 그림 2는 PSS/E의 switched-shunt 모델이다. 스위칭은 전압계전기에 의해 작동되는 차단기에 의해 일어난다. 즉 모선 전압이 낮을 때는 커패시터가 투입되고 모선 전압이 높을 때는 리액터가 투입된다. 따라서 차단기의 동작에 따라 블록 전체가 리액터 또는 커패시터 뱅크가 될 수 있다. 그림 2에서 switched-shunt가 흡수하는 전류와 무효전력은 다음 식들과 같다.

$$I_L = -B_L V_i, Q_L = B_L V_i^2 \tag{1}$$

$$I_C = B_C V_i, Q_C = -B_C V_i^2 \tag{2}$$

여기서 B_L : inductive susceptance

B_C : capacitive susceptance

그림 2의 모선 i에 대하여 흡수하는 무효전력의 변동량은 $\Delta Q_i = Q_i(\Delta B/B)$ 으로 나타낼 수 있고 전력조류계산식에

$$B^{(i)} = B^{(i-1)} + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^{(i)} B^{(i)}$$

의 관계를 이용하여 필요한 서셉턴스 B를 결정할 수 있다.

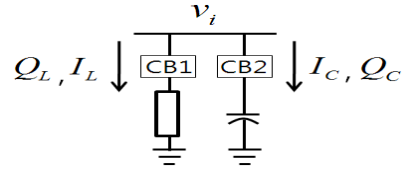


그림 2 Switched-Shunt의 PSS/E 모델
Fig. 2 PSS/E model of Switched-Shunt

2.1.3 ULTC 변압기 모델링

ULTC는 부하가 있는 상태에서 변압기가 변압기 권선비를 조정하여 전압을 조절할 수 있게 하는 장치이다. 그림 3은 PSS/E에 적용된 탭변환 변압기의 등가회로이다.

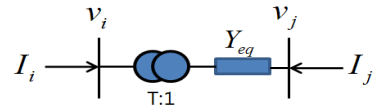


그림 3 탭변환 변압기 등가회로
Fig. 3 The equivalent circuit of tap changing transformer

그림 3에서 모선 ij의 주입 전류와 무효전력은 다음 식들과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y/T^2 & -Y/T \\ -Y/T & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii}/T^2 + V_i V_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)]/T \tag{4}$$

$$Q_j = -V_j^2 B_{jj} + V_j V_i [G_{ji} \sin(\theta_j - \theta_i) - B_{ji} \cos(\theta_j - \theta_i)]/T \tag{5}$$

여기서 $Y = Y_{ii} = Y_{jj} = G_{ii} + jB_{ii} = G_{jj} + jB_{jj}$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -Y = -G_{ij} - jB_{ij} = -G_{ji} - jB_{ji}$$

식 (4)(5)에서 주입무효전력이 탭 변수 T의 함수임을 알 수 있다. 즉 탭의 변화로 무효전력을 제어할 수 있다. 기존의 전력조류식 $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(i)} = -[J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta T \end{bmatrix}^{(i)}$ 에서 전압크기를 일정하게 두고 탭

을 변수로 두면 전력조류식을 $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(i)} = -[J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta T \end{bmatrix}^{(i)}$ 으로 수정

할 수 있고, 지정된 전압을 유지하기 위한 탭값을 구할 수 있다[3]. 다른 설비와의 협조를 생각한다면 PSS/E 전력조류식 자체를 수정해야만 한다. 따라서 본 논문은 협조제어를 위한 새로운 방법을 제안한다.

2.2 전압제어를 위한 UPFC와 조상설비의 협조제어

정상상태에서 UPFC는 전압변동에 대하여 순간적으로 응답할 수 있으므로 전압이 변하면 먼저 UPFC가 동작하고 UPFC의 용량이 한계에 다다르면 기존의 조상설비를 투입

하여 전압을 제어할 수 있다. 하지만 계통사고와 같은 긴급 상황에서는 UPFC가 효과적으로 전압변동에 대응할 수 있으므로 UPFC는 항상 적정량의 순동무효전력 예비력 확보가 요구된다. 또한 switched-shunt와 같은 병렬장치는 기계식으로 동작하므로 그 스위칭 횟수를 최소화할 필요가 있다. 이러한 요구에 따라 UPFC와 기존의 조상설비간의 협조 방안을 모색해야 한다. 앞의 2.1절에 설명 했듯이 각각의 무효전력 제어장치는 정상상태에서 전압제어를 하기 위해 효과적으로 전력조류 알고리즘에 흡수될 수 있지만 이들 간의 협조 알고리즘은 장치의 종류나 개수에 따라 달라진다. 따라서 상황에 따라 전력조류계산 프로그램 자체를 수정해야 하므로 협조 알고리즘을 전력조류계산 프로그램에 구현하는 것은 매우 어렵다. PSS/E는 사용자가 Python 스크립트를 이용하여 시스템에 접근하는 것을 가능하게 해준다. 본 논문은 Python 스크립트를 이용하여 전압제어 협조알고리즘을 구현하고 결과를 PSS/E에 적용하는 방법을 사용한다.

2.2.1 전압제어 협조알고리즘

전력계통의 부하가 변하면 모선의 전압이 변동한다. 정상 상태에서 부하가 감소하면 모선의 전압은 증가하고 부하가 증가하면 모선의 전압은 낮아진다. 하루를 기준으로 새벽 시간대에는 부하가 감소하고 낮 시간대에는 부하가 증가한다. 부하가 변화하여 전압이 변동하면 전압을 유지하기 위해서 먼저 UPFC가 전압제어를 담당하며, switched-shunt는 2차적으로 투입되고, 마지막으로 ULTC 변압기가 가장 늦게 투입된다. 이 때 ULTC는 수동모드로 동작한다고 가정한다. 그림 4는 전압제어를 위한 UPFC와 조상설비간의 협조제어 알고리즘을 제안한 것이다. Python 프로그래밍 언어는 PSS/E가 좀더 유연한 사용자 인터페이스를 제공하기 위해서 포함하고 있는 인터프리터 방식의 객체지향 언어이다. PSS/E가 기존에 제공했던 IPLAN[1]보다 더욱 편리하다. Python은 PSS/E가 모델링한 전력계통의 구성요소를 객체단위로 데이터를 가져올 수 있고 또한 데이터를 새롭게 설정할 수 있다. Python과 PSS/E의 연동에 의해 그림 4의 알고리즘이 구현될 수 있다. 그림 4의 모든 실행 명령은 Python이 PSS/E를 이용하여 수행한다. 먼저 PSS/E에 제어대상 전력계통을 모델링하고 필요한 모든 데이터를 입력한다. 제어대상 시스템은 UPFC, switched-shunt 그리고 ULTC 변압기를 포함하고 있고 현재 정상상태이라고 가정한다. UPFC의 유지 목표전압 V_{set} 를 지정하고 부하변화를 반영하여 조류계산을 행한다. 그림 4의 전압제어 협조알고리즘에 대한 설명은 다음과 같다.

- ① 조류계산결과 전압이 허용범위 안에 있고 UPFC가 용량을 초과하지 않으면 전압이 제어가 되는 경우이다.
- ② 전압제어의 목표가 UPFC가 설치된 모선이 아닌 다른 모선인 경우이다. 사례연구에서 설명한다.
- ③ UPFC가 용량제한에 걸려 전압이 상한치를 벗어난 경우로 switched-shunt의 무효전력 공급을 감소시킨다.
- ④ UPFC가 용량제한에 걸려 전압이 하한치를 벗어난 경우로 switched-shunt의 무효전력 공급을 증가시킨다.
- ⑤ 전압이 상한치를 벗어나고, UPFC와 switched-shunt가 모두 용량을 초과한 경우 탭을 증가시킨다.

- ⑥ 전압이 하한치를 벗어나고, UPFC와 switched-shunt가 모두 용량을 초과한 경우 탭을 감소시킨다.
- ⑦ 현재의 설정 전압의 제어가 불가능하므로 전압의 상한치, 하한치를 새롭게 설정한다.

그림 4에서 Q_{FACTS} 는 UPFC가 모선에서 흡수하는 무효전력량, Q_{shunt} 는 switched-shunt가 모선에 공급하는 무효전력량으로 $Q_{shunt}^L \leq Q_{shunt} \leq Q_{shunt}^{Clim}$ 그리고 Q_{shunt}^{step} 는 한 번에 조정되는 switched-shunt의 무효전력량으로 양의 값이다.

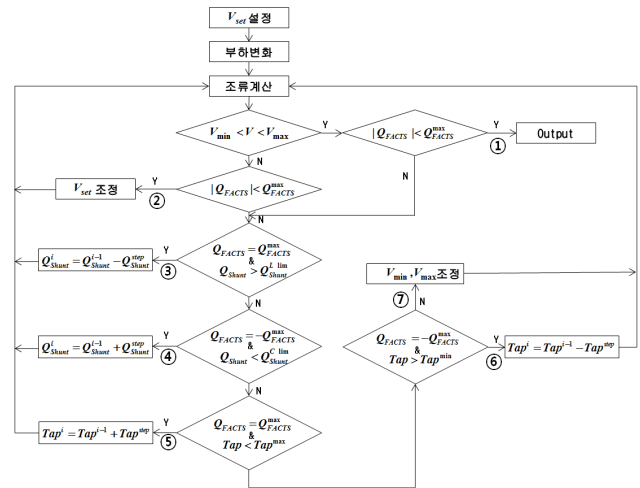


그림 4 전압제어 협조알고리즘
Fig. 4 Coordination algorithm for voltage control

2.2.2 순동무효전력 예비력 확보 알고리즘

무효전력 예비력의 확보는 전압안정도 향상을 위해서 필수적이다. 특히 전력계통의 사고와 같은 긴급 상황에서는 빠른 속도로 무효전력을 공급할 필요가 있다. 이러한 요구사항을 만족할 수 있는 것은 FACTS 장비이다. 전압제어 협조알고리즘은 전압 변동에 대하여 1차적으로 FACTS 장비가 즉각적으로 동작하고 FACTS 용량만으로 전압제어가 되지 않는 경우 조상설비가 동작한다. 따라서 설정 전압을 유지하면서 순동무효전력을 확보하기 위해서는 새로운 알고리즘이 필요하다. 무효전력 확보는 부하의 관점과 발전기의 관점에서 볼 수 있다. 본 논문은 부하의 관점에서 전압안정도 여유를 확보하기 위한 예비력 값이 주어진다는 가정 하에서 그 값을 확보하는 방안을 제시한다. 발전기 관점의 무효전력확보는 고려하지 않는다. 그림 5는 순동무효전력 예비력 확보 알고리즘을 나타낸 것이다. 먼저 그림 4의 알고리즘을 이용하여 전압을 조정한다. 전압조정결과 UPFC의 흡수 무효전력 $Q_{UPFC}^{V_{set}}$ 이 유지하고자 하는 흡수 무효전력 Q_{UPFC}^{Target} 보다 크다면 그 차이만큼을 조상설비가 흡수해야 한다. Switched-shunt를 유도성 모드로 한 스텝 Q_{step}^L 증가시킬 때 UPFC의 무효전력 민감도 Q_{Sen}^L 와 Tap를 한 스텝 변화시킬 때의 UPFC의 무효전력 민감도 Q_{Sen}^{Tap} 를 각각 계산한다. Switched-shunt를 유도성 모드로 용량한도 내에서 리액턴스를 증가시켜 (ΔQ_L) 무효전력을 흡수한다. Shunt가 용량

을 초과하면 이제 ULTC의 탭을 증가시켜 UPFC의 무효전력량을 매 스텝마다 ΔQ_L 만큼씩 감소시킨다. 앞의 과정을 반복하는 중에 현재의 UPFC 무효전력량과 목표 무효전력량의 차이의 크기가 이미 계산한 민감도보다 작을 경우 V_{set} 를 한계범위 내에서 조정한다. 이 과정은 그림 7에서 설명하는 수치해석 알고리즘을 사용하여 정밀하게 조정가능하다. Shunt용량과 Tap의 한계를 모두 초과하면 V_{set} 를 조정하여 무효전력 목표량을 확보할 수도 있고 또는 V_{set} 이 한계범위를 벗어나면 무효전력 확보는 불가능하게 된다.

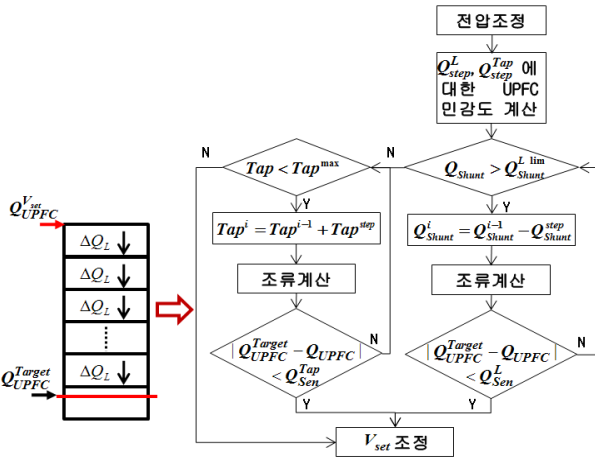


그림 5 $Q_{UPFC}^{V_{set}} > Q_{UPFC}^{Target}$ 인 경우 순동무효전력 확보 방법
 Fig. 5 Securing method of momentary reactive power reserve in case $Q_{UPFC}^{V_{set}} > Q_{UPFC}^{Target}$

그림 6은 $Q_{UPFC}^{V_{set}} < Q_{UPFC}^{Target}$ 인 경우의 순동무효전력 확보 방법을 나타낸 것이다. 이 경우는 조상설비가 무효전력을 공급해야 한다.

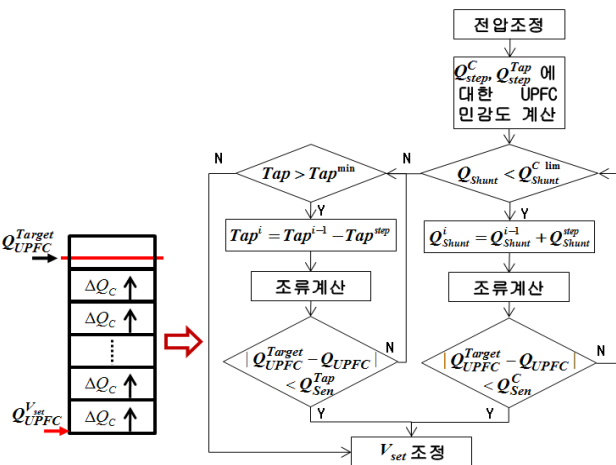


그림 6 $Q_{UPFC}^{V_{set}} < Q_{UPFC}^{Target}$ 인 경우 순동무효전력 확보 방법
 Fig. 6 Securing method of momentary reactive power reserve in case $Q_{UPFC}^{V_{set}} < Q_{UPFC}^{Target}$

Switched-shunt를 용량성 모드로 용량한도 내에서 리액턴스를 증가시켜(ΔQ_C) 무효전력을 공급한다. Shunt가 용량을 초과하면 이제 ULTC의 탭을 감소시켜 UPFC의 무효전력량을 매 스텝마다 ΔQ_C 만큼씩 증가시킨다. 이 과정을 반복하는 중에 현재의 UPFC 무효전력량과 목표 무효전력량의 차이의 크기가 민감도 Q_{Sen}^C 또는 Q_{Sen}^{Tap} 보다 작을 경우 V_{set} 를 한계범위 내에서 조정한다. 이 경우도 Shunt용량과 Tap의 한계를 모두 초과하면 V_{set} 의 한계범위에 따라 무효전력을 확보할 수도 있고 불가능할 수도 있다.

그림 5와 그림 6의 V_{set} 조정은 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 조상설비 용량이 모두 한계용량을 초과하여 현재 상태로는 UPFC 용량을 확보할 수 없는 경우이다. 이 경우는 조정 가능한 전압범위 내에서 V_{set} 값을 조정하여 그림 4의 알고리즘부터 다시 수행해야 한다. 다른 하나는 $|Q_{UPFC}^{Target} - Q_{UPFC}| < (Q_{Sen}^L \text{ or } Q_{Sen}^C \text{ or } Q_{Sen}^{Tap})$ 인 경우이다. 이때의 전압을 V_f 라 하면 이 V_f 를 작은 범위 내에서 조정하여 V_{set} 을 새롭게 설정함으로써 정밀하게 UPFC 목표 용량을 확보할 수 있다. 본 논문에서 이 문제를 해결하기 위해 사용한 방법은 수치해석기법 중 이등분법(Bisection method)[4]이다. 그림 7은 이등분법을 이용한 전압조정 방법을 나타낸 것이다. 그림 7에서 전압변수를 x 로 둔다. 함수 $Q_{UPFC}(x)$ 는 수식으로 나타낼 수는 없지만 PSS/E와 연동된 Python을 이용하여 수치 값을 구할 수 있다. 현재 Q_{UPFC} 는 Q_{UPFC}^{Target} 에 가까운 값이고 수많은 모의 결과 $Q_{UPFC}(x)$ 는 연속함수이고 $Q_{UPFC}(x) = Q_{UPFC}^{Target}$ 를 만족하는 x 의 값을 하나임을 수치적으로 확인할 수 있었다. V_f 는 x_l 또는 x_u 가 되고 대응하는 x_u 또는 x_l 의 값을 쉽게 설정할 수 있다. 이등분법의 알고리즘에 따라 x_r 을 반복적으로 구하면 $Q_{UPFC}(x) = Q_{UPFC}^{Target}$ 을 만족하는 전압 x 를 구할 수 있다.

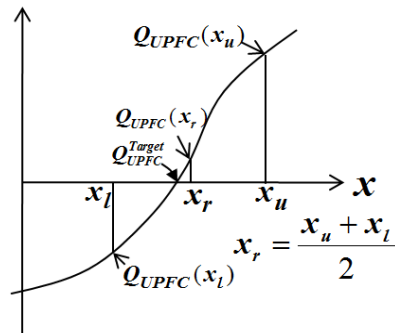


그림 7 이등분법을 이용한 전압조정
 Fig. 7 Voltage regulation using bisection method

이제 이등분법을 적용하여 전압을 조정하기 전에 그림 8의 경우 고려한다. 그림 8에서 $|Q_T - Q_{UPFC}^{Target}| < |Q_{UPFC}^{Target} - Q_F|$ 이다. 이런 경우 이등분법을 바로 적용하여 전압을 조정하면 전압의 변동 폭이 클 수 있다. 하지만 가용할 수 있는 조상설비가 남아있다면 조상설비를 한 번 더 투입하여 Q_F 를 Q_T 까지 움직인 다음에 이등분법을 적용한다면 전압의 변동 폭은 크지 않을 것이다.

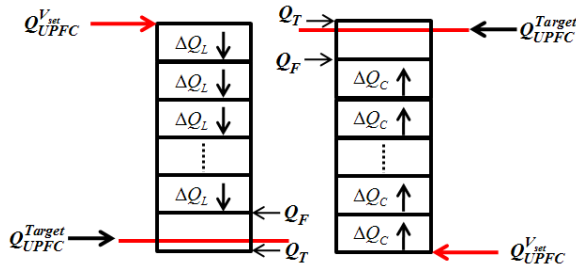


그림 8 조상설비를 한 번 더 투입할 수 있는 경우
 Fig. 8 Once more injection case of the reactive power equipments

2.3 사례 연구

우리나라에서 UPFC가 설치된 지역은 전라남도 강진모선이다[5]. 그림 9는 사례연구에서 부하의 변화를 주는 모선만을 INTOUCH로 나타낸 HMI 화면이다. 그림에 표시되지 않은 나머지 모선의 부하는 일정한 것으로 가정한다. 전라남도 계통의 안정화를 위하여 UPFC는 345kV의 신강진 모선이 아닌 154kV의 강진모선에 설치되어 있다[5]. 사례연구에서 모선전압의 협조제어를 위하여 UPFC는 $\pm 40\text{MVA}$, switched-shunt는 $\pm 20\text{MVA}$ 의 용량으로 운영하고 신강진변전소의 ULTC 변압기를 사용한다. UPFC는 강진모선에 설치되어 있지만 부하변화에 대하여 신강진 모선과 주변 모선들의 전압을 제어하기 위해서는 신강진 모선의 전압을 UPFC를 이용하여 제어하는 것이 효과적이다[6]. 신강진 모선의 전압을 일정 범위 내에서 유지하기 위해서 UPFC의 V_{set} 전압을 제어해야 한다. 신강진모선의 기준전압을 정하고 신강진모선 전압의 변화에 대한 UPFC설치 모선의 전압감도를 계산한다. 이 감도를 이용하여 신강진모선의 전압변화를 강진모선에 설치된 UPFC가 보상하는 방식을 사용한다. 신강진모선의 목표전압을 V_{target} 이라 하고 UPFC의 현재의 설정전압을 V_{set} 이라하면 새로운 설정전압은 $V_{set}^{new} = V_{set} - S_{sk} \times \Delta V_{target}$ 이다.

여기서 감도 $S_{sk} = \frac{\Delta V_{set}}{\Delta V_{sinkangin}} = 1.27$ 를 사용한다. 이 값은 실제 시스템을 모의하여 얻은 결과이다.

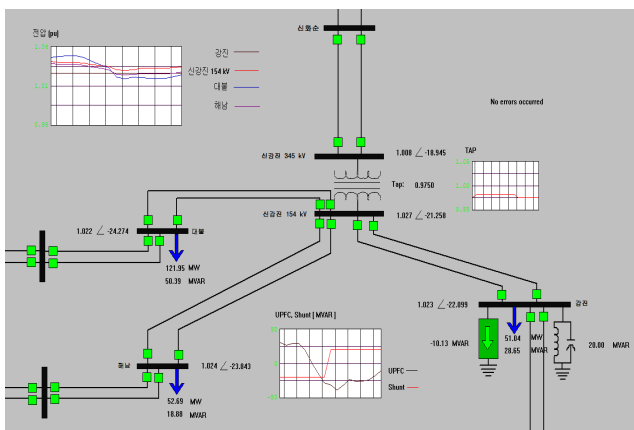


그림 9 전라남도 강진전력계통의 HMI화면
 Fig. 9 HMI screen of Kangjin substation of Jeollanmdo region

목표전압보다 상승하면 전압을 내리고 하강하면 전압을 올린다. 이러한 원리는 그림 4의 알고리즘과 결합된다.

그림 10은 예제시스템의 모의방법을 설명한 것이다. Python과 PSS/E를 연동하여 그림 4-그림 7의 알고리즘을 구현하고 수행결과를 데이터베이스에 저장한다. 데이터베이스에 저장된 데이터는 Python에서 다시 불러올 수 있다. 그림 9에서 대불, 해남 그리고 강진 모선의 부하를 변화시키고 부하변화의 전압을 유지하도록 협조제어를 구현한다. 또한 부하변화 시에 UPFC의 순동무효전력을 확보하기 위한 협조제어도 구현한다.

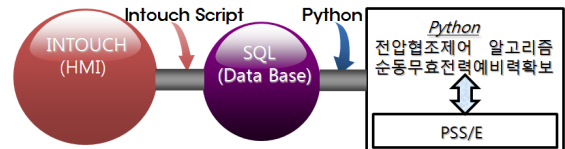


그림 10 예제시스템 모의방법
 Fig. 10 Simulation method of example system

표 1은 강진, 대불 그리고 해남모선의 초기 부하이다. 3개 모선의 총부하량은 유효전력 197.43MW, 무효전력 88.27MVar이다. 이 초기부하에서 표 2의 부하변화율을 적용하여 단계적인 부하감소와 부하상승을 모의한다. 부하변화율은 임의의 값으로 계산한 것이다. 변화된 부하의 범위는 유효전력이 106.61MW-266.53MW 그리고 무효전력이 47.66MVar-119.16MVar이다. 이 때 UPFC와 조상설비간의 협조제어를 통한 신강진 154kV모선의 전압제어를 모의한다.

표 1 모선의 초기부하

Table 1 Initial loads of buses

	강진	대불	해남
P(MW)	40.01	109.93	47.49
Q(MVar)	25.83	45.42	17.02

표 2 부하변화율

Table 2 Load change rate

step1	step2	step3	step4	step5	step6	step7	step8
0.87	0.73	0.66	0.63	0.60	0.54	0.63	0.71
step9	step10	step11	step12	step13	step14	step15	
0.81	0.91	1.02	1.13	1.19	1.27	1.35	

그림 11은 협조제어 결과를 나타낸 것이다. 부하가 감소하는 구간에서는 UPFC가 유도성 모드로 동작하고 switched-shunt는 유도성 모드로 한 번의 스위칭이 발생하고 탭비도 부하가 최저가 되는 단계에서 한번 변환다. 부하가 증가하는 구간에서는 UPFC는 용량성 모드로 동작하게 되고, Switched-shunt는 두 번의 스위칭이 일어난다. 이 때 탭비는 역시 한 번 변환다. 그림 10에서 대불모선의 부하변동의 폭이 다른 모선에 비하여 크므로 전압변동도 상대적으로 크다. 대불모선의 초기부하시의 전압을 V_{D0} 라 하면 부하변화 시의 전압은 $V_{D0} - 0.00344\text{pu}$ 에서 $V_{D0} + 0.00497$ 의 범위

내에 있다. 다른 모선의 전압변위는 이보다 작음을 알 수 있다. 강진모선의 UPFC에 의해 제어되는 신강진모선의 전압변위가 가장 작다.

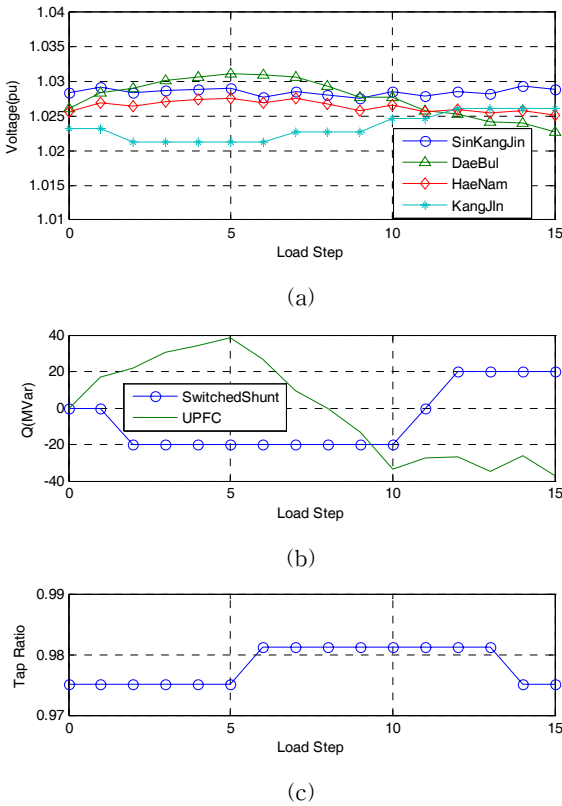


그림 11 신강진모선 전압을 제어하는 경우의 모의 결과
Fig. 11 Simulation results of Sinkangjin bus voltage control case

그림 12는 강진모선의 전압이 UPFC에 의해 일정하게 제어되는 경우의 모의 결과이다. 대불모선의 전압변동 범위는 $V_{D0} - 0.00594p.u.$ 에서 $V_{D0} + 0.00753p.u.$ 까지이다. 그림 11의 결과에 비해 더 큰 전압변동이 생긴다. 다른 모선의 전압변동도 그림 11의 결과보다 크다. 탭비는 변하지 않는다. 강진 모선의 전압을 UPFC와 switched shunt가 제어하므로 신강진모선에 연결된 변압기 탭은 움직이지 않아도 제어됨을 알 수 있다. 신강진모선에 대불모선과 해남모선이 직접 연결되어 있으므로 부하변화에 대한 신강진모선의 전압제어가 더 효과적임을 알 수 있다.

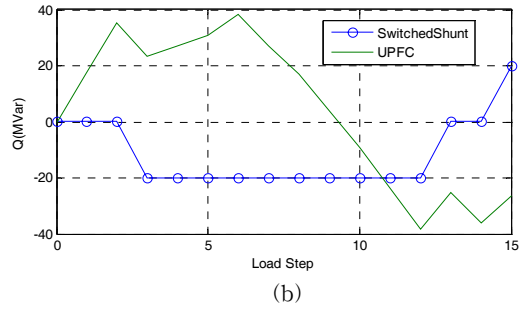
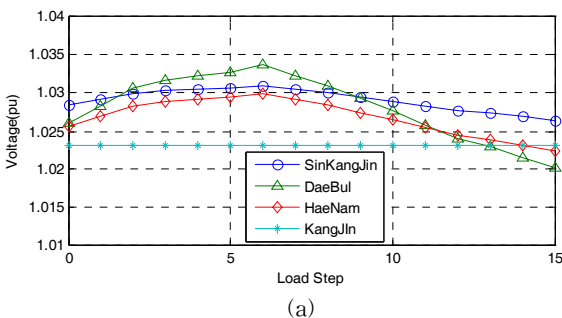


그림 12 강진모선 전압을 제어하는 경우의 모의 결과
Fig. 12 Simulation results of Kangjin bus voltage control case

그림 13은 순동무효전력을 확보하기 위해 UPFC의 흡수 무효전력을 5MVar으로 유지하여 45MVar의 용량성 순동무효전력을 확보하는 경우의 모의 결과이다. 모선의 전압은 그림 12(a)보다 변동이 크다. 조상설비의 스위칭은 그림 12의 경우보다 많아 졌다. 이것은 강진모선의 UPFC의 무효전력 흡수량을 강제적으로 5MVar으로 유지하기 위해 조상설비에서 보상해야할 무효전력이 많아졌기 때문이다. 또한 그림 5와 6에서 설명 했듯이 순동무효전력을 정확하게 확보하기 위해서 그림 7의 방법으로 전압을 조정하기 때문에 전압 변동은 더 크다.

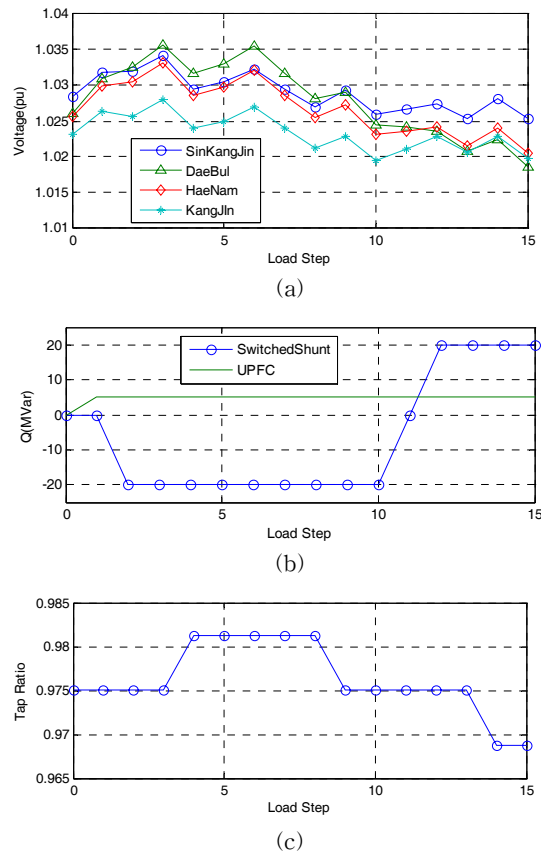


그림 13 $Q_{UPFC} = 5MVar$ 으로 확보하는 경우의 모의결과 (case1)
Fig. 13 Simulation results to secure $Q_{UPFC} = 5MVar$ (case1)

그림 14는 그림 8의 경우를 적용한 모의결과이다. 그림 13의 결과와 비교하면 전압의 변동 폭은 줄어들었고 조상설비의 투입횟수는 같음을 알 수 있다. 부하가 감소하는 구간에서 그림 14(b)는 step1에서 switched shunt가 움직인 반면 그림 13(b)에서는 움직이지 않았다. 부하가 증가하는 구간에서도 그림 14(c)는 step7에서 tap이 움직였다. 반면 그림 13(c)의 tap은 움직이지 않았다. 그림 8의 설명처럼 조상설비를 한 번 더 움직이면 이등분법에 의한 전압 변동이 줄어들어 다음 step부터 $|Q_T - Q_{UPFC}^{Target}| > |Q_{UPFC}^{Target} - Q_p|$ 가 되어 전압 변동이 커지지 않는다. 또한 조상설비의 스위칭도 그림 13의 경우보다 더 많아지지 않는다. 따라서 그림 13의 경우와 비하여 같은 무효전력을 확보하면서도 더 효과적인 전압제어가 된다고 볼 수 있다.

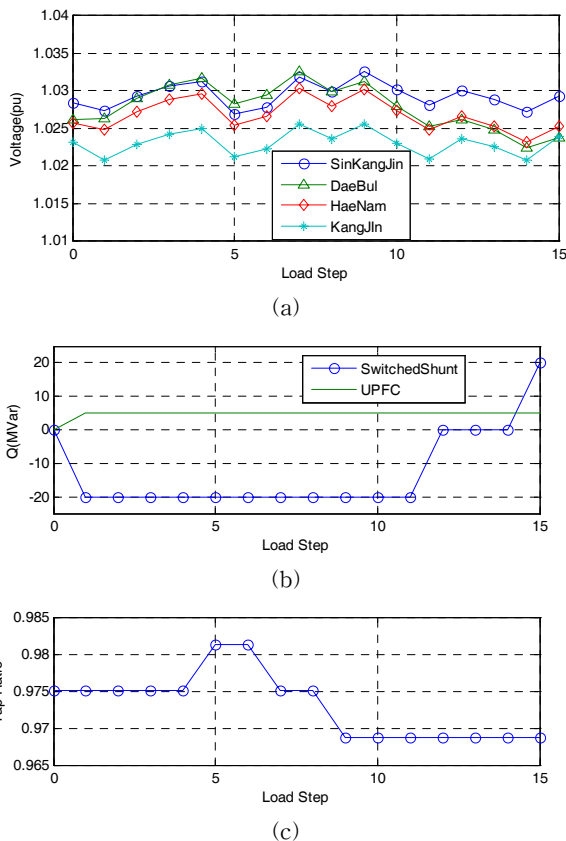


그림 14 $Q_{UPFC} = 5MVar$ 으로 확보하는 경우의 모의결과 (case2)

Fig. 14 Simulation results to secure $Q_{UPFC} = 5MVar$ (case2)

감사의 글

본 연구는 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국과학재단(201013170000)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참 고 문 헌

- [1] "PSS/E-32 Program Application Guide Vol. 1", Shaw Power Technologies Inc.
- [2] Fuerte-Esquivel CR, Acha E, Ambriz-Perez H, "A Comprehensive Newton-Raphson UPFC model for the quadratic PowerFlow Solution of Practical Power Networks." IEEE TRANS. ON POWER SYSTEMS, VOL. 15. NO. 1, FEB. 2000
- [3] Fuerte-Esquivel CR, Acha E. "Newton-Raphson algorithm for the reliable solution of large power networks with embedded FACTS devices", IEE Proceedings Vol. 143, No. 5 Sep. 1996
- [4] Curtis F. Gerald and Patrick O. Wheatley "Applied Numerical Analysis", Addison-Wesley Publishing Company 1984, pp 3-8
- [5] 김수열, 윤중수, 전영수, 박찬섭, 유현호 "80MVA UPFC 운전결과 분석", 2003년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp416-418
- [6] S. J. Ahn, D. W. Lee and S. I. Moom, "Structure and Operation strategies of an automatic supervisory control system for the KEPCO UPFC", Electr Eng(2008), 90:511-519

저 자 소 개



박 지 호 (朴志皓)

1991년 2월 경북대학교 전기공학과 졸업.
1996년 8월 동대학원 졸업(석사).
2001년 2월 동대학원 졸업(박사).
E-mail : pjh@ee.knu.ac.kr



이 상 덕 (李相德)

1978년 6월 29일생. 2005년 경일대학교 공대 전기공학과 졸업. 2011년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011~현재 동대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : (053)940-8802
E-mail : jjamdongsan@naver.com



정 태 영 (鄭太永)

1976년 4월 23일생. 2004년 경북대학교 공대 전자전기공학부 졸업. 2006년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : (053)940-8802
E-mail : sempee94@knu.ac.kr



정 기 석 (鄭 基 石)

1985년 3월 30일생. 2008년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2010년 동 대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터학부 박사과정.

Tel : (053) 940-8802

E-mail : biotronic@naver.com



백 영 식 (白 榮 植)

1950년 7월 8일생. 1974년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1977년 명지대 전기공학과 조교수. 현재 경북대 전기공학과 교수.

Tel : (053) 950-5602

E-mail : ysbaek@mail.knu.ac.kr



서 규 석 (徐 圭 錫)

1975년 11월 4일생. 2003년 경북대학교공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원전기공학과 졸업(박사). 현재 거제대학선박전기과 조교수.

Tel : (055) 680-1558

E-mail : gsseo@koje.ac.kr