

Python을 이용한 전압보상설비의 상호 협조제어 모델링 및 시뮬레이션

논문
59-1-1

Coordinated Control Modeling and Simulation among the Voltage Compensation Equipments Using Python

이 상 덕* · 백 영 식* · 서 규 석**
(Sang-Deok Lee · Young-Sik Baek · Gyu-Seok Seo)

Abstract - The ultrafashionable machinery that require high quality electricity power has been daily come into being. Because domestic power system has been larger and more complicated in accordance with raising power demand by power market requirement. Because of these power market situations, The FACTS(Flexible AC Transmission System) which is power transmission system for the next generation to meet flexible supply the power and reliability has been applied. If they, compensators and FACTS, are used inter-efficiently in range that does not affect the stability and a badly influence the security, they might be increase in the voltage stability of system, supply reliability and also achieve the voltage control in a suddenly changed power system. Therefore we describe and suggest on this treatise that a plan for coordination control between UPFC, Shunt elements(Sh. Capacitors & Sh. Reactors) among compensators and also describe the method to keep or control the voltage of power system in allowable ranges. The method follows that, we used characteristics of each equipment, UPFC would be also settled to keep the identified voltage range in change of load bus, Shunt elements also would be settled to supply the reactive power shortage in out of operating range of UPFC to cope actively with change of the power system. As the result of simulation, it is possible to keep the load bus voltage in limited range in spite of broad load range condition. This helps greatly for the improvements of supply reliability and voltage stability.

Key Words : FACTS, Unified Power Flow Controllers(UPFC), Shunt Compensators, Voltage stability, Python

1. 서 론

전력시장의 요구에 따른 전력수요의 급증으로 현재 전력 시스템은 점점 더 대형화되고 복잡하게 구성되고 있다. 하지만 여러 가지 사회적인 문제로 전력설비의 확충이 계획대로 이루어지지 않고 있으며 이로 인해 급변하는 전력계통에서 전압 및 무효전력 제어는 매우 중요한 문제로 부각된다. 현재 전력계통에서는 안정적인 계통운동을 위해 다양한 전압보상설비들을 운용 중에 있으며, 최근에는 차세대 전력전송시스템인 유연송전시스템(FACTS)을 전력계통에 적용하기에 이르렀다. 이런 상황에서 전력계통의 신뢰도 및 전기품질 유지기준을 만족하고 설비들의 성능 및 효율을 향상시키기 위한 전압보상설비의 효율적인 상호 협조제어가 수반되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 전력계통의 효과적인 전압 및 무효전력 제어를 위한 전압보상설비의 상호 협조제어 방안을 제안하였다. 전압보상설비는 현재 전력계통 내에 전압 및 무효전력 제어를 위해 전반적으로 사용되는 Shunt elements (Sh. Capacitors & Sh. Reactors)와 전력용반도체 소자 기술

의 발달에 따라 확대 적용될 FACTS 기기인 UPFC(Unified Power Flow Controller) 사이의 협조제어를 모의하였다. 시뮬레이션은 실제 계통 해석에 이용되는 PSS/E로 수행하였고, 제안한 협조제어 방안은 PSS/E와 호환이 가능한 외부매크로 프로그램인 Python을 통해 구현하였다. 사례연구로는 『제3차 전력수급계획』에 따른 연도별 부하증가율을 고려한 계통 데이터를 현재 국내에서 UPFC가 운영 중인 강진계 전력계통에 적용한 후 일일부하곡선에 근거한 부하시간대별 운영방안에 따라 전압 및 무효전력을 제어하여 지역계통 내에 존재하는 모선들의 전압유지범위를 만족하도록 하였다.

2. 본 론

2.1.1 UPFC 모델

UPFC는 송전선로의 전력조류에 영향을 미치는 모든 변수(Transmission voltage, Impedance and Phase angle)에 대한 제어가 가능한 궁극적인 의미에서의 전력 제어기이다.

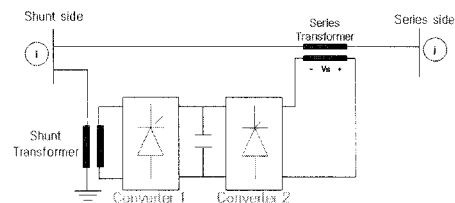


그림 1 UPFC의 시스템 구성
Fig. 1 System configuration for UPFC

* 준 회 원 : 경북대학교 공대 전기공학과 석사과정
† 교신저자, 펠로우회원 : 경북대학교 공대 전자전기공학부, 정교수
E-mail : ysbaek@mail.knu.ac.kr
** 정 회 원 : 거제대학 선박기술계열 교수
접수일자 : 2009년 7월 21일
최종완료 : 2009년 10월 14일

UPFC는 그림 1과 같이 송전선로에 병렬로 연결된 병렬 컨버터와 DC-link 콘데서 그리고 송전선로에 직렬로 연결된 직렬컨버터로 구성된다. 여기서 직렬컨버터로 주입되는 전압 \bar{V}_{se} 를 전류원 \bar{I}_{inj} 로 두면 그림 2와 같이 구성된다.

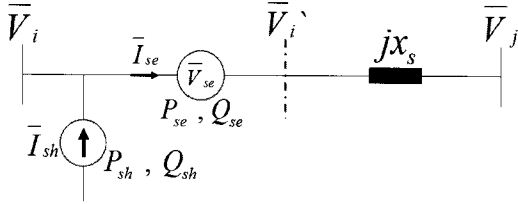


그림 2 UPFC 회로의 정리
Fig. 2 The UPFC circuit arrangement

병렬전류원에 의해 공급되는 유효전력은 식 (1)로 계산된다.

$$P_{conv1} = \text{Re}[\bar{V}_i(-\bar{I}_{sh})^*] = -V_i I_i \quad (1)$$

여기서, \bar{I}_i is the current in phase with \bar{V}_i

UPFC의 손실을 무시할 경우 직렬컨버터와 병렬컨버터에서 생산되는 유효전력은 동일하므로 Pconv2는 식 (2)와 같이 얻어진다.

$$P_{conv2} = rb_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - rb_s V_i^2 \sin \gamma \quad (2)$$

여기서, r, γ : the magnitude and angle of the \bar{V}_{se}

식 (1)과 (2)로부터 I_i 는 식 (3)과 같이 유도할 수 있다.

$$I_i = -rb_s V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - rb_s V_i \sin \gamma \quad (3)$$

그러므로 선로에 주입되는 병렬전류원 \bar{I}_{sh} 를 계산하면 식 (4)와 같음을 알 수 있다.

$$\bar{I}_{sh_{app}} = (I_i + jI_q)e^{j\theta_i} = (-rb_s V_j \sin(\theta_j + \gamma) + rb_s V_i \sin \gamma + jI_q)e^{j\theta_i} \quad (4)$$

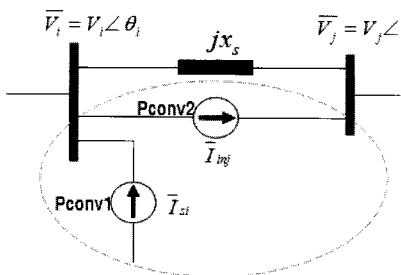


그림 3 UPFC의 전류원 모델 I
Fig. 3 The UPFC current model I

그림 3으로부터 모선에 주입되는 전류원 $\bar{I}_{si}, \bar{I}_{sj}$ 를 정의하면 식 (5), (6)과 같다.

$$\bar{I}_{si} = \bar{I}_{sh} - \bar{I}_{inj} \quad (5)$$

$$\bar{I}_{sj} = \bar{I}_{inj} \quad (6)$$

식 (6)에 표현된 전류원 \bar{I}_{inj} 는 식 (7)로 정의 된다.

$$\bar{I}_{inj} = -jb_s \bar{V}_{se} = -jb_s \bar{V}_i e^{j\gamma} \quad (7)$$

식 (4), (7)를 식 (5), (6)에 대입하면, 식 (8), (9)를 유도할 수 있다.

$$\bar{I}_{si} = (-jb_s V_j \sin(\theta_j + \gamma) + rb_s V_i \sin \gamma + jI_q)e^{j\theta_i} + jrb_s V_i e^{j(\theta_i + \gamma)} \quad (8)$$

$$\bar{I}_{sj} = -jrb_s V_i e^{j(\theta_i + \gamma)} \quad (9)$$

여기서, I_q 는 독립적인 제어변수이고 그림 3의 전류원 주입모델을 거쳐 최종적으로 그림 4와 같이 UPFC의 전류원 모델로 주어진다[1].

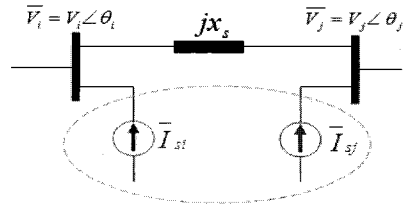


그림 4 UPFC의 전류원 모델 II
Fig. 4 The UPFC current model II

2.1.2 Shunt elements 모델

Shunt elements는 송전계통에 병렬로 설치하여 지상전류를 공급하는 분포리액터와 진상전류를 공급하는 전력용 콘덴서 등이 있다. Shunt elements는 그림 5와 같이 Network bus에 Capacitors와 Reactors로 구성되고 각각의 차단기를 통해서 모선으로 유도성 또는 용량성을 띤 보상성분의 공급이 이루어진다.

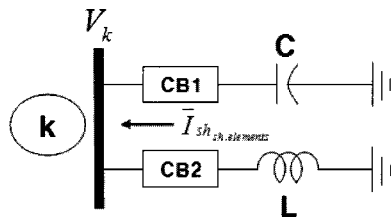


그림 5 Shunt elements의 시스템 구성
Fig. 5 System configuration for Shunt elements

이 장치는 진상 또는 지상에 대하여 단계적 조상만 가능하고 제어성능을 향상시켜 연속조상이 가능하도록 한 것이 일종의 SVC로 볼 수 있다. Shunt elements를 통해 보상되는 전류는 각각 식 (10), (11)과 같다.

$$I_{sh_{capacitive}} = -B_c V_k \quad (10)$$

$$I_{sh_{inductive}} = B_i V_k \quad (11)$$

여기서, B_c : Capacitive susceptance

B_i : Inductive susceptance

2.2 UPFC와 Shunt elements의 상호 협조제어 모델

UPFC와 Shunt elements의 각 장치별 시스템 모델을 이용하여 전력계통의 송전선로에 UPFC와 Shunt elements가 함께 설치되었을 경우 전류주입모델은 그림 6과 같이 표현할 수 있다.

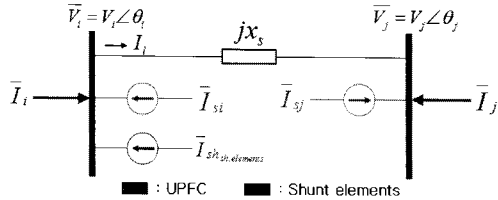


그림 6 UPFC와 Shunt elements의 구성
Fig. 6 Configuration of UPFC and Shunt elements

그림 6으로부터 \bar{V}_i 모선으로 유입되는 전류 \bar{I}_i 를 식 (14)와 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{I}_i = \bar{I}_l - \bar{I}_{si,UPFC} - \bar{I}_{sh,elements} \quad (14)$$

여기서 $\bar{I}_{si,UPFC}$ 와 $\bar{I}_{sh,elements}$ 를 다시 정의하면 식 (15), (16)과 같다.

$$\bar{I}_{si,UPFC} = \bar{I}_{sh,UPFC} - \bar{I}_{inj,UPFC} \quad (15)$$

$$\bar{I}_{sh,elements} = -jb_{s,elements} \times \bar{V}_i \quad (16)$$

식 (15)에서 $\bar{I}_{inj,UPFC}$ 는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있고, \bar{I}_i 는 식 (18)와 같이 유도된다.

$$\bar{I}_{inj,UPFC} = \bar{I}_{sj,UPFC} = -jb_{s,UPFC} \bar{V}_{se} = -jb_{s,UPFC} \bar{V}_i e^{j\gamma} \quad (17)$$

$$\bar{I}_i = \bar{I}_l - (\bar{I}_{sh,UPFC} - \bar{I}_{inj,UPFC}) - (jb_{s,elements} \times \bar{V}_i) \quad (18)$$

이 결과에서 알 수 있듯이 UPFC와 Sh. Elements로부터 주입되는 전류원을 통해 모선의 전압을 제어할 수 있다.

2.3 협조제어 시 주요 고려사항

급변하는 전력계통의 변화에 따른 시스템운영에서 신뢰도와 전기품질을 확보하는 동시에 각 설비를 충분히 활용하기 위해서는 계통변화와 각 설비의 특징을 고려하여 상호 협조제어 해야만 한다.

효과적인 계통운영을 위한 협조제어 시스템에서 다음과 같은 주요 고려사항에 따라 운영한다.

- 정상상태 동안에 있어 UPFC의 중요한 목적 중 하나는 유효전력 손실의 감소에 있다. 유효전력의 손실은 직렬 컨버터의 P 기준치와 밀접한 관련이 있다[2]. 그러므로 UPFC는 최적조류계산을 통해 결정된 P 기준치에 따라 식 (19)처럼 유효전력 손실최소화를 이끌어 내고, 빈번히 변화하는 부하상황에 신속히 대처할 수 있도록 협조제어를 통해

항상 여유용량을 확보할 수 있도록 한다[3].

$$Min Loss = \sum_k^{NL} (P_{ij} + P_{sh}) \quad (19)$$

여기서, NL : total number of line

I, j : index of buses connected to line k

- UPFC가 항시 계통의 변화에 대응할 수 있도록 Sh. Elements와 협조제어를 통해 식 (20)과 같이 UPFC의 Q_{upfc} 값이 항시 운전 가능하도록 UPFC의 여유용량을 확보하도록 한다.

$$Q_{sh,UPFC}^{Real} \leq Q_{sh,UPFC}^{Limited} \quad (20)$$

- Sh. C와 Sh. R은 기계식 장치에 의해 투입되므로 계통제어에 한계가 있다. 또한 잦은 스위칭은 장치의 수명 감소와 많은 서비스 시간을 필요로 할 수 있다. 그러므로 스위칭 횟수가 최소가 되는 Sh. elements의 Q_{shunt} 용량을 결정해 Sh. Elements의뱅크 투입횟수를 계통상태가 변화하는 동안 최소가 되도록 한다.

- 일일부하곡선에서 부하 수준에 따른 경부하시간 및 중부하시간 그리고 첨두부하시간을 고려하여 각 부하시간에 적절한 전압유효범위를 두어 전압유지기준을 만족하도록 운영한다.

위와 같은 주안점을 바탕으로 전력계통을 운영하면 시스템의 유효전력 손실을 최소화하고 UPFC는 항상 여유용량을 확보할 수 있어 계통변화에 능동적으로 대처할 수 있고, 기계식 스위칭 기기인 Sh. Capacitors와 Sh. Reactors의 스위칭 횟수를 감소하여 기기의 성능향상을 기대할 수 있다. 또한 부하시간대별 운영방안에 근거하여 전압유효범위를 두면 경부하시간에 페란티효과(Ferranti effect)에 의한 전압 상승에 대비하고 부하증가분에 대한 피크부하일 때 안정적으로 계통을 운영할 수 있다.

3. 사례연구

3.1 KEPCO 강진계 전력계통

그림 7과 8은 강진 UPFC의 구성 및 계통 연계 방식을 나타내었다. 주변 계통 특성을 통해 본 UPFC의 설치 배경은 광양~신강진간 선로건설 계획이 2010년으로 변경됨에 따라 신광주~신강진간 선로나 광양~여수간 선로(345[kV])에 사고가 발생할 경우 강진 및 인근 154[kV] 계통에 저전압과 선로의 과부하 현상이 발생하는 것으로 나타나 이에 대한 대책으로 순천~서순천과 승주~계림간의 선로를 보강하는 방안이 고려되었다.

그러나 선로보강에 의한 방안은 신광주~신강진 선로(345[kV])에 고장이 발생할 경우 신광주(345[kV]) 변전소 주변압기의 과부하 및 인근 154[kV] 선로의 과부하 그리고 신강진 계통의 인근에서 발생하는 저전압 현상 등을 막을 수는 없었다.

이와 같은 문제의 해결방안으로 FACTS기기의 설치가 고려되었으며 엔지니어링 해석 결과, FACTS기기의 설치가 이러한 문제들에 대해 보다 효과적인 것으로 나타났다. 보상기기의 타입은 직렬보상과 병렬보상, 그리고 조류제어가 가능한 UPFC로 결정되었고 병렬측은 154[kV] 강진에 직렬측은 강진-장흥의 선로에 설치되는 것으로 결정되었다[4].

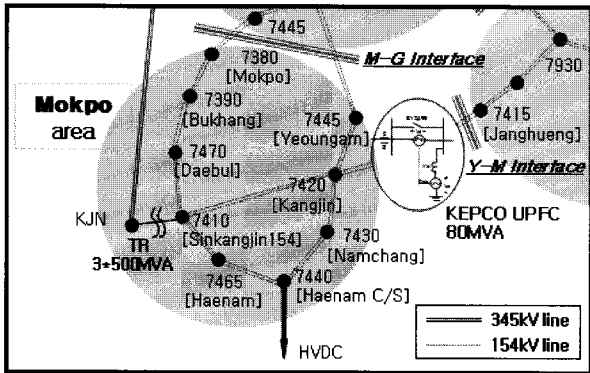


그림 7 전라남도 지역의 전력계통도
Fig. 7 Power System of Jeonranamdo

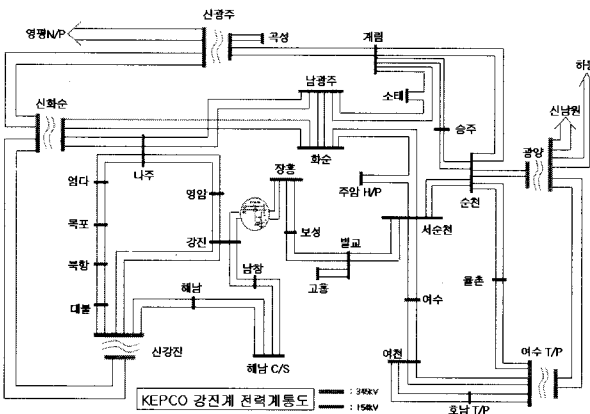


그림 8 강진 UPFC의 계통 연계 방식
Fig. 8 System Interconnection of Kangjin UPFC

3.2 일부하곡선에 근거한 협조제어 운영방안

현대 사회에서 전력수요의 급증에 대한 부하특성은 대도시 인구 밀집지역을 중심으로 증가하는 추세에 있다. 2006년 12월 산업자원부에서 발표한 『제3차 전력기본수급계획』에 따르면 우리나라의 전력수요량은 2010년까지 연평균 4.6%의 증가율을 기록하다가 이후에는 2015년까지 연평균 1.8%, 2020년까지는 연평균 1.0%가 증가할 것으로 예상했다.

전력수급기본계획은 전력수급의 기본방향과 장기 전망, 전력설비 시설계획, 전력수요관리 등이 포함된 종합적인 전력정책이다. 기본계획은 장기 전력수급안정을 위한 전력정책의 기본방향과 전력수급에 관한 시장정보를 제공하고 있다. 특히 전기사업자는 발전소 건설의향이 반영된 수급계획을 근거로 발전사업을 추진하고, 적절한 시기에 공급설비 등이 투자되도록 하여 전력수급 안정목표에 따라 전력계통을 안정적으로 운영하는 데 도움이 된다.

그러므로, 『제3차 전력수급계획』에 따른 부하증가율을 고려한 전력계통데이터를 현재 국내에서 UPFC가 운영 중인 KEPCO(Korea Electric Power Corporation) 강진계 전력계통에 적용하였다. 그림 9는 수요예측을 통한 결과를 바탕으로 2006년도 전력수요량에 대한 일일부하곡선을 판단하여 제3차 전력수급계획에 따른 부가증가율을 근거로 2010년까지의 예상 전력수요량에 대한 일일부하곡선을 나타내었다.

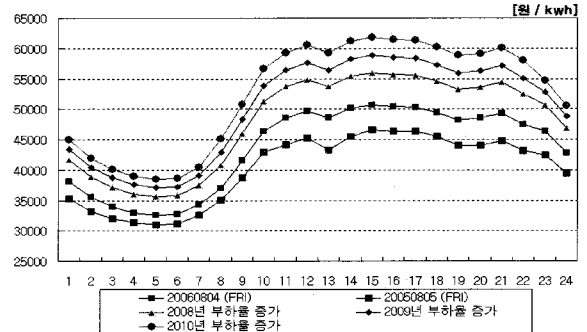


그림 9 전력수요량에 따른 일부하곡선
Fig. 9 Daily Load Curve as the Power demand energy

부하시간대별 협조제어에 따른 운영방안은 먼저 경부하시간, 중부하시간, 첨두부하시간에 따라 운영방안을 정하였다. 협조제어를 통해서 Vref. 전압을 특정 값으로 정하는 것 보다는 부하시간대별로 차이를 뒤서 운영하는 것이 바람직하다고 판단되며, 시뮬레이션에서는 부하변화를 고려하여 경부하시간을 심야 22시에서 새벽 6시로 보았고, 중부하시간과 첨두부하시간을 아침 7시부터 저녁 21시까지로 보고 경부하 시간에는 페란티효과에 의해 전압이 상승하는 것을 고려하여 전압을 감소시켜 운전하고, 중부하 및 첨두부하 시간에는 부하증가분을 고려하여 전압을 상승시켜 운영한다.

3.3 부하의 감소와 증가에 따른 협조제어 시뮬레이션 및 결과

3.3.1 부하의 감소

전라남도 지역의 강진계 전력계통에서 시스템의 부하가 증가 또는 감소함에 따라 UPFC와 Sh. Elements의 상호 협조제어를 검토해 보았다. 인접한 모선은 154kV의 모선으로 신강진, 대불, 강진, 해남 그리고 북향, 목포, 영암, 남창모선을 포함하여 계통부하를 변화시켰다. 부하가 감소함에 따른 협조제어 시뮬레이션 결과를 그림 10에 나타내었다.

시뮬레이션에 있어서 UPFC의 Shunt converter Q_{shUPFC} 값을 10[MVA]로 두고, Shunt elements는 각 시뮬레이션마다 뱅크-스텝 변화량을 각각 10, 15, 20 [MVar]의 값을 갖도록 한 후 부하 변화를 모의하였다. 부하가 감소함에 따라 Shunt elements의 뱅크-스텝에 변화에 의해 모선에 공급(투입)되는 $Q_{sh,sh.elements}$ 는 양(+)의 값을 가지는데, 그것은 Shunt elements가 Reactors에 의해 해당 모선에서 발생하는 무효전력을 소비(흡수)함을 나타낸다.

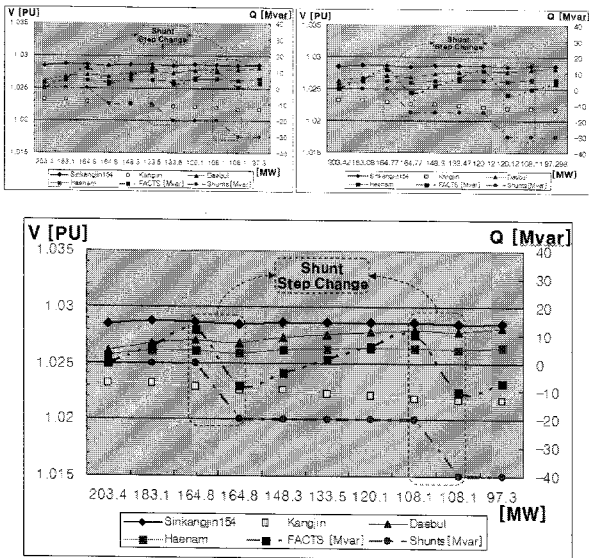


그림 10 부하의 감소
Fig. 10 Decrease in Quantity

UPFC의 제어모드는 자동전압제어모드로 신강진 154kV 모선의 전압을 일정하게 유지하도록 전압기준신호를 보내며, 인접한 모선의 전압 또한 설비가 계통에 미치는 영향을 통해 특정 전압범위를 갖게 된다. 그리고 Sh. Elements는 기능은 부하의 변화에 반응하여 UPFC가 제어가능 범위를 벗어나게 되었을 때, UPFC의 Q_{upfc} 가 여유용량을 가질 수 있도록 전력계통의 무효전력을 소비(흡수)한다. 그림 10에 나타난 것처럼 부하가 감소함에 따라 공급되는 Q_{shunt} 양이 UPFC의 Q_{upfc} 의 공급한계용량에 근접할수록 Q_{shunt} 의 투입되는 뱅크-스텝의 변화 횟수가 줄어든다.

3.3.2 부하의 증가

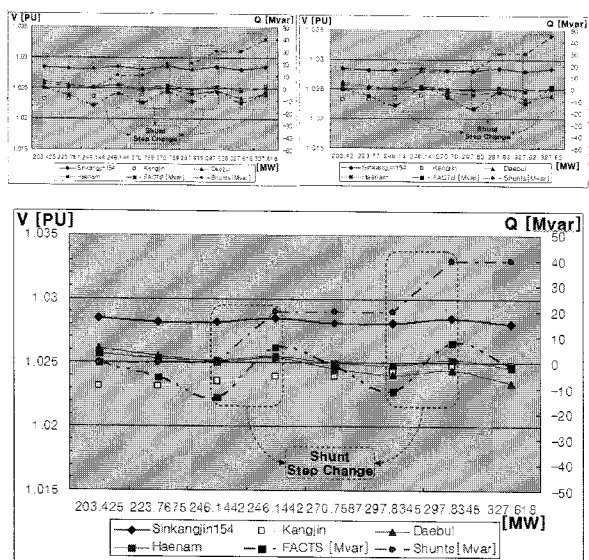


그림 11 부하의 증가
Fig. 11 Increase in Quantity

부하가 감소할 때와는 반대로 강진계 전력계통의 부하를 증가시켜 보았다. 인접한 모선의 수는 부하를 감소할 때의 모선수와 같다. 계통부하를 증가시키에 따라 UPFC와 Sh. Elements 사이의 협조제어를 모의한 결과를 그림 11에 나타내었다.

부하가 증가함에 따른 Sh. Elements의 뱅크-스텝의 변화(바뀜)에 대해 Q_{shunt} 는 음(-)의 값을 가지는데, 그것은 계통에서 발생하는 무효전력을 해당 모선에 공급(투입)함을 의미한다. 강진계 전력계통이 100[MW] 증가하는 동안 Sh. Elements의 무효전력 투입 양 Q_{shunt} 를 3단계로 구성하여 시뮬레이션 한 결과 Q_{shunt} 투입 양에 따라 뱅크-스텝 횟수가 변화하게 된다.

계통부하가 증가함에 따라 협조제어 시뮬레이션을 한 결과에서 알 수 있는 것은 부하가 감소할 때와 동일하게 투입되는 Sh. elements의 무효전력 양 Q_{shunt} 가 UPFC의 Q_{upfc} 의 공급한계용량에 근접할수록 투입되는 뱅크-스텝의 Q_{shunt} 의 변화 횟수가 줄어든다.

지금까지 수행중인 시뮬레이션은 계통부하의 단순 증가 또는 감소에 따른 협조제어이다. 그것은 지역 부하의 특성을 고려하지 않은 단순 비율에 따른 증가였다. 이를 통해 계통부하의 증가 또는 감소에 따른 협조제어에서 UPFC의 공급한계용량에 따른 Sh. Elements 뱅크-스텝 횟수를 최소로 하는 Sh. Elements의 무효전력 보상용량 Q_{shunt} 의 결정에 도움을 준다.

3.4 UPFC & Shunt elements 간 협조제어 시뮬레이션 결과 및 해석 I

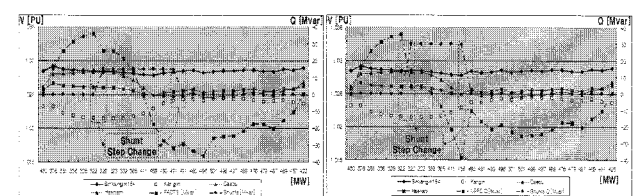
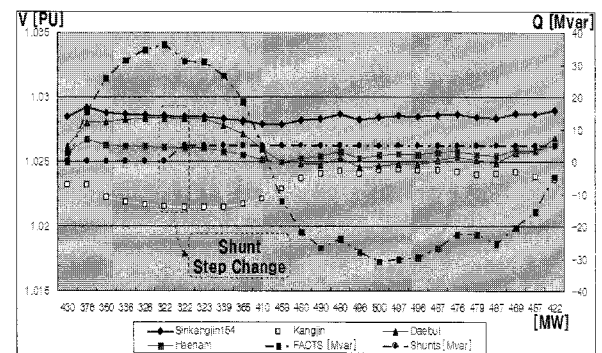


그림 12, 13, 14 UPFC와 Shunt elements의 협조제어
Fig. 12, 13, 14 Coordination Control of UPFC and Sh. elements I

일부하곡선에서 전체 평균부하에 대한 각 시간대별 비율을 전라남도 강진계 전력계통에 적용하여 협조제어 시뮬레이션을 하였다. 그림 12는 일부하곡선을 처리하는 동안 Sh. Elements의 뱅크-스텝이 322[MW] 지점에서 1차레 변화한

다. 그림 13, 14는 일부하곡선을 처리하는 동안 Sh. Elements의 각각 322[MW], 491[MW]와 322[MW], 458[MW]에서 변화하여 총 뱅크-스텝이 2차례 변화한다. 각 뱅크-스텝마다 일부하곡선을 처리하는 동안 전압유지 범위를 만족하며, 신강진모선의 전압수준을 일정하게 유지할 수 있었다. 또한 UPFC의 Q_{upfc} 양이 한계용량을 벗어날 경우 협조제어를 통해 확보할 수 있는 UPFC의 Q_{upfc} 양은 뱅크-스텝의 공급 또는 소비되는 Sh. elements의 Q_{shunt} 양이 차이가 남에 따라 확보되는 용량은 틀리지만 일부하곡선에서 부하가 증가하기 시작하는 부분에서 뱅크-스텝이 변화하기 때문에 UPFC의 Q_{upfc} 여유용량 확보에 효과적이다.

이와 같이, 제안된 운전방안에 따라 부하변화를 일부하곡선으로 적용해 보았을 때 부각되는 효과는 UPFC와 Sh. elements의 협조제어에서 Sh. elements의 뱅크 투입 횟수를 감소하는 효과가 있다. 이는 서비스 시간의 감소와 보수비용의 감소를 나타낸다. 또한 전압제어의 효과에 있어서 UPFC와 Sh. elements 간의 협조제어는 전력계통 각 모선의 전압을 유연성 있게 운영할 수 있으며, 신뢰도 향상과 안정도 향상을 기대할 수 있다.

3.5 UPFC와 Shunt elements의 상호 협조제어 시뮬레이션 결과 및 해석 II

발전 및 전력설비들이 2008년도에 확충될 것으로 기대되어 2008년까지의 연도별 부하증가율을 고려한 일부하곡선을 강진계 전력계통에 적용한 후 협조제어 모의결과를 각각 그림 15, 16, 17, 18에 나타내었다. 여기서, UPFC의 제어 한계용량은 30[MVar]이고 Sh. Elements가 뱅크-스텝을 통해 공급 가능한 보상용량은 30[MVar]이고 인접한 모선은 선행한 시뮬레이션의 모선과 같다. 결과에서 알 수 있듯이 일일부하곡선에 따라 각 모선의 부하가 변화할 때 부하변화량의 보상에 따라 UPFC가 제어 용량을 벗어날 것으로 판단되면, Sh. Elements의 보상으로 UPFC의 병렬컨버터가 여유용량을 갖도록 제어되므로 UPFC는 계통의 변화에 항상 대응할 수 있었다.

그림 15는 부하시간대별 전압변화 없이 운전 초기에 결정된 V_{ref} 를 유지하게 된다. 하지만 부하시간대에 따라 전압변위를 두는 것이 전력계통의 페란티효과나 피크부하에 전압강하를 고려할 때 효과적이므로 그림 16, 17, 18은 부하시간대에 따른 운영방안에 따라 V_{ref} 의 전압변위를 각각 0.002[PU], 0.003[PU], 0.004[PU]로 협조제어한 결과를 그려보았다. 그림에서 알 수 있듯이 UPFC와 Sh. Elements가 협조제어 됨에 따라 부하시간대별 전압변위를 두는 것이 심야시간에 부하측 유도성 리액턴스의 감소에 따른 페란티효과에 대응하여 전압을 강하시킬 수 있고, 중부하 및 첨두부하 시간에 무효전력 소비가 증가함에 따라 부하모선의 전압 불안정에 대비해 전압을 상승시킬 수 있어 전력계통을 보다 더 원활하게 운영할 수 있을 것이다.

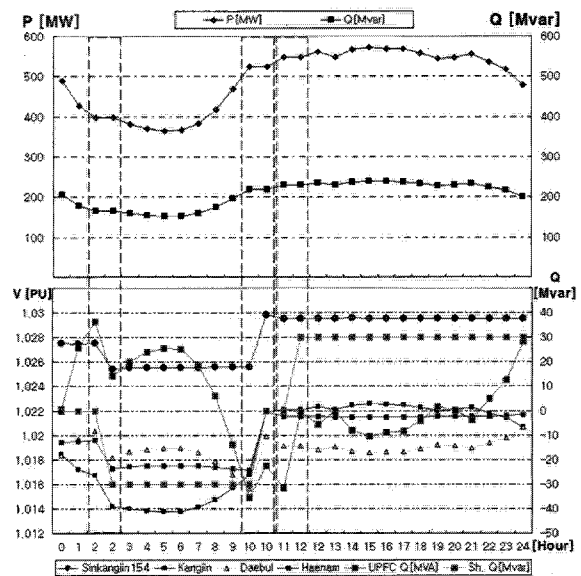


그림 16 Coordination Control V_{ref} . 변화(0.002[pu])
Fig. 16 V_{ref} . Variation (0.002[pu])

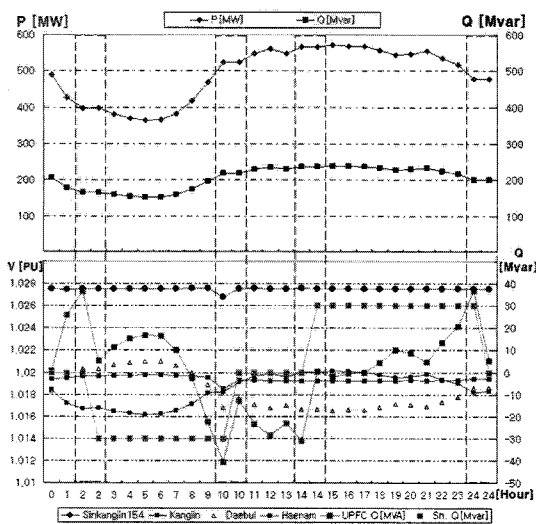


그림 15 Coordination Control V_{ref} . 고정
Fig. 15 V_{ref} . Fixed

□ : Shunt elements의 보상지점

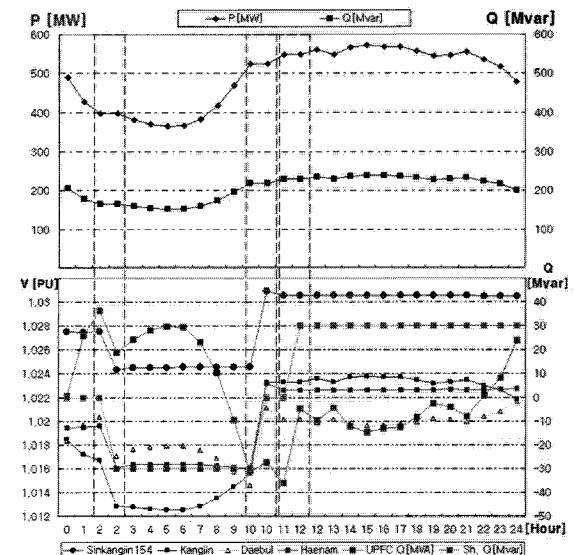


그림 17 Coordination Control V_{ref} . 변화(0.003[pu])
Fig. 17 V_{ref} . Variation (0.003[pu])

그러나 그림 18과 같이 전력계통의 적절한 해석 없이 V_{ref} 의 변위를 크게 하는 것은 Sh. Elements의 공급 뱅크-스텝 투입용량을 추가적으로 요구하게 되고, 뱅크-스텝 투입횟수 또한 증가하게 되어 전력계통을 운영하는 데 있어 비효율적인 결과를 가져오게 된다. 그러므로 지역계통 내부하변화에 따른 전력계통의 상황과 각 장치의 보상 용량에 따른 적절한 전력계통해석을 필요로 한다.

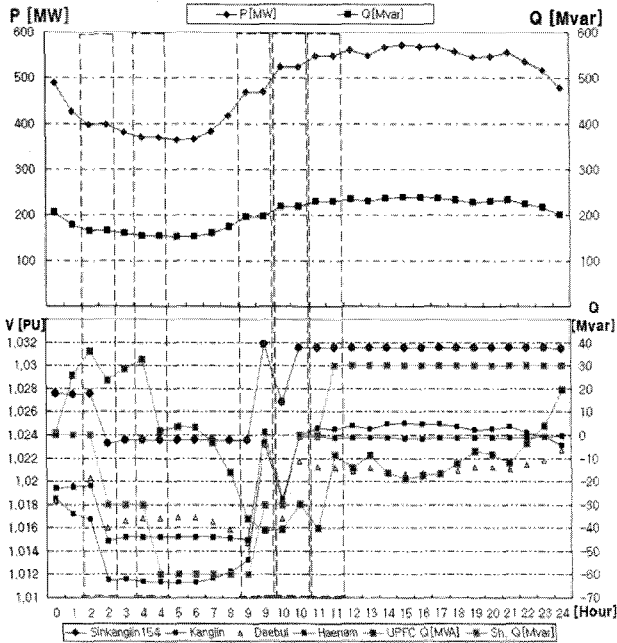


그림 18 Coordination Control V_{ref} 변화(0.004[pu])
Fig. 18 V_{ref} Variation (0.004[pu])

표 1은 각 V_{ref} 의 전압변위에 따른 Shunt elements의 뱅크-스텝 투입횟수를 나타내었다. 여기서 뱅크투입횟수가 최소가 되는 V_{ref} 의 전압변위인 0.002[PU] 또는 0.003[PU] 사이에서 전압의 변위를 결정해야하는데, 각 변위에 따른 협조제어에서 0.003[PU]의 V_{ref} 전압변위에 따른 협조제어가 부하변화에 대해 UPFC의 여유용량의 확보에 있어 더 효과적이므로 0.003[PU]의 전압변위가 운영에 있어 가장 효과적인 것을 알 수 있다.

표 1 Shunt elements의 뱅크투입횟수
Table 1 The Bank Switching Number of Shunt elements

V_{ref} 고정	0.002[PU] 변화	0.003[PU] 변화	0.004[PU] 변화
Sh. Elements 30[Mvar]	4	3	5

3.6 Python 및 협조제어 흐름도

Python은 고급 프로그래밍 언어로 플랫폼 독립적이며, 인터프리터식, 객체지향적, 동적 타이핑(Dynamically Typed) 대화형 언어이다. 높은 확장성 등 다양한 장점을 바탕으로 초보자부터 전문가까지 폭넓은 사용자층을 보유하고 있고, 대학을 비롯한 여러 교육기관, 연구기관 및 산업계에서 이용이 증가하고 있다. PSS/E에서는 Python을 IPLAN과 Fortran과 함

께 스크립트 언어로서 지원하고 있다. 그림 19와 같이 윈도우 창을 통해 사용자가 원하는 다양한 결과를 얻을 수 있다. 제안된 협조제어 방안은 Python을 통해 제어된다.

정상상태에서 전압보상설비들 사이의 협조제어에 관한 흐름도(Flow Chart)를 그림 20과 같이 표현하였다. 전압보상설비의 보상지점에서 계통 상태의 파악과 해석을 통하여 부하시간대별 전압변위를 두어 Sh. Elements의 뱅크-스텝 투입 횟수를 감소시켜 유연한 계통제어를 하는 것이다. 협조제어 계획에 따른 VSET'(The reference signal of shunt converter)는 신강진모선의 전압을 제어하도록 식 (21)에 의해 결정된다[5].

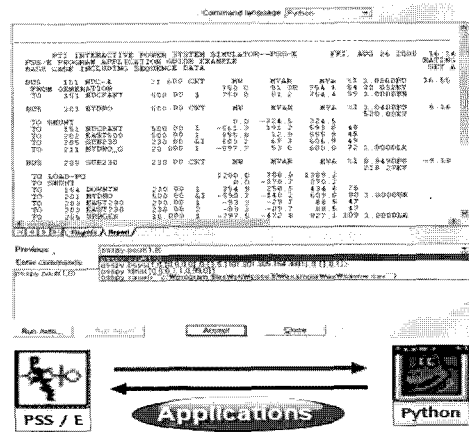


그림 19 PSS/E 에서의 Python
Fig. 19 Python in PSS/E

또한 Sh. Elements의 UPFC가 여유용량을 갖도록 무효전력을 공급 또는 흡수하며, 이와 같은 제어특성을 이산시스템으로 표현하면 식 (22)와 같이 표현할 수 있다.

이 방안에 따른 협조제어를 통해서 모선의 전압을 허용범위 또는 일정범위 안으로 유지할 수 있고, 비상시 능동 제어를 위해 운전여유를 확보하게 된다.

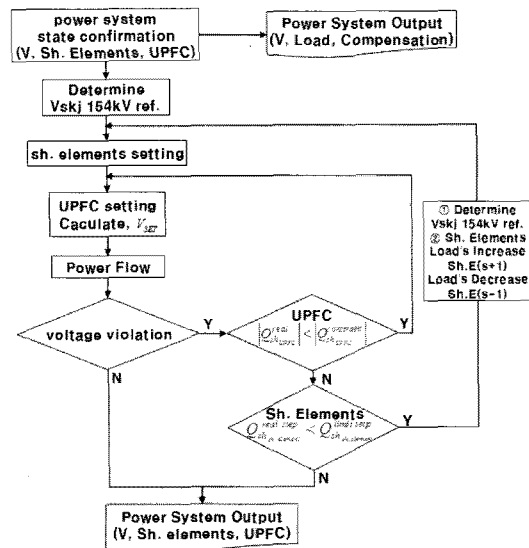


그림 20 정상상태에서 협조제어 운영방안
Fig. 20 Control Scheme of Coordination Control

$$V_{SET} = \begin{cases} V_{KJ} - S_V(V_{SKJ} - V_{SKJ,ref}) & \dots Q_{sh\ UPFC}^{real} \leq Q_{sh\ UPFC}^{constraint} \\ V_{SET} & \dots Q_{sh\ UPFC}^{real} > Q_{sh\ UPFC}^{constraint} \end{cases} \quad (21)$$

여기서, $S_V = \frac{\Delta V_{KJ}}{\Delta V_{SKJ}} \approx 1.3$

$$Sh.E(s+1) = Sh.E(s) + Q_{shunt}^{steps} f(e_Q(s), Load(s))$$

$$Load(s) = \begin{cases} 1 & \dots e_Q = 1 \text{ and Load's Increase} = 1 \\ -1 & \dots e_Q = 1 \text{ and Load's Decrease} = 1 \\ 0 & \dots otherwise \end{cases} \quad (22)$$

$$e_Q(Q_{shunt}^{real}, Q_{upfc}^{real}) = \begin{cases} e_Q = 1 & \dots |Q_{shunt}^{real}| > |Q_{upfc}^{real}| \\ e_Q = -1 & \dots |Q_{shunt}^{real}| < |Q_{upfc}^{real}| \\ 0 & \dots otherwise \end{cases}$$

여기서, s : shunt bank-steps changes

Q_{shunt}^{step} : step capacity of Q_{shunt}

e_Q : Q_{shunt} error of each equipment

4. 결 론

본 논문에서는 각 전압보상설비의 특성을 고려한 UPFC와 Sh. elements의 상호 협조제어 운영방안을 제안하였다. 협조제어 운영방안에 있어 고려한 중요한 목적은 먼저 전력계통의 유효전력손실의 최소화와 효과적인 협조제어 즉, UPFC는 항상 제어 가능한 여유용량을 확보할 수 있도록 Sh. Elements는 UPFC의 부족한 무효전력을 보상하는 것이다. 또한 Sh. elements의 뱅크-스텝을 통해 무효전력을 공급 또는 흡수할 때 부하시간대별 운영방안으로부터 기준전압 Vref를 변화시켜 뱅크-스텝의 투입 횟수를 최소로 하는 것이다.

사례연구에서 『제3차 전력수급계획』에 따른 연도별 부하증가율을 고려한 계통 데이터를 현재 국내에서 UPFC가 운영 중인 강진계 전력계통에 적용한 후 일부하곡선에 근거한 부하시간대별 협조제어 운영방안을 적용해 본 결과 UPFC와 Sh. Elements 간의 협조제어를 통해 전력계통의 부하가 변화하는 동안 모선의 전압을 허용범위 또는 일정범위로 유지할 수 있고, UPFC의 여유용량 확보됨에 따라 다양한 외란에 노출된 전력계통시스템을 항상 능동적으로 대처할 뿐 아니라 전력계통을 유연하게 제어할 수 있다. 그리고 Sh. elements의 뱅크-스텝 투입 횟수를 감소할 수 있다.

이는 각 전압보상설비의 효율적인 협조제어 운영을 의미한다. 그것은 UPFC의 이용률을 극대화하는 것이고, Sh. Elements의 뱅크-스텝 투입 횟수의 감소에 따른 서비스 시간의 감소와 기기의 수명연장 및 보수비용의 감소에 도움이 된다. 더하여, 수시로 변화하는 전력계통에 있어 협조제어를 통해 전압유지기준을 만족함에 따라 전압안정도와 공급신뢰도 향상을 기대할 수 있어 전력계통의 신뢰도 및 전력품질을 충족시킬 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Sadikovic, Single-machine infinite bus system, internal report, July 2003
- [2] YAU, K.Y., 2003, The Hints in Organising a Good Conference, HKIE Visionary Journal, HKIE, 2003: p99-100.]
- [3] B. H. Chang, "Steady-state Operational Strategies of UPFC in the KEPCO" KIEE International Transactions on PE, Vol. 3-A No.3. pp. 161-167, 2003
- [4] "강진변전소 80MVA UPFC 시스템 소개" 전기설비지, 2003년 03월호
- [5] Seon-Ju Ahn, "Automatic and Supervisory Control System for KEPCO UPFC" PS1-PR1-08 002-000045, ICEE 2006, July 2006

저 자 소 개

이 상 덕 (李 相 德)



1978년 6월 29일생. 2005년 경일대학교 공대 전기공학과 졸업. 현재 경북대학교 대학원 전기공학과 재학(석사).
Tel : (053) 940-8802
E-mail : jamdongsan@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(공박). 1977년 명지대 전기공학과 조교수. 현재 경북대 전자전기공학부 교수.
Tel : (053) 950-5602
E-mail : ysbaek@mail.knu.ac.kr

서 규 석 (徐 圭 錫)



1975년 11월 4일생. 2003년 경북대학교 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 거제대학 선박기술계열 교수.
Tel : (055) 680-1558
E-mail : gsseo@koje.ac.kr