

Python을 이용한 전압보상설비들 간의 협조제어 모델링 및 시뮬레이션

이상덕 *, 백영식 **
 경북대학교

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

Sang-Deok Lee *, Young-Sik Baek **
 Kyungpook National University

Abstract - 현재 다양한 전압보상설비들이 전력계통에 적용됨에 따라 각 기기의 특성을 이용한 설비간 상호 작용을 통해 전력공급의 유연성을 확보하고 설비들의 효율적인 활용이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 전압보상설비들[UPFC(Unified Power Flow Controller ◦ Shunt elements(Sh. Capacitor & Sh. Reactor) ◦ ULTC(Under Load Tap Changing)] 간의 협조제어 모델링 및 시뮬레이션을 통해 각 부하모션별 전압 요구치를 만족하도록 계통의 전압을 제어 및 유지하는 방안을 제안하였다. 이는 기기의 성능향상과 급변하는 전력계통 상황에 능동적인 대처가 가능할 것으로 기대되고, 수용가에 양질의 전력 공급이 가능하게 될 것이다.

1. 서 론

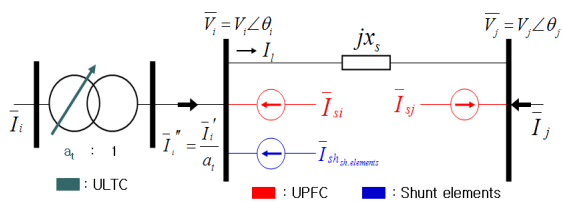
전력시장의 요구에 따른 전력수요의 급증으로 현재 전력시스템은 점점 더 대형화되고 복잡하게 구성 된다. 하지만 여러 가지 사회적인 문제로 전력설비의 확충이 계획대로 이루어지지 않고 있다. 따라서 급변하는 전력계통에 있어 전압 및 무효전력 제어는 매우 중요한 문제로 부각된다. 현재 전력계통에서는 안정적인 계통운동을 위해 다양한 전압보상설비들을 운용 중에 있으며, 최근에는 차세대 전력전송시스템인 유연송전시스템(FACTS)을 전력계통에 적용하기에 이르렀다. 이런 상황에서 전력계통의 신뢰도 및 전기품질을 유지기준을 만족하고 설비들의 성능 및 효율을 향상시키기 위한 전압보상설비들 간의 효율적인 협조제어가 수반되어야 할 것이다.

따라서 본 논문에서는 전력계통의 효과적인 전압 및 무효전력 제어를 위한 전압보상설비들 간의 최적운동을 위한 협조제어 방안을 제안하였다. 전압보상설비들은 현재 전력계통 내에 전압 및 무효전력 제어를 위해 전반적으로 사용되는 Shunt elements(S.C & S.R) ◦ ULTC와 전력용반도체 소자 기술의 발달에 따라 확대 적용될 인버터형 FACTS 기기인 UPFC 간의 협조제어를 모의하였다. 시뮬레이션은 실제 계통 해석에 이용되는 PSS/E로 수행하고, 제안한 협조제어 방안은 PSS/E와 호환이 가능한 외부매크로 프로그램인 Python을 통해 모델링하였다. 사례연구로는 『제3차 전력수급계획』에 따른 연도별 부하증가율을 고려한 계통 데이터를 현재 국내에서 UPFC가 운영 중인 강진계 전력계통에 적용한 후 일부하곡선에 근거한 부하시간대별 운영방안에 따라 전압 및 무효전력을 제어하여 지역계통 내에 존재하는 모선들의 전압유지범위를 만족하도록 하였다.

2. 본 론

2.1 전압보상설비의 협조제어 모델

협조제어 시스템의 구성에 있어서 ULTC가 포함된 UPFC와 Shunt elements 등가회로의 동적해석을 위해 전류주입모델로 구성하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 변압기를 거쳐 모선으로 유입되는 전



<그림 1> 협조제어 시스템의 등가모델 구성

류 \bar{I}'' 는 식 (1)과 같이 정의되고, \bar{I}' 는 UPFC와 Shunt elements로부터

$$\bar{I}'' = \frac{\bar{I}'}{a_t} \dots (1)$$

주입되는 전류 \bar{I}^{si}_{UPFC} , $\bar{I}^{sh}_{sh.elements}$ 로부터 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{I}_i = \bar{I}_l - \bar{I}^{si}_{UPFC} - \bar{I}^{sh}_{sh.elements} \dots (2)$$

여기서 \bar{I}^{si}_{UPFC} , $\bar{I}^{sh}_{sh.elements}$ 를 다시 정의하면 식(3), 식(4)와 같다. 식 (3)

$$\bar{I}^{si}_{UPFC} = \bar{I}^{sh}_{UPFC} - \bar{I}^{inj}_{UPFC} \dots (3)$$

$$\bar{I}^{sh}_{sh.elements} = -j\mathbf{b}_{sh.elements} \times \bar{V}_i \dots (4)$$

에서 \bar{I}^{inj}_{UPFC} 는 식 (5)로 나타내고, \bar{I}' 는 식 (6)과 같이 정리된다.[1] 이

$$\bar{I}^{inj}_{UPFC} = \bar{I}^{sj}_{UPFC} = -j\mathbf{b}_{s_{UPFC}} \bar{V}_{se} = -j\mathbf{b}_{s_{UPFC}} \bar{V}_i e^{j\gamma} \dots (5)$$

$$\bar{I}' = \bar{I}_l - (\bar{I}^{sh}_{UPFC} - \bar{I}^{inj}_{UPFC}) - (j\mathbf{b}_{sh.elements} \times \bar{V}_i) \dots (6)$$

로서 \bar{V}_i 모선의 전압 및 무효전력제어를 위해 UPFC와 Shunt elements를 통해 주입되는 전류에 의해서 모선의 전압을 제어할 수 있고, 또한 ULTC의 Tap Ratio에 의해 모선의 전압제어가 가능함을 알 수 있다.

2.2 협조제어 시 주요 고려사항

각 설비의 성능 및 효율을 충분히 활용하기 위해서는 설비의 특징을 고려하여 협조제어 하여야 한다. 효과적인 협조제어를 위해 다음과 같은 주요 고려사항에 따라 운영된다.

- UPFC는 OPF를 통한 유효전력 손실의 최소화를 이끌어 내고, 빈번히 변화하는 부하상황에 신속히 대처할 수 있도록 협조제어를 통해 항상 여유용량을 확보하도록 한다.
- ULTC와 Sh.C & Sh.R는 기계식 스위칭에 의해 스위칭 되는 Tap 위치 변화와 뱅크 투입횟수를 최소화 한다.
- 경부하시간 및 중부하 및 침투부하시간을 고려하여 부하시간에 전압의 변위를 두어 운영한다.

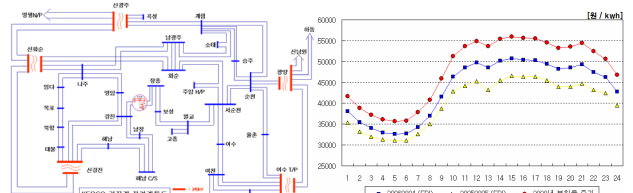
위와 같은 주요점을 바탕으로 전력계통을 운영하면 전력계통의 유효전력 손실을 최소화하고 UPFC는 항상 여유용량을 확보할 수 있어 계통변화에 능동적으로 대처할 수 있고, 기계식 스위칭 기기인 ULTC와 Sh.C & Sh.R의 스위칭 횟수를 감소하여 기기의 성능향상을 기대할 수 있다.

더하여 부하시간대별 운영방안에 근거하여 전압변위를 두면 경부하시간대에 페달타효과에 의한 전압상승에 대비하고 부하증가분에 대한 피크부하일 때 안정적으로 계통을 운영할 수 있다.

3. 사례 연구

3.1 KEPCO 강진계 전력계통

현재 국내에서는 한국전력공사 주도로 154kV 강진변전소에 UPFC를 설치하여 운영 중에 있다. 그림 2는 전라남도 지역 내에 존재하는 강진계 전력계통도를 나타내었고, 협조제어를 통해서 UPFC에 인접한 모선의 전압과 선로의 조류를 제어하게 된다.[2] 그림 3은 시뮬레이션에 앞



<그림 2> 강진계 전력계통도

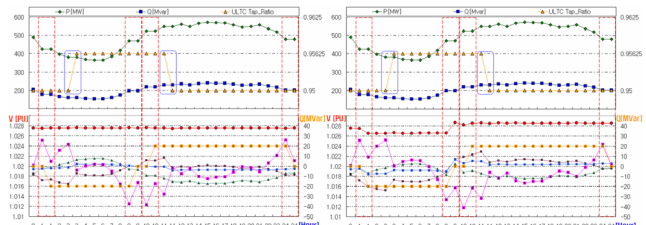
<그림 3> 연도별 일부하곡선

서 수요예측에 의한 일부하곡선을 도출한 후 『제3차 전력수급계획』

에 따른 연도별 부하증가율을 고려하여, 2008년도 부하수준으로 강진계 전력계통에 가중될 부하를 산출하여 PSS/E Data로 작성한 다음 지역계통 내의 부하가 일부하곡선에 따라 변화할 때 협조제어 운영방안을 적용한 결과를 검토하여 보았다.

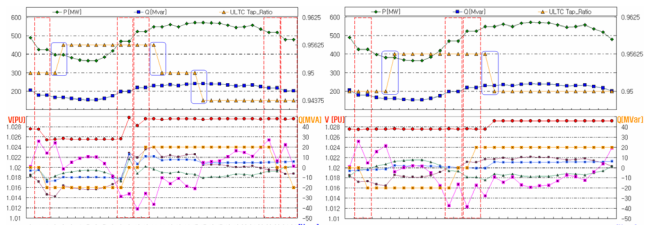
3.2 시뮬레이션 결과 및 운영방안의 해석

UPFC의 병렬인버터는 비상시 여유용량을 제외한 20[MVA]로 설정하고, Shunt elements는 UPFC가 제어용량을 벗어나게 될 때 보상이 가능하도록 각각 20[MVar] & -20[MVar]로 두어 무효전력을 공급 또는 흡수하며, 신강진변전소에 ULTC가 존재한다. 강진계 전력계통 내에서 협조제어 운영방안을 적용한 결과를 그림 4, 5, 6, 7, 8, 9에 나타내었다.



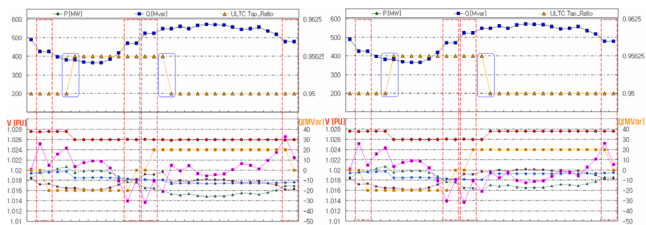
<그림 4> 신강진 154kV Vref. 고정 <그림 5> Vref. 변화(0.001[PU])
□ : Shunt elements 스위칭 □ : ULTC Tap Position 변화

그림 4는 Vref.를 일정값으로 고착시켰고, 그림 5, 6은 부하시간대만 고려하여 전압변위를 각각 0.001[PU]와 0.002[PU]로 설정하여 시뮬레이션 하였다. 여기서 Vref.를 설비의 용량이 허용하는 범위에서 전압의 변위



<그림 6> Vref. 변화(0.002[PU]) <그림 7> Tap 변화 시 Vref. 상승

를 두고 운전하는 것이 그림 5와 비교하여 UPFC가 더 많은 여유용량을 확보하게 됨을 알 수 있다. 그러나 그림 6처럼 Vref.의 변위를 초과하게 되면 각 설비의 스위칭 횟수가 늘어나 성능 및 효율 저하를 가져온다.



<그림 8> Tap 변화 시 Vref. 감소 <그림 9> Tap 변화 시 Vref. 상승 & 감소

그림 7, 8, 9는 Tap Ratio의 변화할 때 Vref.를 상승 또는 감소시켜 시뮬레이션 하였다. 여기서 그림 7은 Tap Ratio가 변화 후 초기상태로 돌아올 때 부하시간대를 고려하여 전압을 상승시켜 운전할 경우 스위칭 횟수를 최소화 할 수 있었다. 하지만 그림 8처럼 부하시간이 증부하 및 피크부하에도 Vref.를 감소시켜 운전하면 Shunt elements의 스위칭 횟수가 그림 7에 비해 증가하게 된다. 그림 9는 Tap Ratio가 변화할 때마다 Vref.가 변화하도록 구성되며, 그 결과 그림 7과 유사한 상황에서 스위칭 횟수는 감소되지 않는다. 그러므로 효과적인 협조제어 방안은 각 설비들 중 최종단계에서의 조상설비의 특성과 부하시간대별 운영방안을 접목하여 운영하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다. 더하여 각 장치별 기계식 스위칭 횟수를 나타내면 표 1과 같다. 표에서 알 수 있듯이

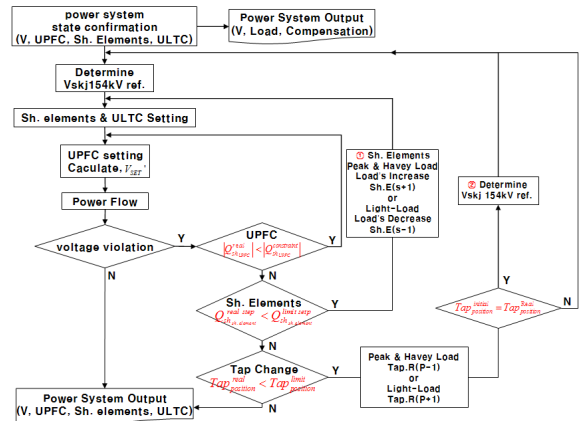
<표 1> 운영방안에 따른 각 장치별 스위칭 횟수

Equipments	Vref. 고정	Vref. 변화 0.001[PU]	Vref. 변화 (0.002[PU])	Tap 변화시 Vref. 상승	Tap 변화시 Vref. 감소	Tap 변화시 Vref. 상승 & 감소
Sh. Elements	4	4	5	3	4	4
Tap Ratio	2	2	3	2	2	2

빈번히 변화하는 전력계통에서 계통상황과 각 장치의 특성을 고려한 적절한 전력계통의 해석을 통한 협조제어 방안의 적용은 전압보상설비들을 충분히 활용하고 각 장치별 효율과 성능을 향상 시킬 수 있다.

3.3 Flow Chart

정상상태에서 전압보상설비들 간의 협조제어에 관한 Flow Chart를 그림 10으로 표현하였다. Flow Chart를 따라 먼저 전압보상설비들의 초



<그림 10> 정상상태에서 협조제어 운영방안

기 상태를 확인한 후 각 장치별 초기치 설정을 한다. 그 후 계통상황의 변화에 따라 Vref. 모션 전압이 오류가 발생할 경우 정상상태 협조제어 운영방안에 따라 각 전압보상설비들로 하여금 전압 및 무효전력을 제어하여 UPFC가 항상 여유용량을 확보하여 계통변화에 유연하게 대응한다. 여기서 VSET는 신강진모선의 전압을 제어하도록 식 (7)에

$$V_{SET} = \begin{cases} V_{KJ} - S_V (V_{SKJ} - V_{SKJ,ref}) & \square \square \square Q_{sh,UPFC} \leq Q_{LIMIT,UPFC} \\ V_{KJ} & \square \square \square Q_{sh,UPFC} > Q_{LIMIT,UPFC} \end{cases} \dots (7)$$

$$\text{where, } S_V = \frac{\Delta V_{KJ}}{\Delta V_{SKJ}} = 1.3$$

의해 결정된다.[3] Shunt elements와 ULTC의 제어특성은 부하 시간대와 각 장치별 한계용량을 근거로 이산시스템 형태로 구성하여 상호협조 운영한다.

4. 결 론

본 논문에서는 UPFC, Shunt elements, ULTC의 특성을 고려한 협조제어 방안으로 제안하였다. 협조제어 운전방안에 있어 각 장치별 주요 고려 사항으로 UPFC는 유효전력 손실의 최소화를 이끌어 내고, 항상 변화하는 부하에 대응할 수 있도록 여유용량을 확보하는 것이다. Shunt elements는 UPFC의 부족한 무효전력을 보상하며, ULTC는 Shunt elements의 투입 가능한 뱅크용량이 없을 때 Vref에 의한 모션전압에 오류발생시 ULTC의 Tap Ratio에 의해 전압을 보상받아 전력계통의 전압 및 무효전력을 제어한다. 또한 Shunt elements와 ULTC는 기계식 스위칭 방식으로 동작하므로 스위칭 횟수의 최소화를 이끌어 내야한다.

협조제어 방안을 부하증가율을 고려한 강진계 전력계통에 적용해 본 결과 전압보상설비들을 충분히 활용할 수 있고, UPFC의 여유용량 확보됨에 따라 다양한 외란에 노출된 전력계통시스템을 항시 능동적으로 대처할 수 있게 된다. 또한 전압보상설비들의 성능과 효율을 향상 시킬 수 있어 각 장치의 수명연장 및 보수비용의 감소에도 도움이 될 것이다. 더하여, 전압유지기준을 만족함에 따라 전압안정도 및 신뢰도를 향상을 기대할 수 있어 전력품질유지기준을 충족시킬 것이다.

감사의 글

본 연구는 경북대학교 BK21 정보기술연구 인력양성 사업단의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Sadikovic, Single-machine infinite bus system, internal report, July 2003
- [2] "강진변전소 80MVA UPFC 시스템 소개" 전기설비지, 2003년 03월호
- [3] Seon-Ju Ahn, "Automatic and Supervisory Control System for KEPCO UPFC" PS1-PR1-08 002-000045, ICEE 2006, July 2006