

실시간 과도 현상 해석을 위한 모델 계통 개발에 관한 연구

표기찬*, 문승일*, 김태균**, 차승태**, 최준호**
*서울대학교, **한전 전력연구원

A study on benchmark system development of power system for on-line transient analysis

Gichan Pyo*, Seungill Moon*, Taekyun Kim**, Seungtae Cha**, Junho Choi**
*Seoul National University, **Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 전력 계통이 거대화되고 그 복잡성이 증가함에 따라 계통의 안정적인 운용을 위하여, 다양한 안정도 해석에 대한 요구가 제기되고 있다. 이에 따라 실시간 시뮬레이터를 이용한 계통의 과도현상 해석에 대한 연구 역시 증가하고 있는데, 이는 대규모 비선형 계통을 대상으로 할 경우 H/W의 제약으로 인해 현실적으로 많은 제한을 받는다. 하지만 FACTS 등 새롭게 계통에 연계되는 전력 설비의 성능 검증 및 사례 연구를 위해서는 이러한 실시간 시뮬레이터를 이용한 실제 계통에 대한 다양한 과도현상 모의 및 해석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 UPFC, SVC 등 FACTS 기기가 포함된 한전의 실제 전력 계통을 대상으로 등가화 및 계통 축약 기법을 이용하여 해당 계통의 동적/정적 특성을 반영할 수 있는 등가계통을 PSS/E 상에서 개발하고, 등가 계통과 실 계통에 대한 다양한 모의를 통해 그 타당성을 검증하였다. 이렇게 개발된 등가 계통 모델은 각 FACTS 기기에 대해 독립된 모델 계통으로 실시간 시뮬레이터를 이용한 FACTS 기기의 성능 검증 및 평가에 활용될 수 있을 것이다.

1. 서 론

현대의 전력 계통은 전력 수요의 지속적인 증가에 따라 함께 성장하여 설비 용량의 규모가 급속히 증가하였으며, 이와 함께 다양한 기기와 제어시스템이 채택되어 점차 복잡하고 다양한 특성을 나타내게 되었다. 하지만 이러한 전력 계통의 대규모화는 자연적, 사회적 제약으로 인해 발전 설비, 송·변전 설비 및 배전 설비 등 각종 전력 설비들이 집중화로 이어져, 전력 계통의 발달에도 불구하고 발전 설비의 집중과 수요시간 송전 선로의 장거리 화 및 송전 선로의 용량 부족 등 각종 문제를 야기하게 되었다. 그리고 이러한 문제들은 곧 전력계통의 안정도 문제와 직결되어, 안정도 여유의 감소와 이로 인한 제어의 어려움을 가져와 예기치 못한 사고 발생 시 계통 전체에의 안정성에 심각한 위협을 초래하고 있다. 따라서 전력 설비를 보다 효율적으로 활용하기 위한 방법으로 여러 방면에 대한 연구가 활발히 진행되었고, 유연 송전 시스템(FACTS)에 대한 연구 역시 그 일환으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 그리고 이에 따라 그간의 연구를 바탕으로 강진변전소에는 80MVA 용량의 UPFC가 설치되어 사용 운전되고 있으며, 대구 계통에는 ±100MVA 용량의 SVC가 1999년에 설치되어 시범적으로 상용 운전이 되고 있다. 또한 제주 계통에는 HVDC가 설치되어 해당 계통과의 연계 운전이 되고 있어, 앞으로도 많은 FACTS 기기의 계통 연계 사용이 예상된다.

하지만 이와 같이 FACTS 기기가 전력계통에 설치될 경우 그 특성이 기존 계통과는 달라질 수밖에 없으므로 대규모적인 적용을 위해서는 정밀한 해석기술을 바탕으로 한 운용 및 제어기법이 필요하다. 따라서 그간의 연구를 통하여 여러 FACTS 기기의 모델링 및 해석 기술이 개발되어 왔는데, 이와 함께 향후 FACTS 기기의 대규모적인 계통 적용을 위해서는 FACTS 기기가 적용될 실 계통을 대상으로 해당 기기가 계통에 미치는 영향을 정확히 평가, 분석해야 할 필요가 있다. 하지만 이전의 연구는 대부분 기존의 벤치마크 모델 계통을 기초로 하고 있으며, 이에 따라 현재 실 계통에 적용을 적절히 반영한다고 볼 수 없다. 이에 각 FACTS 기기를 실제 계통에 적용하고 이를 대상으로 한 다양한 안정도 해석 등의 연구가 필요한데, 이를 실제 대규모 비선형 계통을 대상으로 하는 경우에는 복잡하게 연결된 전체 시스템에 대한 안정도 연구를 위해 세부적인 모델을 이용하는 것이 현실적으로 매우 어려울 뿐 아니라, 실시간 시뮬레이터를 이용한 과도현상 해석이 필요한 경우 H/W의 제약으로 인해 그 연구에 많은 제한을 받는다. 따라서 실 계통에 대한 과도안정도 연구를 위해 한전 실 계통을 이용하여 그 특성을 반영할 수 있는 모델 계통을 만들 필요가 있다.

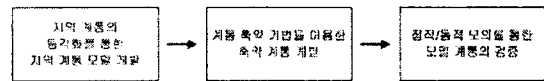
이에 본 연구에서는 강건에 설치되어 있는 UPFC를 대상으로 하여 실 계통을 적절히 반영할 수 있도록 광주-강진 계통을 재구성하여 정상 상태 및 과도 안정도 해석이 가능한 벤치마크 모델을 개발하고 이를 이용하여 계통에 대한 해당 FACTS 기기의 영향을 분석하고 그 성능을 검증할 수 있도록 하였으며, 이를 다른 SVC 및 HVDC에 적용하여 모델 계통을 개발하였다.

2. 본 론

2.1 모델 계통의 개발

일반적으로 FACTS 기기는 계통에 설치되어 전력 전자 소자를 이용하여 해당 위치에서의 조류 및 전압을 조정하는 것으로 계통을 제어하고 그에

따라 기존 전력 계통 설비의 이용률을 극대화하는 것을 목적으로 한다. 따라서 단일 FACTS기기의 계통에 대한 영향을 보면, FACTS 기기의 용량이 적용된 전력 전자 소자의 용량에 의해 제한되므로 그에 따른 직접적인 영향 범위가 넓지 않다는 것을 알 수 있다. 이에 FACTS 기기에 대한 검증 및 평가를 위해서는 일반적인 축약 기법을 이용하여 한전 실 계통 전체를 축약하여 계통 모델을 만들고 그에 적용하는 것보다, 실제 FACTS 기기가 설치되어 있는 계통을 대상으로 계통을 등가화 하여 구성하고 해당 지역의 계통 특성을 반영할 수 있는 계통 모델을 개발하는 것이 보다 효율적이다. 따라서 현재 UPFC가 설치되어 있는 광주 계통에 대해 다음과 같은 과정을 통해 계통을 등가화하고, 이를 축약하여 해당 FACTS 기기의 특성을 검증할 수 있는 모델 계통을 개발하였다.



<그림 1> 벤치마크 모델 개발 과정

2.1.1 광주 지역 모델 계통의 개발

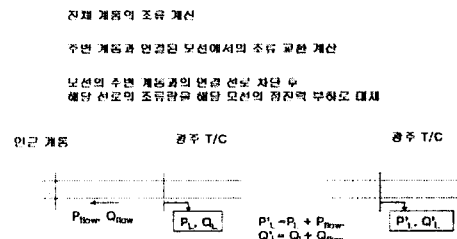
먼저 개발된 벤치마크 모델이 계통의 특성을 반영할 수 있도록 한전의 실 계통 데이터를 이용하여 조류계산 결과를 분석하고, 다음의 과정을 통해 광주 지역의 계통을 전체 계통에서 분리하여 지역계통 모델로 개발한다.

· Swing Bus 선정

광주 지역 인근에는 총 21기의 발전기가 운전되고 있으며, 총 8199MW의 전력을 생산하여 광주 지역에 공급하거나 수도권으로 전송하고 있다. 이중 광양 모선(28811)의 발전기를 Swing 모선으로 하여 계통 내에서의 발전기 데이터를 재구성한다.

· 외부계통과의 전력 교환을 정전력 부하로 대체

관리처에 따른 구분을 기준으로 광주 지역 계통은 총 18개 선로를 통하여 주변 지역 모선들과 연결되어 있으며, 이를 통해 광주 지역 계통은 다른 지역의 계통과 전력을 교환한다. 따라서 광주의 지역 계통을 전체 계통과 분리하기 위해서 해당 선로들을 차단하고 해당 조류 변화를 정전력 부하로 대체하는 것으로 모델 계통을 구성한다. 아래의 그림은 이러한 과정을 도식적으로 나타낸다.



<그림 2> 계통의 등가화

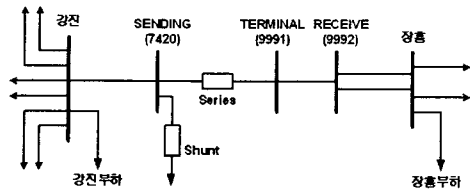
이에 따라 개발된 지역 계통의 정보를 요약하면 다음과 같으며 조류 계산 결과를 통해 실제 계통과 그 결과가 일치함을 확인할 수 있다.

<표 1> 등가 계통의 구성

swing 모선	모선수	선로수	유효전력 발전 [MW]	무효전력 발전 [Mvar]	부하
광양G1(28811)	139	233	8188.2	1916.4	8116.8

2.1.2 UPFC 모델의 적용

개발된 벤치마크 모델의 검증을 위해 UPFC PSS/E 모델을 해당 계통에 투입하고 그 효과를 모의할 수 있도록 하였다. 이에 따라 실제 강진에 설치되어 있는 UPFC를 기준으로 모델을 구성하여 이를 아래의 그림과 같이 계통에 추가하였다.

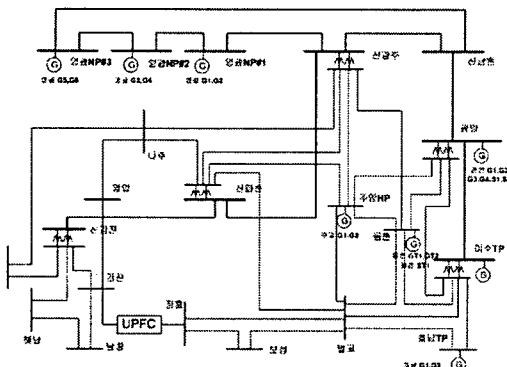


〈그림 3〉 UPFC의 계통 연계

2.1.3 계통 축약을 이용한 축약 계통 개발

위의 지역 계통 모델을 이용하여 UPFC를 적용하고 그 결과를 확인하는 것으로 UPFC의 병렬모선의 전압 지정 값의 변화에 따른 각 모선의 전압 변동 범위를 살펴보면 현재의 100개가 넘는 모선으로 이루어진 벤치마크 계통은 그다지 효율적이지 못하다. 이에 따라 여기에서는 UPFC를 중심으로 내부 계통을 구분하고 외부 계통에 대해 일반적인 계통 축약 이론에 근거해 모델 계통을 축약하는 것으로, 벤치마크 모델을 개발한다. 여기에서는 345kV 모선과 그에 대한 연결 모선을 유지하는 것으로 계통의 특성을 보다 최대한 유지할 수 있도록 하였다. 이를 위해서는 Ward-equivalent method가 사용되었으며, 이에 따라 외부 계통의 Y-행렬에 대해 가우스 소거법(Gaussian elimination)을 적용하는 것으로 축약을 수행하였다.

이상의 과정을 통해 UPFC의 검증에 위한 벤치마크 모델은 20기 64모선의 규모로 개발되었으며, 계통도는 다음과 같다.



〈그림 4〉 UPFC를 적용한 벤치마크 모델 계통

2.2 사례 연구를 통한 모델 검증

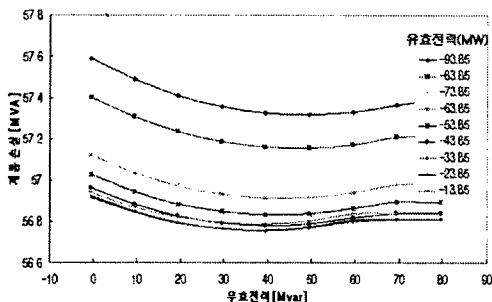
해당 모델 계통의 개발 목적은 FACTS기기를 실제 계통에 적용하고 그 특성을 검증할 수 있도록 하는 것으로, 이에 따라 벤치마크 모델 계통은 실제 계통의 특성을 반영할 수 있도록 실제 계통 데이터를 이용하여 개발 되었다. 따라서 여기에서는 다양한 정적 및 동적 모의를 통해 FACTS 기기가 개발된 모델 계통에서 적절히 모의될 수 있는지와 모델 계통에 실제 계통의 특성이 반영되었는지를 검토하는 것으로 개발된 벤치마크 모델을 검증할 수 있도록 한다.

2.2.1 정적 모의의 결과

정상 상태에서 UPFC의 주요 제어 기능은 간단하게 연계 선로의 유효전력 및 무효 전력 조류 제어와 병렬 모선의 전압제어로 요약할 수 있다. 따라서 여기에서는 이에 대한 모의를 통해 벤치마크 모델 계통과 적용된 UPFC 모델의 타당성을 검토하고, 이를 다양한 모의 및 해석에 사용할 수 있음을 보이도록 한다.

· UPFC에 의한 유·무효 전력조류의 제어에 따른 계통의 손실 변화

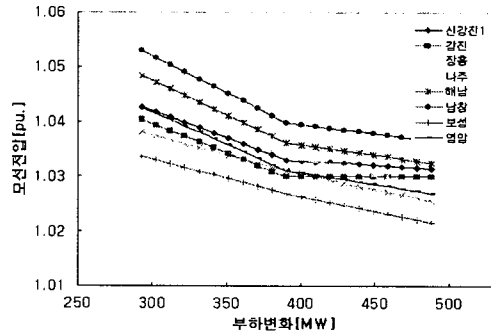
PSS/E를 이용하여 주어진 계통 상황에서 UPFC의 제어 범위 내에서 다양하게 유효·무효 전력을 변화시켜가며, 계통의 손실을 측정하였다. 이를 통해 손실 최소화를 위해 UPFC가 사용될 수 있으며, 이러한 UPFC의 기능을 벤치마크 모델이 효과적으로 표현할 수 있음을 알 수 있다.



〈그림 5〉 유효무효 전력 조류 제어 시 계통의 손실 변화

· UPFC의 전압 제어 효과
UPFC의 병렬 전압 제어 효과를 확인하기 위해 계통의 부하를 일정하게

증가시켜가며, UPFC의 제어모선이 되는 강진의 전압변화를 확인해 보았다. 이에 따라 아래의 그래프에서와 같이 부하의 변화에도 강진 모선의 전압이 일정한 것을 확인할 수 있으며, UPFC의 용량 한계에 따라 전압 저어를 벗어나는 부분을 확인할 수 있다.

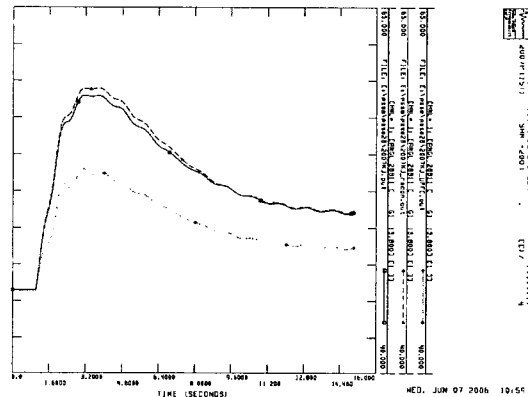


〈그림 6〉 전압 제어 시 부하변화에 따른 각 모선의 전압변화

이상의 모의를 통해 정상 상태에서의 UPFC 각 제어 효과와 그 범위를 확인할 수 있다.

2.2.2 동적 모의의 결과

여기에서는 해당 벤치마크 모델을 이용하여 간단히 계통에 사고를 모의하고 그에 따른 계통의 동적 응답 특성을 원계통과 비교하는 것으로 개발된 모델 계통이 원 계통의 특성을 적절히 반영하는 것을 확인하도록 한다. 이를 위해서 실제 한전 계통과 벤치마크 모델에 대해 동일한 선로(별교-보성)에 대해 2cycle동안의 fault사고를 모의했으며, 이에 따라 모델 계통의 swing 모선에 해당하는 광양G1의 위상각 변화를 살펴보면 다음과 같다. 그래프에서 위의 점선은 원 계통을 나타내며, 실선은 개발된 모델 계통을, 아래의 점선은 UPFC의 모델 계통 투입 후, 결과를 나타낸다.



〈그림 7〉 사고 계통의 swing 발전기의 위상각 변화

이와 함께 다양한 동적모의의 결과를 통해 개발된 모델 계통이 실제 계통의 특성을 적절히 반영하며, 이를 통해 개발 목적에 따라 벤치마크 모델의 타당성을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 FACTS기기가 실제 대규모 계통에 적용될 경우 계통의 과도 안정도 해석 및 FACTS 기기의 검증을 보다 효율적으로 수행할 수 있도록 실제 계통 특성을 반영한 벤치마크 모델을 개발하였다. 이에 따라 벤치마크 모델은 정상상태의 조류 계산 결과를 바탕으로 실제 계통 데이터를 이용하여 개발되었으며, 원 계통의 정적 특성 및 동적 특성을 최대한 반영할 수 있도록 하였다. 그리고 개발된 벤치마크 계통을 이용하여 다양한 정적 모의 및 동적 모의를 수행하고, UPFC의 특성 및 계통의 응답 특성을 확인하는 것으로 타당성을 검증하고, 이를 통해 해당 벤치마크 모델이 UPFC를 이용한 계통 해석연구에 사용될 수 있음을 보였다. 향후 해당 모델을 이용하여 실시간 시뮬레이터에 적용하여 다양한 모의가 가능하도록 연구를 진행할 예정이다.

〔참고 문헌〕

[1] J.P. Yang, G.H. Cheng, Z Xu,, "Dynamic Reduction of Large Power S system in PSS/E", Transmission and Distribution Conference and Exhibiti on: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES, 15-18 Aug. 2005, pp. 1 - 4
 [2] K.L. Lo, L.J. Peng,, J.F. Macqueen, A.O. Ekwue, N.H. Dandachi, "Ext ended Ward equivalent of external system for on-line security analysis", IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, December 1993, Hong Kong
 [3] 김형준, 장길수, 윤용범, 이진, "대규모 계통의 동적 축약에 관한 연구," 전기학회 논문지, 제 49권, pp.399-404, 8월 2000년