

실시간 과도 해석을 위한 한전 계통의 RTDS 모델 개발에 관한 연구

강혜원*, 표기찬*, 문승일*, 차승대**, 최준호**
*서울대학교, **한전 전력연구원

Model Development of an Power System Dynamic Equivalents for RTDS simulation

Hyewon Kang*, Gichan Pyo*, Seungil Moon*, Seungtae Cha**, Junho choi**
*Seoul National University, **Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 실시간 시뮬레이터(RTDS)를 이용한 비선형 전력 계통의 과도현상 해석은 H/W의 제약으로 인해 계통의 규모에 따라 그 적용범위가 제한되므로, 대규모 계통의 RTDS 모의를 위해서는 대상 계통의 축약된 등가 계통의 개발이 요구된다. 이에 본 연구에서는 한전 계통의 RTDS 적용 및 모의를 위해, 실 계통의 정적, 동적 특성을 반영할 수 있는 적정규모의 등가 계통 개발에 대한 연구를 진행하고, 등가화 및 계통 축약 기법을 이용해 240기 986모선 규모의 한전 계통에 대한 42기 143모선의 규모의 등가 모델 계통을 개발하였다. 등가 모델 계통은 경제성을 고려하여 실 계통의 동특성을 반영하는 최소 규모의 모델로 개발되었으며, PSS/E를 이용한 다양한 모의를 통해 실계통의 특성을 적절히 반영하는 것을 확인하고 타당성을 검증하였다. 또한 PSS/E로 구성된 모델 계통을 RSCAD를 이용해 변환하고, RTDS를 이용한 모의를 진행하는 것으로 그 특성을 확인하였다.

1. 서 론

실시간 시뮬레이터(RTDS)를 이용한 비선형 계통의 과도현상 해석은 기존의 시뮬레이터와 비교하여 계통 및 그 구성요소에 대해 다양하고 보다 정확한 정보를 제공한다. 따라서 RTDS를 이용하여 전력 계통에 대한 다양한 모의를 진행하는 것은 계통의 전압 안정도 등 실제 계통의 안정적인 운영에 필요한 주요 특성을 파악하는 데 효과적으로 활용될 수 있다. 하지만 점차 전력 계통이 거대화되고 그 복잡성이 증가함에 따라 실 계통을 RTDS에 직접 적용하여 모의하는 것은 H/W의 제약으로 인해 매우 제한적이며, 지속적인 추가 설비를 요구한다. 이에 본 연구에서는 한전 실 계통을 대상으로 계통의 주요 특성 반영과 함께 경제성을 고려하여 RTDS에서 활용 가능한 최소 규모의 등가 모델을 개발하고, 이를 통해 한전 계통의 실시간 모의가 가능하도록 한다.

2. 본 론

2.1 한전 계통의 축약 모델 개발

정확한 과도현상 해석을 위해서는 대상 계통을 직접 RTDS에 적용하여 모의를 진행할 수 있어야 하는데, 한전 실 계통과 같은 대규모 계통의 경우 이를 그대로 적용하는 것이 실질적으로 불가능하다. 따라서 대규모 계통의 실시간 과도현상 모의를 위해서는, 정적 및 동적 축약을 이용하여 대상 계통을 RTDS에서 적용 가능한 규모의 등가 계통으로 구성하고, 이를 모의하는 것이 일반적이다. 하지만 해당 경우에도 일반적인 축약 방법을 이용하는 것으로는 계통의 규모를 일정 수준 이하로는 축약할 수 없기 때문에 다양한 분야에서 이를 활용하는 것이 극히 제한된다. 실제 한전 계통의 경우도, 전체 계통을 RTDS에서 모의하기 위해 일반적인 축약을 이용하면, 한전 전력연구원이 보유하고 있는 RTDS (26rack : 세계 최대 규모)의 대부분을 이용해야 한다. 따라서 보다 넓은 분야에서 이를 활용하기 위해서는, 경제성을 고려하여 소규모의 RTDS에서 활용 가능한 등가계통을 개발하는 것이 필요하다. 이에 한전 실계통의 특성을 이용하여 계통을 등가화하고 축약을 진행하는 것으로, 30기 규모를 목표로 한전 계통의 특성을 최대한 유지한 최소 규모의 등가 모델 계통을 개발을 진행하였다.

2.1.1 한전 실계통의 특징

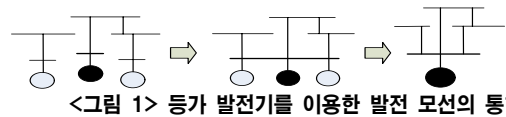
우리나라 전력시스템의 두드러진 특징을 간단히 하면, 수요와 발전설비가 일부 지역에 집중되어 있다는 것이다. 즉, 부하는 서울 및 경인 지구, 영남 지구에 집중되어 있고 발전 설비는 임해지대에 화력, 원자력 발전소가, 경인 지역에는 복합 화력 발전소가 집중되어 있으며 대부분의 대규모 발전 단지가 345kV 송전 계통에 직접 연계되어 있다. 이 때문에 한전 계통은 북상선로에 의한 대규모 장거리 송전이라는 특징을 가지며, 이는 모델 계통을 구성하는 데에 주요한 특징으로 반영되어야 한다.

2.1.2 등가화를 이용한 345/765kV 모델 계통 구성

앞서와 확인한 바와 같이 한전 계통의 경우, 실제 계통의 동특성에 주요한 영향을 주는 대규모 발전 단지는 대부분 345kV 송전 계통에 직접 연계되어 있으며, 154kV이하 계통이 전체 계통의 동특성에 주는 영향은 상대적으로 매우 작다. 따라서 등가 모델 계통 개발 과정에서 154kV이하의 계통을 345kV 이상의 송전 계통에서 분리하여, 정전력 부하로 대체하고 345/765kV 기본 계통을 구성하였다. 이때, 수도권을 비롯한 부하 집중 지역에 건설되어 지역 부하에 전력을 공급하고 남은 전력을 345kV 계통을 통해 다른 지역으로 송전하는 154kV 송전 계통에 연계된 대규모 열병합 및 가스 터빈 발전 단지의 경우는, 등가화를 통해 분리하지 않고 기본 계통에 추가 구성하는 것으로 전체 계통의 특성을 최대한 반영할 수 있도록 하였다. 그 결과 모델 계통의 발전모선 및 전체 모선의 수는 절반 이하가 되었지만 실제 발전량 및 부하량은 20%내외로 감소해서 실제 상체를 통한 계통의 축소가 동특성에 많은 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

2.1.3 동적 축약 기법을 이용한 발전 모선의 축약

등가화를 통해 계통 구성에 있어서, 대부분의 발전단지는 345kV 계통에 연계되어 있지만 대부분의 부하는 154kV 모선에 연계되어 있으므로 결과적으로 전체 모선에 비해 많은 발전 모선이 계통에 포함되게 된다. 이는 <표 1>에서 확인할 수 있는데, 실 계통에 대해 345/765kV 모델 계통은 모선 수는 1/4로 감소했으나 발전모선의 수는 절반밖에 줄지 않았다. 따라서 발전 모선의 통합 및 등가 발전기를 이용한 동적 축약을 통해 계통의 규모를 축소하고, 등가 모델 계통을 개발한다. 이때 동적 축약은 발전기들을 정의한 'coherency'에 따라 'coherent group'으로 나누는 후 그룹 내의 발전기 및 발전 모선을 통합하는 과정을 통해 이루어지며[1], 이러한 과정을 개념적으로 나타내면 아래의 <그림 1>과 같다.



'coherency'는 계통에 외란이 가해질 때 비슷한 패턴으로 스윙하는 발전기들의 경향을 나타내며 외란에 대해 일정시간 동안 두 개의 발전기 단자 전압의 위상각 차이가 정한 범위 내에서 일정할 때, 두 발전기는 'coherent'하다고 정의한다.

$$\delta_i(t) - \delta_j(t) = \delta_{ij}(t) = \delta_{ij}(0) = \delta_i(0) - \delta_j(0) \leq const \quad (1)$$

위 식을 토대로 'coherent group'이 정의되면 그룹 내의 발전기와 모선들을 등가적인 하나의 모선과 발전기로 통합, 대체하며 통합된 모선은 아래와 같은 전압 크기와 위상각, 발전량, 부하량을 갖게 된다.

$$V_i = \frac{\sum_{k=1}^n V_k}{n}, \theta_i = \frac{\sum_{k=1}^n \theta_k}{n} \quad (2)$$

$$P_G = \sum_{i=1}^n P_{Gi}, Q_G = \sum_{i=1}^n Q_{Gi}, P_L = \sum_{i=1}^n P_{Li}, Q_L = \sum_{i=1}^n Q_{Li}$$

또한 등가 발전기의 관성 H와 제동상수 D, 과도 리액턴스는 다음과 같은 값으로 유도된다.

$$H^* = \sum_{i=1}^n H_i, D^* = \sum_{i=1}^n D_i, X_d^* = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_{di}}} \quad (3)$$

이러한 동적 축약을 통해 345/765kV 계통을 축약하여 그 결과를 정리하면 아래의 <표 1>과 같으며, 이에 따라 최종적으로 42기 규모로 등가 모델을 구성할 수 있다. 이는 동적 축약을 이용한 최소 규모의 축약으로 실제 모델 계통의 동적 특성은 345/765kV 모델과 동일하다.

<표 1> 축약 결과

	모선 수	발전모선	발전기	부하	선로	변압기
원 계통	986	240	240	784	2049	412
345/765계통	222	121	121	174	345	142
축약 계통	143	42	42	100	266	63

2.2 모델 계통 검증

이상의 과정에서 개발된 모델 계통 타당성을 검증하기 위해서는 정적, 동적 모의를 통해 검증은 해 볼 필요가 있으며, 이를 위해 여기에서는 PSS/E 시뮬레이터를 이용하여 한전 실제계통과 모델 계통에 대한 정적, 동적 모의를 진행하고 그 결과를 비교하였다.

2.2.1 정적 모의를 통한 모델 계통 검증

먼저 등가 모델 계통과 실제계통의 조류 계산 결과를 비교하여 계통의 정적 구성이 올바르게 이루어졌는지를 확인하였다. 특히 조류 계산 결과 중 한전 계통의 가장 중요한 특성을 반영하는 북상선로의 조류를 비교하였으며, 그 결과는 아래 <그림 2>와 같다. 여기에서는 실제계통과 모델 계통이 북상 조류가 동일함을 확인할 수 있으며, 모델 계통이 정적 구성에서 타당성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

단위(MW)

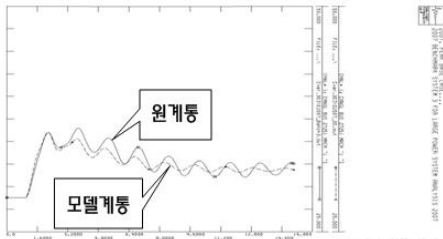
선로 구분	한전 실 계통	모델 계통
신서산 T/L	2294.8	2292.8
울정 T/L	3081.0	3077.2
어선 T/L	2118.0	2120.4
서정 T/L	1079.0	1079.8
신계천 T/L	1183.4	1185.2
신용연 T/L	495.6	496.4
계	10251.8	10251.8



<그림 2> 계통의 주요 북상선로와 조류량의 변화

2.2.2 동적 모의를 통한 모델 계통 검증

등가 모델 계통과 실 계통의 동특성을 비교, 검증하기 위해 사고를 상정하고 동적 모의를 진행하였다. 여기에서 상정 사고는 bus fault를 계획하였으며, 사고 지점은 사고의 영향으로 계통이 분리되지 않도록 계통의 중심에서 우회선로가 많은 지점으로 선택하였다. 이에 따라 선정된 상정 사고는 신계천(5700)에 2cycle의 bus fault로서, 사고 및 사고 후 15초간 시뮬레이션을 진행하여 기존 모선에서 발전기의 위상각과 전압, 유·무효 전력의 변화를 검토하였으며 그 결과는 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 여수 #1G 모선 발전기의 위상각 변화

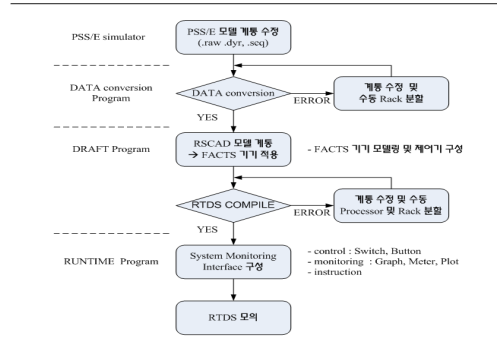
위의 그래프를 통해 실제계통과 모델계통에서 상정사고 고려 시 각 모선 발전기의 위상각 변화의 패턴이 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 스윙 쪽에서는 약간의 차이를 갖는데 이는 계통의 등가화로 인해 계통의 발전기 중 일부가 부하와 상쇄되어 계통 전체의 관성이 감소했기 때문이며 전체적인 패턴은 동일한 것을 확인할 수 있으며, 이에 따라 모델계통은 실제계통의 동특성을 적절하게 반영한다고 볼 수 있다.

2.3 RTDS 모델 계통 개발

이상에서 개발된 한전계통의 등가 모델 계통이 실제 계통 특성을 적절하게 반영함을 확인할 수 있으며, 모델 개발이 타당하게 이루어졌음을 알 수 있다. 따라서 해당 등가 모델 계통을 바탕으로 RSCAD/RTDS 모델을 개발하고, RTDS에서의 모의 진행하는 것으로 개발을 완료한다.

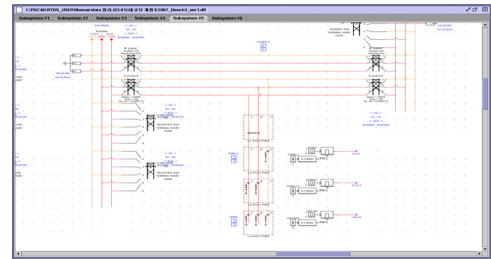
2.3.1 RSCAD를 이용한 모델 계통의 RTDS 모델링

RSCAD를 이용한 PSS/E 계통의 RTDS 모델링 과정을 요약하면 아래 <그림 4>와 같다.



<그림 4> RTDS 모델링 진행 과정

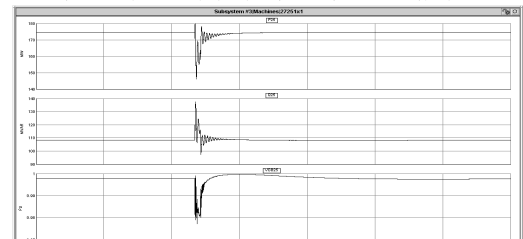
먼저 RTDS를 위해 개발한 42기 143모선의 PSS/E 모델 계통을 RSCAD에 포함된 DATA conversion program을 이용해 RSCAD draft format으로 변환한다. 이에 따라 RTDS에서 사용가능한 RSCAD의 dft 파일과 sib파일로 얻을 수 있으며, 모델 계통은 Rack 분할에 따라 6개의 subsystem으로 구성된다. 다음에는 RTDS 모의를 위해 DRAFT program을 이용해 draft file을 수정하고 계통의 주요모선에 다양한 동적 과도현상 모의를 위한 사고회로를 추가한 후 Runtime program을 이용해 system monitoring interface를 구성하였다. 각각 RSCAD의 사용자 프로그램을 이용하여 진행하였으며, 이에 따라 RTDS에서 모의 가능한 등가 모델 계통의 RTDS 모델을 구성할 수 있다.



<그림 5> 계통에 추가된 line 및 bus fault circuit

2.3.2 RTDS 모의 결과

이상에서 RTDS 모델을 구성하고 PSS/E 검증과 같은 신계천(5700)에 2cycle bus fault를 상정하여 모의를 진행하였으며, 결과는 아래 <그림 6>과 같다. 여기에서 사고 시 여수 #1G의 유·무효 전력 및 단자 전압을 확인할 수 있으며, 이는 일반적인 계통 특성과 동일하여, 이를 통해 RTDS를 통해 실질적인 모의가 가능함을 확인할 수 있다.



<그림 6> 여수 #1G(27251) 발전기 출력 변화 (P,Q,V)

3. 결 론

본 연구에서는 보다 넓은 연구범위에서 RTDS를 활용할 수 있도록 실제 계통의 동특성을 반영하는 것과 함께 경제성을 고려하여 RTDS에서 활용 가능한 최소 규모의 한전 계통의 등가 모델 계통을 개발하였다. 이에 따라 240기 986모선의 한전 계통에 대한 42기 143모선의 규모의 등가 모델 계통을 개발하였으며, PSS/E 상에서의 다양한 동적 및 정적 모의를 통해 개발된 모델 계통이 실 계통 특성을 절절히 반영하는 것을 확인하였다. 또한 모델 계통을 직접 RSCAD를 이용해 모델링하고 RTDS에서 실제로 모의해봄으로써 주요 모의가 가능함을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서 개발된 모델 계통이 RTDS를 이용한 다양한 계통 해석연구에 활용되어 계통의 안정화 기여할 수 있기를 기대한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 표기찬, "PWM 알고리즘을 이용한 전력계통 축약 기법에 관한 연구", 2006
- [2] J.P.Yang, G.H.Cheng, "Dynamic Reduction of Large Power System in PSS/E", Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES, 15-18 Aug. 2005, pp. 1 - 4