

국내 전력계통에 개선된 발전기 모델 적용에 관한 연구

Study on the Application of Advanced Generator Models in Korean Power Systems

김 수 배*
(Soobae Kim)

Abstract - This paper proposes the use of advanced generator models in the studies of Korean power systems to accurately represent the dynamic behaviors of synchronous generators and thus to achieve a better match between transient stability simulations and reality. In the paper, GENTPF and GENTPJ models are described which have appeared over the last decade in the WECC system. Those advanced models are compared with conventional synchronous generator models such as GENROU and GENSAL, which have been used in dynamic studies of Korean power systems. The advancements are investigated by recognizing the differences in block diagram, saturation modeling, and network interface equations. Simulation comparisons between conventional and advanced models in Korean power systems are then provided. Clear distinctions identified in the simulation results demonstrate the necessity of the use of advanced generator models in Korean power system.

Key Words : Advanced generator model, GENTPF, GENTPJ, GENROU, Transient stability, Simulation comparison, Korean power system

1. 서 론

전력계통의 안정적인 운영을 위해 시스템 운영자는 계통 내에서 발생할 수 있는 다양한 상황들을 모의하여 정적 혹은 동적 상태 변이를 예측한다. 시뮬레이션을 통해 예측된 결과는 전력계통 운영 및 제어와 계획수립을 위한 중요한 판단 자료로 활용되므로 해석결과의 신뢰도는 전력공급의 신뢰도와 직결된다. 따라서 계통운영자들은 계통 구성요소들의 정확한 모델링을 위한 표준과 절차를 가지고 주기적으로 모델의 정확도를 개선하고 있다 [1-2]. 하지만 전력계통은 무수히 많은 설비들로 이루어진 아주 복잡한 대형 시스템이며, 각 개별요소들의 다양한 전자기적·물리적 특성을 완벽하게 모델링하는 것은 어려운 현실이다. 특히 과도안정도 해석의 가장 중요한 요소라 할 수 있는 발전기는 매우 복잡한 전자기적 물성에 기초하므로 정확한 모델링은 쉽지 않다.

1996년 8월에 미국 서부계통에서 발생한 대규모 정전 이후로 WECC(Western Electricity Coordinating Council)는 대대적으로 전력설비 모델링 정확도 향상을 위해 노력하고 있다. 이는 그림 1에서 보인 것과 같이 당시 시뮬레이션 결과와 측정된 데이터 사이에 명확한 차이점을 확인하였기 때문이다[4]. 부정확한 모델을 사용한 시뮬레이션은 사고 발생 후 안정적인 상태를 예측하였으나, 실제적으로 계통은 증가되는 진동을 보이며 붕괴되었다. 이

와 같이 낙관적인 모델링에 기반한 시뮬레이션은 전력계통 운영에 치명적인 문제점을 발생시킬 수 있으므로 WECC는 주요 발전기와 제어기들의 모델 구조와 파라미터 값을 개선하여 정확도를 향상하였고 이후에도 지속적인 노력을 기울이고 있다.

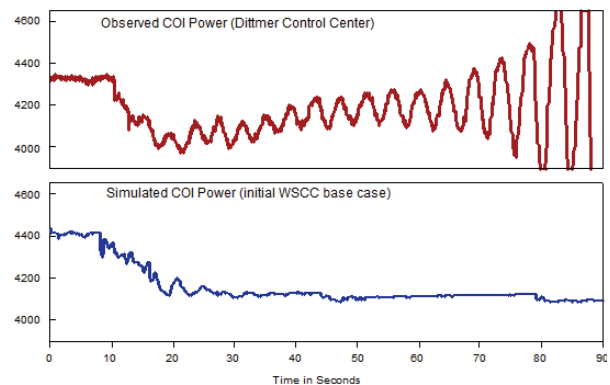


그림 1 미국 서부계통에서 측정된 데이터와 시뮬레이션 결과의 비교(1996. 8. 10)[3]

Fig. 1 Comparison of observed response with the simulated response during August 10, 1996[3]

2006년에 이르러 WECC는 새로운 발전기 모델인 GENTPF를 승인하고 기존 원통형 발전기(Round Rotor Generator, GENROU)와 돌극형 발전기(Salient Pole Generator, GENSAL) 모델을 대체하여 사용하고 있다. 특히 수력용 발전기 모델로 많이 사용되는 GENSAL은 2011년 이후로 더 이상 유효한 발전기 모델 리스트에

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Kyungpook National University, Korea.
E-mail: soobae.kim@knu.ac.kr

Received : October 4, 2016; Accepted : December 26, 2016

서 제거시켜 더 이상 사용하고 있지 않는 상황이다[5]. GENTPF 모델은 발전기의 포화특성을 모델구조 전반에 반영하여 발전기 출력 및 내부 상태변수들의 동적 응답 특성의 정확도를 개선하고 있다. 더욱이 2009년에 이르러 WECC는 발전기 부하의 크기에 따른 자속 포화 변화를 GENTPF 모델에 추가한 GENTFJ를 승인하였다. 나아가 WECC는 이미 폐지된 GENSAL과 더불어 GENROU 또한 유효 모델 리스트에서 제거시킬 움직임을 보이고 있다[6]. 따라서 시뮬레이션 정확도를 개선하기 위해서 발전기 모델링의 중요성을 강조하고 있고 성능 개선의 노력을 지속적으로 기울이고 있다.

현재 국내에서도 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준을 마련하여 발전설비 특성자료를 확보하고 주기적으로 개선함으로써 전력계통의 안정적 운영을 꾀하고 있다. 해당 기준을 통해 정격용량 20MVA 초과하는 모든 발전기와 다양한 제어기들의 동적 모델링과 파라미터 정보들을 수집하여 과도안정도 시뮬레이션에 이용하고 있다. 또한 2012년에 발전기 기술특성 시험 관리지침을 제정하여 발전기 특성자료 수집의 효율적 추진과 체계적 관리를 진행하여 과도안정도 해석결과의 정확성을 제고하는 노력을 지속하고 있다[2, 7]. 하지만, 국내 전력계통의 과도안정도 해석은 GENROU와 GENSAL 발전기 모델만을 여전히 주요한 발전기 모델 형태로 이용하고 있다. 북미에서 이미 10년 전부터 이용하고 있는 개선된 GENTPF와 GENTPJ 모델로의 전환은 아직까지 진행되고 있지 않다[8].

본 논문에서는 먼저 북미에서 활발히 사용되고 있는 개선된 발전기 모델에 대한 블록다이어그램, 포화함수의 표현과 네트워크 인터페이스 방정식의 모델링 방법들을 파악한다. 이를 통해 국내 계통에서 사용되고 있는 기존 발전기들과의 차이점을 기술한다. 또한 개선된 발전기 모델을 국내 전력계통에 적용시 과도안정도 해석 관점에서 기존의 발전기 모델과의 해석결과의 차이를 분석하고, 이를 기반으로 국내 전력계통에 개선된 발전기 모델 적용에 대한 방안을 제시한다.

2. 발전기 모델

발전기 모델은 사용되어진 간략화 정도에 따라 다수의 모델로 구분되어진다. 본 논문에서 소개하는 발전기 모델은 실제 계통 운영과 제어목적으로 가장 많이 사용되어지는 차과도(Subtransient) 모델로 6개의 미분방정식과 2개의 대수방정식으로 구성 된다[9]. 6개의 미분방정식 중 4개는 발전기 회전자에 존재하는 코일들로부터 유도되며, 나머지 2개는 동요방정식(Swing equation)에 해당된다. 본 논문에서 검토되는 GENROU, GENTPF, GENTPJ 모두 차과도 모델에 해당되며, 3개의 모델 모두 동요방정식은 동일하므로 아래 블록다이어그램에서 포함되어 있지 않다. 발전기 모델에 사용된 기호는 참고문헌 [9]에 정의된 것과 동일하게 사용한다.

2.1 GENROU

GENROU 모델은 원통형 회전자를 가진 발전기 모델이며, 국

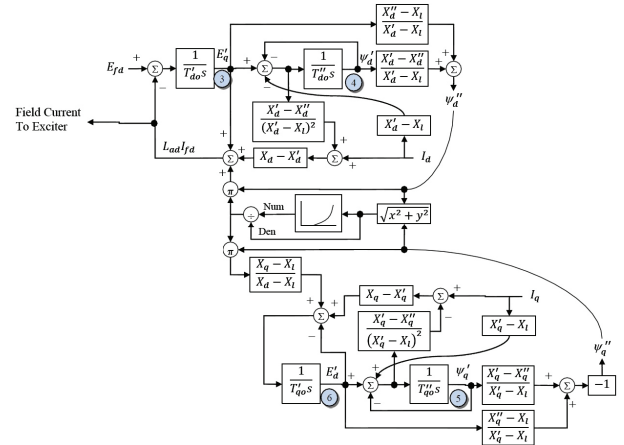


그림 3 GENROU 발전기 모델 블록 다이어그램 [10]
Fig. 3 Block diagram of GENROU generator model [10]

내 계통에서 가장 많이 사용되고 있는 발전기 모델 형태이다. 본 단락에서 소개하는 GENROU 모델과 관련한 방정식들의 세부적인 유도는 참고문헌 [9]에서 확인할 수 있다.

2.1.1 블록 다이어그램

그림 2는 GENROU 발전기의 블록 다이어그램이다. 블록 다이어그램은 먼저 윗부분에 d축과 관련된 2개의 미분방정식(E_q' , Ψ_d'')과 1개의 대수방정식(Ψ_q'')을 포함하고 있으며, 아래에 q축과 관련된 2개의 미분방정식(E_d' , Ψ_q')과 1개의 대수방정식(Ψ_d'')을 포함하고 있다. 또한 블록 다이어그램의 중간 부분에 표현된 자속 포화함수가 d축으로 E_q' , q축으로 E_d' 상태변수에 합산되어 고려된다. 일반적으로 자속 포화함수는 2차 함수 형태로 모델링되어 고려된다.

2.1.2 네트워크 인터페이스

GENROU 모델의 네트워크 인터페이스를 위한 동적 등가모델은 그림 3에 나타난다. GENROU 모델은 GENSAL 모델과 같이 d축과 q축에서의 차과도 인덕턴스가 동일($X_d'' = X_q''$)한 것으로 가정하여 네트워크 등가모델을 표현하고 있다. 그리고 상용 계통 해석 시뮬레이터에서는 발전기의 포화정도를 네트워크 인터페이스 등가회로에서는 고려하지 않고 있다.

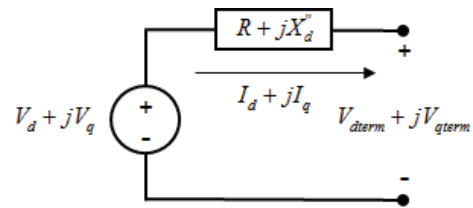


그림 2 GENROU 모델의 네트워크 인터페이스 등가회로
Fig. 2 Dynamic equivalent circuit of GENROU model

위의 등가회로에서 GENROU 발전기의 내부전압은 그림 1의 블록다이어그램에 표현된 내부 상태 변수들로 아래와 같이 정의된다.

$$V_d + jV_q = (-\psi_q'' + j\psi_d'')(1 + \omega) \quad (1)$$

2.2 GENTPF

GENTPF 모델은 WECC에서 원통형과 돌극형 발전기를 모두를 위해 사용되고 있다. 모델을 표현하는 방정식들은 참고문헌 [11]에서 확인할 수 있으며, 본 논문에서는 블록다이어그램과 네트워크 인터페이스 표현에 사용된 방정식은 [12-13]에서 정리된 내용을 수록하고 있다.

2.2.1 블록 다이어그램

그림 4에 보듯이 GENTPF 블록 다이어그램은 GENROU 모델과 동일하게 위와 아래 d축과 q축의 미분방정식들로 구성되어 있다. 하지만 GENROU 모델과 달리 GENTPF 모델은 d축과 q축으로 각각 서로 다른 포화함수(Sat_d, Sat_q)를 고려하여 d축과 q축의 포화정도의 차이를 표현할 수 있다. 따라서 GENSAL 모델을 대체하여 GENTPF를 사용할시 q축의 에어 갭이 크다는 이유로 무시되어왔던 q축의 포화정도를 고려할 수 있는 장점이 있다. 또한 포화함수의 영향이 GENROU에서는 d축으로 E_q' , q축으로 E_d' 으로만 단순히 합산되었지만, GENTPF 모델은 E_q' 과 E_d' 에도 직접적으로 영향을 주고 있다. 이러한 방법을 통해 포화정도가 발전기 내부의 모든 상태변수에 반영될 수 있다[6]. 식 (2)-(4)는 사용되어진 포화함수를 정의하고 있다.

$$Sat_d = 1 + Sat(\Psi_{ag}) \quad (2)$$

$$Sat_q = 1 + \frac{X_q}{X_d} Sat(\Psi_{ag}) \quad (3)$$

$$\Psi_{ag} = \sqrt{(V_{qterm} + I_a R_a + I_d X_l)^2 + (V_{dterm} + I_a R_a - I_q X_l)^2} \quad (4)$$

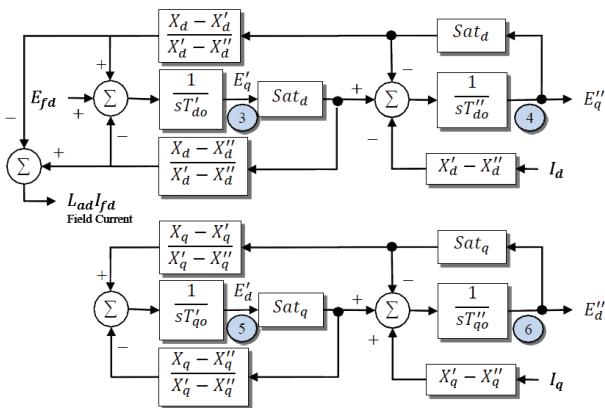


그림 4 GENTPF 발전기 모델 블록 다이어그램[10]

Fig. 4 Block diagram of GENTPF generator model[10]

2.2.2 네트워크 인터페이스

GENTPF 발전기 모델의 네트워크 인터페이스는 아래 식 (5)-(9)로 정의된다.

$$V_d + jV_q = (E_d'' + jE_q'')(1 + \omega) \quad (5)$$

$$X_{dsat}'' = \frac{X_d'' - X_l}{Sat_d} + X_l \quad (6)$$

$$X_{qsat}'' = \frac{X_q'' - X_l}{Sat_q} + X_l \quad (7)$$

$$V_{dterm} = V_d - R_a I_d + X_{qsat}'' I_q \quad (8)$$

$$V_{qterm} = V_q - X_{dsat}'' I_d - R_a I_q \quad (9)$$

GENTPF 모델은 차과도 인덕턴스 값의 차이(Subtransient saliency, $X_d'' \neq X_q''$)와 d축과 q축에서의 포화특성의 차이 ($Sat_d \neq Sat_q$)를 고려함에 따라 식 (6)의 X_{dsat}'' 과 식 (7)의 X_{qsat}'' 은 동일할 수 없다. 따라서 발전기 터미널 전압(V_{dterm}, V_{qterm}) 과 고정자 전류(I_d, I_q)의 관계를 임피던스로 표현할 수 가 없어 그림 3과 같은 간략한 등가회로로 표현될 수 없다. 만약 $X_{dsat}'' = X_{qsat}''$ 을 가정할 경우, 등가회로 방정식은 아래 식(10)과 같이 간략히 표현될 수 있으며 등가회로도 는 그림 3의 GENROU 와 동일하다.

$$V_{dterm} + jV_{qterm} = (E_d'' + jE_q'')(1 + \omega) - (I_d + jI_q)(R_a + jX_{qsat}'') \quad (10)$$

2.2.3 GENTPJ

GENTPJ 모델은 발전기에 할당된 부하의 영향에 따른 포화변화를 GENTPF 모델에 추가하고 있다. 식 (11)과 (12)에서 보듯이 부하의 정도는 고정자 전류의 함수로 표현되어 있다. 포화함수에 사용되어진 K_{is} 파라미터는 고정자 전류와 발전기 여자전압의 관계를 나타내는 V-곡선 특성시험을 통해 평가될 수 있다[6, 14]. K_{is} 파라미터 값이 0일 경우 식 (11)과 (12)는 식 (2)와 (3)과 일치하므로 GENTPJ는 GENTPF와 동일한 모델이 된다.

$$Sat_d = 1 + Sat(\Psi_{ag} + K_{is} \sqrt{I_d^2 + I_q^2}) \quad (11)$$

$$Sat_q = 1 + \frac{X_q}{X_d} Sat(\Psi_{ag} + K_{is} \sqrt{I_d^2 + I_q^2}) \quad (12)$$

2.3 GENROU와 GENTPF 모델의 차이점

개선된 GENTPF 모델은 GENROU 모델과 달리 자속의 포화정도를 발전기와 관련된 모든 상태변수와 네트워크 인터페이스에 함께 반영하고 있다. 기존의 GENROU와 GENSAL 모델들은 두 축간 차과도 인덕턴스 값이 동일하다고 가정한 것과 달리 개선된 모델에서는 인덕턴스 값의 차이를 고려하여 모델의 정확도를 개

선하고 있다. 표 1은 GENROU와 GENTPF 모델의 차이점을 정리하고 있으며, 표 2는 발전기 모델별 파라미터 값들을 기술하고 있다. 표 2에서 보듯이 GENROU와 GENSAL 모델의 d축과 q축의 차과도 인덕턴스 값은 동일하며, GENSAL 모델의 경우 q축과 관련한 X'_q, T'_{qo} 파라미터 값은 존재하지 않는다.

표 1 GENROU와 GENTPF 모델의 차이점

Table 1 Difference between GENROU and GENTPF generator models

항목	GENROU	GENTPF
차과도 인덕턴스 차이 (Subtransient Saliency)	$X''_d = X''_q$ 가정	$X''_d \neq X''_q$ 고려됨
d축과 q축 포화함수 구별	구별하지 않음	구별하여 사용
포화함수의 영향	E'_q, E'_d 에만 합산 네트워크 인터페이스 방정식 반영 되지 않음	E'_q, E''_q, E'_d, E''_d 에 모두 고려됨 네트워크 인터페이스 방정식 반영됨

표 2 GENROU, GENSAL, GENTPF 모델 파라미터

Table 2 Parameters for GENROU, GENSAL, and GENTPF

GENROU	GENSAL	GENTPF
X_d	X_d	X_d
X_q	X_q	X_q
X'_d	X'_d	X'_d
X'_q	-	X'_q
X''_d	X''_d	X''_d
$X''_q = X''_d$	$X''_q = X''_d$	X''_q
X_I	X_I	X_I
T'_{do}	T'_{do}	T'_{do}
T'_{qo}	-	T'_{qo}
T''_{do}	T''_{do}	T''_{do}
T''_{qo}	T''_{qo}	T''_{qo}
S_{10}	S_{10}	S_{10}
S_{12}	S_{12}	S_{12}

3. 국내 계통에서의 시뮬레이션 결과 비교

본 장에서는 국내 전력계통에서 사용되고 있는 GENROU와 GENSAL 발전기들을 GENTPF로 대체하였을 시 시뮬레이션 결과를 비교한다. GENTPJ 발전기로 변환을 위해서는 K_{is} 파라미터 정보가 필요하며, 관련 정보가 부재하여 국내 계통의 모든 발전기를 GENTPF로 변환하였다. 시뮬레이션 결과 비교를 위해 1502개의 버스, 266개의 발전기, 2751개의 송전선로와 1330개의 부하로 구성된 국내 계통을 사용하였다. 발전기들은 246개의 GENROU 모델, 19개의 GENSAL 모델, 그리고 GENSAL 모델에

서 포화함수를 지수함수로 표현한 GENSAE 모델 1개로 구성되어 있다. 국내 계통에서의 성능 비교는 먼저 미소신호 해석을 수행하여 시스템의 전체적인 동적 응답특성을 간접적으로 확인하였으며, 미소해석에서 고유치(eigenvalue)에 큰 차이점을 확인할 수 있는 특정 발전기에 대해 과도안정도 해석을 수행하여 동적 응답특성을 비교하였다. 시뮬레이션 수행은 상용 시뮬레이터인 PowerWorld를 활용하였다[10].

3.1 기존 발전기 모델의 변환

기존 GENROU와 GENSAL 발전기 모델을 GENTPF 변환하기 위해서는 기존 모델에 존재하지 않는 파라미터 값들의 할당이 필요하다. 해당 파라미터 값들을 유사 파라미터 값들로 할당하는 것이 합리적이며 참고문헌 [6]에 소개하는 방안으로 진행하였다. 먼저 GENROU와 GENSAL에 모두 존재하지 않는 파라미터 X''_q 은 d축과 q축의 차과도 인덕턴스 값이 동일하다고 가정하여 X''_d 으로 정하였다. 또한 GENSAL 모델은 표 2에서 보듯이 X'_q, T'_{qo} 파라미터 값을 포함하지 않고 있다. 따라서 GENSAL 모델의 GENTPF 변환과정에서는 간략하게 X'_q 을 X_q 으로, T'_{qo} 을 0으로 입력하였다.

3.2 비교대상 발전기의 선택

계통 내 246개 발전기 모두를 개별적으로 비교하기에 앞서 미소신호 해석으로부터 얻은 고유치의 차이를 확인하였다. 이는 미소신호 해석을 통해 확인되는 고유치들이 과도안정도 해석의 응답특성으로 나타나기 때문이다. 이를 위해 각 발전기별로 1기 무한모션 시스템을 구성하여 얻은 상태행렬로부터 고유치를 도출하였으며, 총 246개의 발전기로부터 4235개의 고유치를 계산하였다. 기존 계통과 GENTPF 발전기로 대체된 계통간의 미소신호 고유치의 비교를 위해서 식 (12)를 이용하여 전체 발전기별 고유치의 차이를 확인하였다.

$$ED_i = \sum_{n=1}^{N(Eigens)} \left| \lambda_{n(기존)}^i - \lambda_{n(변환)}^i \right| \quad (12)$$

where

- ED_i : Euclidean Distance of eigenvalues of Generator i
- $N(Eigens)$: Number of Eigenvalues
- $\lambda_{n(기존)}^i$: nth Eigenvalue of Generator i with GENROU or GENSAL model
- $\lambda_{n(변환)}^i$: nth Eigenvalue of Generator i with GENTPF model

기존 계통과 변환된 계통 시스템 내에 존재하는 246개 발전기의 고유치의 차이를 식 (12)에 따라 도출하였으며 그림 5에 전체 발전기에 대한 해당 결과를 나타내었다. 이중 고유치의 차이를 두드러지게 보이며, 발전기의 종류와 유·무효전력 발전량을 고려

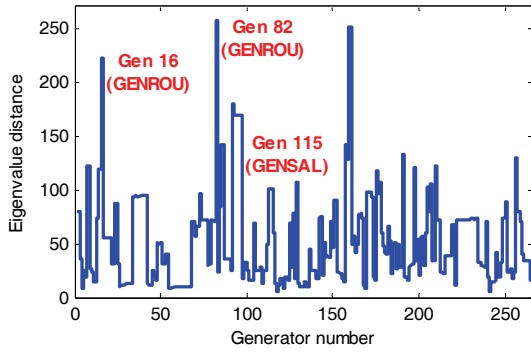


그림 5 발전기 모델별 고유치의 차이
 Fig. 5 Euclidean distance of eigenvalues of generators

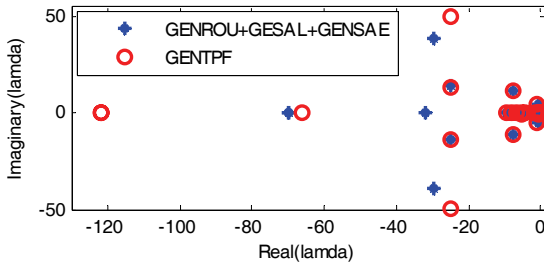


그림 6 16번 발전기의 고유치의 차이
 Fig. 6 Comparison of eigenvalues of Generator 16

하여 2기의 GENROU 발전기(16번, 82번)와 1기의 GENSAL 발전기(115번)를 과도안정도 해석의 비교대상으로 선정하였다. 그림 6은 16번 발전기로부터 도출된 25개의 고유치를 복소평면에 나타내어 비교하고 있다. 그림에서 보듯이 대부분의 고유치가 유사하나 특정부분에서 명백한 차이를 확인할 수 있으며, 이는 발전기 동적 응답특성의 차이를 발생시킨다.

3.3 과도안정도 해석결과 비교

계통 내 246개의 발전기들 중 미소신호 관점에서 차이를 보인 3기의 발전기(16번, 82번, 115번)를 대상으로 과도안정도 해석을 수행하였다. 해석결과의 비교 대상으로 선정된 발전기의 정보는 아래 표 3과 같다. 과도안정도 시뮬레이션을 위해 상정된 사고는 해당 발전기 터미널 버스에 지락사고를 1초에 발생 시킨 후 1.15초에 제거하였다. 시뮬레이션은 10초 동안 진행하였다.

표 3 과도안정도 해석결과 비교 대상 발전기

Table 3 Generators for simulation comparisons

발전기 번호	유효발전량 (MW)	무효발전량 (Mvar)	발전기 타입
16	842.65	197.31	GENROU
82	79.8	8.0	GENROU
115	237.5	-5.42	GENSAL

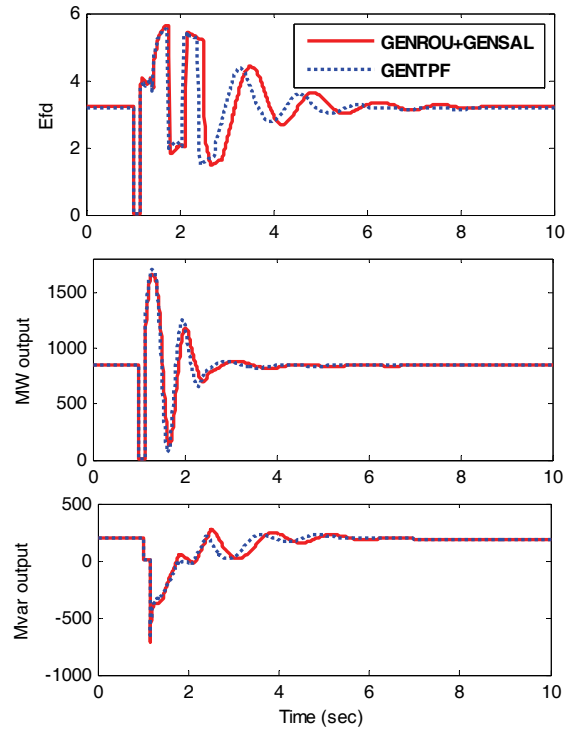


그림 7 16번 발전기의 과도안정도 해석 결과비교
 Fig. 7 Comparison of transient stability responses of Generator 16

표 4 발전기 출력의 최대 오차

Table 4 Maximum errors of Generator outputs

발전기 번호	유효출력 최대오차 (MW)	무효출력 최대오차 (Mvar)	오차비율(%)(최대오차 / 초기발전출력)	
			유효출력	무효출력
16	262.7	148.7	31.2	75.4
82	10.1	2.5	12.7	31.3
115	30.6	16.1	12.9	297

16번 발전기의 과도안정도 응답특성은 그림 7에서 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과 비교는 발전기 내부 상태변수인 E_{fd} , 발전기 유효 및 무효전력 출력 응답을 비교하였다. 그림 7에서 보듯이 두 발전기 모델 모두 유사한 모양의 진동과 댐핑을 보이고는 있지만 전반적인 응답특성의 차이점을 확인할 수 있다. 특히 발전기 출력 값에서 최대 262.7MW, 148.7Mvar의 큰 차이를 확인할 수 있었다. 표 4에서 나타난 것과 같이 발생된 출력 오차는 초기 발전기 출력 값에 대비해 31.2%, 75.4% 크기에 해당된다.

그림 8은 82번 발전기의 응답특성을 비교하고 있다. 결과 비교에서 보듯이 발전기 응답특성은 유사한 진동으로 구성되어 있으나 그 결과 값의 크기는 차이를 보이고 있다. 해당 발전기에 대한 두 모델간의 출력차이는 10.1MW, 2.5Mvar로 확인되었으며, 초기 출력 값에 대비하여 유효전력은 12.7%와 무효전력은 31.3%의 오차 크기를 보인다.

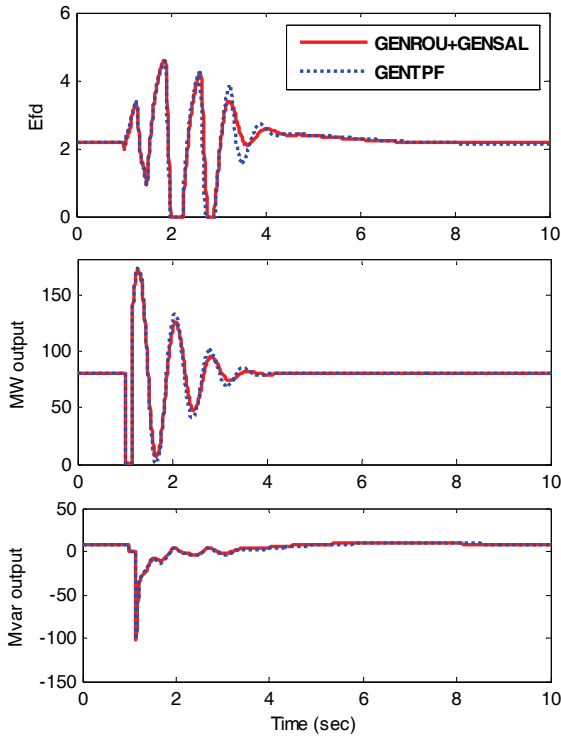


그림 8 82번 발전기의 과도안정도 해석 결과비교
 Fig. 8 Comparison of transient stability responses of Generator 82

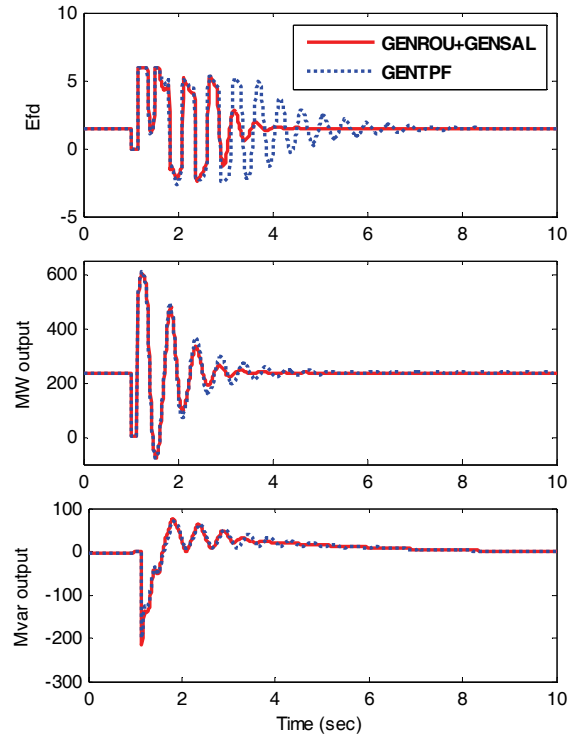


그림 9 115번 발전기의 과도안정도 해석 결과비교
 Fig. 9 Comparison of transient stability responses of Generator 115

115번 발전기의 과도안정도 응답특성은 그림 9에 나타난다. 두 모델 간 응답특성에서 명백한 차이를 확인할 수 있다. 특히나 기존 모델을 이용한 응답특성에서 보이지 않았던 큰 폭의 진동을 GENTPF 모델의 모든 내부 상태변수와 유·무효전력 출력에서 확인할 수 있다. 해당 진동은 8초 이상 지속되었으며 이러한 진동이 시스템 전체에 지속적으로 유지되면 동기탈조의 문제 및 계통 내 전력설비의 과부하를 발생시킬 수 있으므로 안정적 운영의 위협요소로 관리되어야 한다. 발전기 출력에서는 최대 30.8MW, 16.1Mvar의 차이를 확인하였으며, 이는 초기 발전 출력에 대비하여 유효전력은 12.9%, 무효전력은 297%의 크기이다.

그림 7, 8과 9에서 보인바와 같이 기존 GENROU와 GENSAL 발전기 모델을 이용한 과도안정도 해석의 결과는 개선된 발전기 모델인 GENTPF로 변경한 시뮬레이션 결과와 전반적인 응답의 특성과 크기에서 명백한 차이를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과를 비교한 발전기들에 대한 유효 및 무효출력의 최대 오차를 표 4에 나타내었다. 최대 262.7MW와 148.7Mvar의 차이를 확인할 수 있었으며 초기 발전출력을 기준으로 한 오차의 비율은 최소 12.7%서 최대 297%로 확인되었다. 특히 이러한 출력 값의 오차는 송전선로 혹은 계통 설비의 과부하를 발생시킬 수 있는 요소이며, 전력계통의 안정적 운영에서 중요하게 고려되어야 할 부분이다. 또한 두 모델 간 발전기 내부 상태변수(E_{fd})의 초기 값의 차이를 확인할 수 있었으며, 이는 발전기 모델을 표현하는 미분방식의 차이로 발생된 것이다.

4. 결 론

전력계통의 효율적인 계획과 안정적인 운영을 위해 시뮬레이션은 중요한 판단의 기준이 되며, 시뮬레이션 결과의 정확성은 무엇보다도 중요하다. 따라서 시뮬레이션에 사용되는 다양한 설비들에 대한 구체적이고 정확한 모델링은 신뢰도 높은 결과 도출을 위한 기본적인 조건이다. 본 논문에서는 최근 북미 전력계통에서 발전기 모델로 주로 사용되고 있는 GENTPF와 GENTPJ 모델을 소개하고 국내 계통에서 주요 발전기 모델로 이용되어지는 GENROU와 GENSAL 모델과 비교하고 개선된 점을 파악하였다. 또한 국내 전력계통에서 기존의 발전기들의 모델을 새로운 모델들로 변경하였을 시 과도안정도 해석 결과를 비교하였다. 시뮬레이션을 통해 두 모델들 간 최대 262.7MW와 148.7Mvar의 출력 차이를 확인할 수 있었으며, 이는 해당 발전기의 초기 출력 값에 비교하여 큰 값으로 확인되었다. 또한 새로운 모델에서는 기존 모델에서는 나타나지 않았던 8초 이상 지속되는 진동을 확인할 수 있었다. 이러한 차이점은 계통의 안정적 그리고 경제적 운영에서 중요하게 고려되어야 할 부분으로 판단된다. 그간 국내 전력계통의 안정적, 효율적인 운영을 위해 정확한 과도안정도 해석 결과의 중요성을 이미 인지하고 다양한 노력들이 지속되어 왔다. 본 논문에서 소개하는 GENTPF, GENTPJ 모델은 북미 계통에서 확대 적용을 계획하고 있고 본 논문에서도 해석 결과의 차이를 확인할 수 있으므로, 국내에서도 개선된 발전기 모델로의 변경에

대한 검토를 지금의 노력에 추가하여 진행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016학년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] WECC, "WECC Test Guidelines for Synchronous Unit Dynamic Testing and Model Validation", May 14, 2010. [Online]. Available: www.wecc.biz
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Reliability and power quality standards for electric power systems of Korea", 2012-296, 2012.
- [3] E. Allen, D. Kosterev and P. Pourbeik, "Validation of power system models," in IEEE PES General Meeting, 2010, pp. 1-7.
- [4] D. N. Kosterev, C. W. Taylor and W. A. Mittelstadt, "Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 3, pp. 967-979 1999.
- [5] WECC, "WECC Approved Dynamic Model Library Version June 2015", August 4, 2015.
- [6] WECC, "The Recommended Synchronous Generator Model: GENTPJ", June 14, 2016.
- [7] Korea Power Exchange, "Test Guidelines for Synchronous generator testing and model validation", July 2, 2012.
- [8] Korea Power Exchange, "Approved generator dynamic model lists in Korea" [Online]. Available: <http://www.kpx.or.kr/www/contents.do?key=244>
- [9] P. W. Sauer and M. A. Pai, Power System Dynamics and Stability. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1998.
- [10] Powerworld corporation. [Online]. Available: <http://www.powerworld.com/>
- [11] J. M. Undrill, "The GENTPJ model", WECC approved model specification for the GENTPJ model, June 19, 2012.
- [12] J. Weber, "Description of Machine Models GENROU, GENSAL, GENTPF and GENTPJ", December 3, 2015.
- [13] J. Weber, "Derivation of the GENTPF and GENTPJ models", November 18, 2015.
- [14] D. Kim, "Estimation of generator dynamic model parameters and its importance in Korea", Journal of the electric world, October 2015.

저 자 소 개



김 수 배 (Soobae Kim)

2002년 경북대학교 전자·전기공학부 졸업.
2004년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 졸업
(공학석사). 2014년 University of Illinois
at Urbana-Champaign 전기·컴퓨터공학부
졸업(공학박사). 2004년~2016년 한국전력공
사 전력연구원 선임연구원. 2016년~현재 경
북대학교 전기공학과 조교수.

Tel : 053-950-7218

E-mail : soobae.kim@knu.ac.kr