

적응 간격 크기 선택법을 이용한 급전운영자 훈련 프로그램 용 전력계통 시뮬레이터 개발

논 문
59-3-2

Application of an Adaptive Step-size Algorithm to the Power System Model of Dispatcher Training Simulator

황 평 익* · 안 선 주[†] · 문 승 일** · 윤 용 태*** · 허 성 일[§]
(Pyeong-Ik Hwang · Seon-Ju Ahn · Seung-Il Moon · Yong-Tae Yoon · Seong-Il Hur)

Abstract - Since it is almost impossible to train the dispatchers with real power system, the dispatcher training simulator(DTS) is used for the training. Among various components of the DTS, the power system model(PSM) emulates the dynamic behavior of the power system to calculate the frequency and voltage. The frequency is calculated from various parameters such as mechanical power of power plants, load, inertia, and the damping of the power system. In the PSM, the power plants are modeled as differential equations, so the mechanical power of the power plants are calculated by the numerical methods. Conventionally, the fixed step-size algorithm has been used in the PSM, however it has some drawbacks. This paper develops the prototype PSM using the Matlab, and analyzes the problems of the fixed step-size algorithm by comparing the results with those of PSCAD simulation. In order to overcome the limitations, this paper proposes a modified frequency calculation method using the adaptive step-size algorithm. From the simulation using the proposed method, it is verified that the accuracy of frequency calculation increases substantially while the simulation time is not greatly increased.

Key Words : Dispatcher training simulator, Power system model, Adaptive step-size algorithm, Power plant model

1. 서 론

전력계통의 규모와 복잡성이 증가함에 따라 전력계통을 운영하는 급전운영자의 훈련은 매우 중요한 사안으로 부각되고 있다. 급전운영자는 훈련을 통해 에너지관리시스템(EMS)에 대한 이해도 및 활용 능력 증진, 비상 상황에 대한 대처 능력 향상, 협동 운영 능력 향상 등과 같은 효과를 얻을 수 있다[1]. 급전운영자의 잘못된 조작은 광역정전과 같은 대규모 계통 사고를 유발할 수 있기 때문에 급전운영자는 실제 EMS가 아닌 급전운영자 훈련 프로그램(DTS)을 사용하여 훈련한다. DTS는 급전운영자에게 실제와 같은 훈련 환경을 제공하는 프로그램으로 크게 Control Center Model(CCM), Instructor Control(IC), Power System Model(PSM)로 나뉘어진다. CCM은 취득된 데이터가 실제 계통이 아닌 전력계통 시뮬레이터(PSM)에서 모의된 데이터라는 점을 제외하면 실제의 EMS와 동일한 화면 및 조작 기능을 제공하며 IC는 효과적인 훈련을 위해 훈련원과 교관에게 다양한 기능을 제공한다. PSM은 다양한 계통 훈련 상

황에서 훈련원과 교관의 조작에 따른 전력계통의 응답을 실제와 같이 모의하여 CCM의 취득 데이터로 제공한다[2].

DTS를 통한 급전운영자의 훈련 효과를 극대화하기 위해서는 PSM의 모의 결과가 실제 전력계통에서 발생하는 현상을 최대한 정확하게 나타낼 수 있어야 하지만 시뮬레이터가 갖는 특성상 오차가 존재할 수밖에 없다. 시뮬레이터에서 발생하는 오차는 그 발생 원인에 따라서 크게 세 가지로 나누어진다. 첫 번째는 물리적 시스템을 수학적 모델로 변환하는 모델링 과정에서 발생하는 오차이며, 두 번째는 모델의 파라미터를 추정하는 과정에서 발생하는 오차이다. 마지막은 모의를 진행하는 과정에서 발생하는 오차로 주로 수치해석 기법과 같은 모의 기법의 부적절한 사용으로 인해 발생한다. 이 세 가지 오차 중에서 어느 하나가 더 중요하다고 말할 수 없으며 정확한 모의를 진행하기 위해서는 세 가지 오차 모두를 줄일 수 있어야 한다. 이와 관련하여 모델링과 관련된 연구는 기존에 많이 수행되었지만[3-10], 파라미터의 추정과 수치해석 기법에 대한 연구는 아직까지 미비한 상태이다.

본 논문에서는 전력계통 시뮬레이터를 이용해 계통의 주파수를 계산하는 과정에서 발생하는 오차를 감소시킬 수 있는 기법을 제안한다. 2절에서는 일정 간격 크기(Fixed step-size) 선택법을 사용하는 기존 방식의 전력계통 시뮬레이터를 구현하고 모의 결과를 PSCAD를 이용한 모의 결과와 비교함으로써 일정 간격 크기 선택법의 문제점을 확인한다. 3절에서는 확인된 문제점을 해결하기 위해 적응 간격 크기(Adaptive step-size) 선택법을 사용하는 알고리즘을 제안하고 그 성능을 검토한다.

* 정 회 원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정
[†] 교신저자, 정회원 : 명지대학교 전기공학과 연구교수
E-mail : sjahn@mju.ac.kr
** 시니어회원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수
*** 정 회 원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수
[§] 정 회 원 : 한국전력거래소
접수일자 : 2009년 11월 9일
최종완료 : 2010년 1월 14일

2. 전력계통 시뮬레이터

전력계통 시뮬레이터의 주요 기능의 흐름도는 그림 1과 같으며[2], 본 절에서는 계통의 주파수 계산과 관련된 요소를 중심으로 살펴본다.

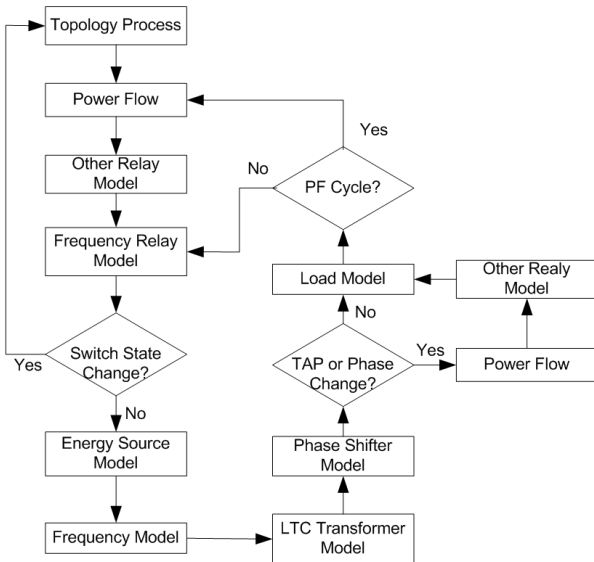


그림 1 전력계통 시뮬레이터 흐름도

Fig. 1 Flow chart of the PSM

2.1 부하 모델

전력계통에는 매우 다양한 부하가 존재하지만 모든 부하를 정확하게 모델링하는 것은 불가능하기 때문에 PSM에서는 일반적으로 전압과 주파수의 함수로 표현되는 부하모델을 사용한다[10-12]. 본 논문에서 사용한 부하모델은 다음과 같다.

$$P = P_0(p_1 V^2 + p_2 V + p_3)(1 + D_p \Delta f) \quad (1)$$

$$Q = Q_0(q_1 V^2 + q_2 V + q_3)(1 + D_q \Delta f) \quad (2)$$

여기서, 각 파라미터의 의미는 다음과 같다.

- P, Q : 실제 부하의 유효전력과 무효전력
- P_0, Q_0 : 정격에서의 부하의 유효전력과 무효전력
- p_1, q_1 : 정임피던스 부하의 비율
- p_2, q_2 : 정전류 부하의 비율
- p_3, q_3 : 정전력 부하의 비율
- D_p, D_q : 주파수 의존도, $D_p = dP/df$, $D_q = dQ/df$

2.2 에너지 소스 모델

에너지 소스 모델은 동기기의 입력인 기계적 출력을 계산하는 모델로 에너지원에 따라 화력, 수력, 원자력, 내연력, 복합사이클로 나누어진다[3],[10]. 구현한 전력계통 시뮬레이터에서는 참고문헌 [3]의 화력, 원자력, 수력, 내연력 모델을 사용하였다.

2.3 주파수 모델

주파수 모델은 독립계통의 총 부하량, 부하의 주파수 민감도, 에너지 소스 모델의 기계적 출력, 발전기의 관성을 입력으로 사용하여 개별 독립계통의 주파수를 계산한다. 주파수 모델은 식 3과 같다[10].

$$\Delta f(t+h) = e^{-\frac{Df_0}{2W_0}h} \Delta f(t) + \frac{P_a}{D} (1 - e^{-\frac{Df_0}{2W_0}h}) \quad (3)$$

여기서, 각 파라미터의 의미는 다음과 같다.

$$P_a = \sum_i P_m^i - \sum_j P_{load}^j - P_{loss}$$

$$D = \sum_j \frac{dP_{load}^j}{df}$$

$$W_0 = \sum_i (P_{rate}^i \times H_i) \quad (4)$$

P_m^i 는 에너지 소스 모델 i 의 기계적 출력, P_{load}^j 는 부하 j 의 정격에서의 유효전력 소비량, P_{loss} 는 송전 손실, P_{rate}^i 는 발전소 i 의 정격, H_i 는 발전소 i 의 관성 상수이다.

2.4 수치 해석 기법

PSM에서는 미분방정식으로 표현되는 에너지 소스 모델의 모의를 위해 수치 해석 기법을 사용한다. 수치해석 기법은 간격 크기의 설정 방법에 따라 일정 간격 크기(Fixed step-size) 샘플과 적응 간격 크기(Adaptive step-size) 샘플으로 나누어지며 기존의 전력계통 시뮬레이터에서는 일정 간격 크기 샘플이 사용되고 있다[10],[12],[13]. 대표적인 수치해석 기법으로는 1차 기법인 Euler method, 2차 기법인 Heun method, 그리고 4차 기법인 Runge-Kutta method 등이 있다. 일반적으로 고차의 기법을 사용하면 정확한 계산 결과를 얻을 수 있지만, 연산 시간 또한 증가한다[14-15].

2.5 일정 간격 크기 샘플의 문제점

본 논문에서는 그림 1과 같은 PSM의 기능을 Matlab을 이용하여 구현하였다. 수치해석 기법으로는 식 5, 6으로 나타내어지는 Heun method를 사용하였으며, 연산 간격 크기는 1초로 하였다.

Differential equation

$$\frac{dy}{dx} = f(x,y) \quad (5)$$

Solution :

$$y(x+h) = y(x) + \frac{h}{2} [f(x, y(x)) + f(x+h, y(x) + hf(x, y(x)))] \quad (6)$$

본 절에서는 일정 간격 크기 샘플의 문제점을 분석하기 위해, 구현된 PSM의 모의 결과와 PSCAD를 사용해 모의한 결과를 비교해 보았다.

2.5.1 검증 계통

검증을 위해 그림 2와 같은 IEEE 39모선 계통을 사용하였으며[16], 에너지 소스는 국내 발전설비 현황을 참고하여 표 1과 같이 구성하였다[17]. 또한, 계통에 설치된 주파수 계전기의 정보는 표 2와 같다.

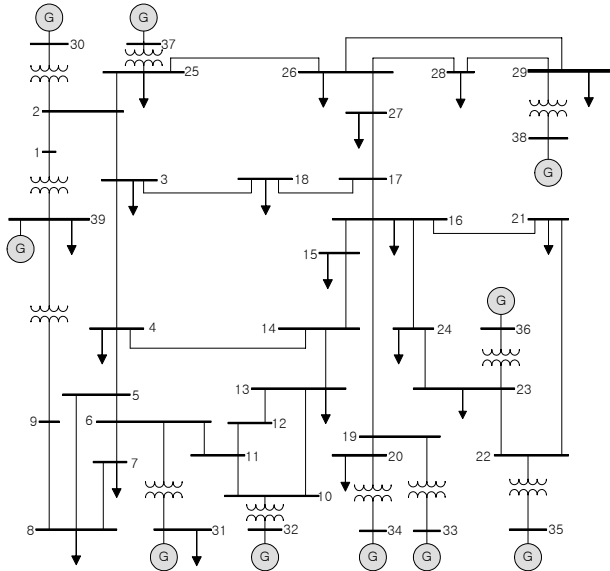


그림 2 IEEE 39모선 계통도
Fig. 2 IEEE 39 bus test system

표 1 에너지 소스 모델 타입 및 파라미터
Table 1 Type and parameter of energy source models

Bus Number	Type	정격 (MW)	H (sec)	초기 출력 (MW)
30	내연력	650	1	250
31	화력	800	3	573
32	화력	800	3	650
33	화력	800	3	632
34	화력	800	3	508
35	화력	800	3	650
36	내연력	650	1	560
37	수력	700	2	540
38	원자력	1000	4	830
39	원자력	1000	4	1000

표 2 주파수 계전기 파라미터
Table 2 Type and parameter of frequency relays

Relay Number	Relay Type	허용 주파수	차단기 기기
1	OFR	61.2 Hz	38번 모선의 발전기
2	UFR	58.8 Hz	13번 모선의 부하
3	UFR	58.8 Hz	23번 모선의 부하

2.5.2 검증 결과

다양한 계통 상황에 대한 모의를 통해, 계통에 큰 외란이

발생하지 않으면 PSM의 모의 결과가 PSCAD의 모의 결과와 거의 일치함을 확인하였다. 그러나 대규모 부하 탈락, 발전기 탈락 등과 같은 외란이 발생했을 때에는 주파수 계산에 오차가 비교적 크게 발생하였으며, 여기에서는 한 예로 110초에 20번 모선의 680MW 부하가 탈락되는 경우의 모의 결과를 그림 3에 나타내었다. 외란이 발생하기 전인 110초 이전과 계통이 안정화 된 후인 130초 이후에는 두 방법에 의한 모의 결과가 거의 일치하지만 과도상태에서는 PSM에 의해 계산된 주파수에 상당한 오차가 존재함을 알 수 있다. PSM의 모의 결과에서는 112초에 주파수가 61.2 Hz보다 커져서 OFR이 동작하여 38번 모선의 발전기가 탈락되었다. 이로 인해 주파수가 급격히 낮아지고, 115초에는 UFR의 동작 기준인 58.8 Hz보다 작아져 13번 모선과 23번 모선의 부하가 탈락되었다. 반면, PSCAD의 모의 결과에서는 과도 상태에서 주파수가 릴레이의 동작 범위인 58.8 Hz와 61.2 Hz 이내로 유지되기 때문에 발전기나 부하의 탈락 없이 계통이 안정화 되었다. 위의 결과로부터 간격 크기가 1초인 일정 간격 크기 샘플을 사용하는 PSM에서는 계통의 외란 시 주파수 계산에 큰 오차가 발생할 수 있음을 확인하였다. 이는 초기의 작은 오차가 누적되어 계전기 등 다른 기기의 동작에 영향을 미쳐 계통 전체의 응답이 실제 상황과 다르게 모의되기 때문이다.

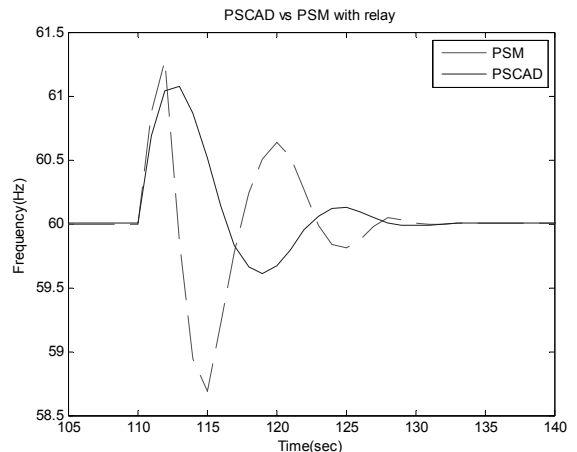


그림 3 부하 탈락 모의 결과
Fig. 3 Simulation result when sudden load decrease occurs

3. 적응 간격 크기 샘플을 이용한 모의 기법

PSM에서 일정 간격 크기 샘플을 사용하는 경우 간격의 크기를 작게 설정함으로써 모의 오차를 줄일 수는 있지만 그에 비례하여 연산의 시간이 증가할 뿐 아니라 다양한 계통과 다양한 사고에 대해 일정한 정확도를 보장할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 위와 같은 일정 간격 크기 샘플의 단점을 극복하기 위해 적응 간격 크기 샘플을 적용하는 방법을 제안한다.

3.1 적응 간격 크기 샘플

적응 간격 크기 샘플은 매 간격마다 모의 오차를 추정하여 간격의 크기를 조정한다. 만약 추정된 오차가 허용 오차보다 크면 간격의 크기를 작게 하여 다시 그 간격에 대한

모의를 진행하고 추정한 오차가 허용 오차보다 작으면 다음 간격에 대한 모의를 진행한다. 일반적인 적용 간격 크기 선택 방법은 다음과 같다.

$x+h$ 에서의 정확한 값을 $y(x+h)$, 간격의 크기로 h 로 하여 모의한 결과를 y_1 , $h/2$ 를 사용한 결과를 y_2 라고 할 때, 2차 수치해석 기법에서 $y(x+h)$ 와 y_1, y_2 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다[15].

$$y(x+h) = y_1 + A(x)h^3 + O(h^4) \quad (7)$$

$$y(x+h) = y_2 + A(x)\left(\frac{h}{2}\right)^3 + O\left(\left(\frac{h}{2}\right)^4\right) \quad (8)$$

여기서 $O(h^4)$ 와 $O\left(\left(\frac{h}{2}\right)^4\right)$ 는 고차항의 오차를 의미하며 그 값을 무시하면 앞의 두 수식으로부터 $A(x)$ 의 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A(x) \approx \frac{y_2 - y_1}{\frac{7}{8}h^3} \quad (9)$$

따라서 간격의 크기를 h 로 했을 때 한 간격에서 발생하는 오차(local truncation error, LT)는 다음과 같이 근사하여 나타낼 수 있다.

$$LT = |y(x+h) - y_1| \approx \frac{8}{7}|y_2 - y_1| \quad (10)$$

추정 오차(LT)를 기준으로 모의 간격의 크기를 조정하는 방법은 다음과 같다. 우선, 1초 모의에서 허용하는 오차의 한계를 ϵ 라 하면 매 간격에서의 추정 오차는 다음과 같은 관계식을 만족해야한다.

$$\epsilon' \leq \frac{LT}{h} \leq \epsilon \quad (11)$$

여기에서 ϵ' 는 최소 허용 오차로 추정 오차가 ϵ' 보다 작으면 모의에 사용된 간격의 크기 h 가 지나치게 작다는 것을 의미한다. 따라서 간격의 크기 h 를 크게 설정해도 충분히 정확한 해를 얻을 수 있다. 식 7과 8에서 간격의 크기가 2배 증가하면 오차는 약 8배 커짐을 알 수 있다. 따라서 LT/h 가 $\epsilon/8$ 보다 작은 경우에는 간격의 크기를 2배로 하여도 LT/h 가 ϵ 보다 작을 것이므로, 최소 허용 오차 ϵ' 는 $\epsilon/8$ 로 설정한다. 적용 간격 크기 선택법의 모의 방식은 다음과 같다.

1. $\epsilon' \leq L \frac{T}{h} \leq \epsilon$.

해당 간격의 모의 결과로 y_2 를 사용하고 다음 간격의 모의에서도 기존과 같은 간격의 크기를 사용하여 모의를 진행한다.

2. $\frac{LT}{h} < \epsilon'$

해당 간격의 모의 결과로 y_2 를 사용하고 다음 간격의 모의에서는 간격의 크기를 2배로 증가시켜 모의를 진행한다.

3. $\frac{LT}{h} > \epsilon$

간격의 크기를 1/2로 줄이고 해당 간격에 대한 모의를 다시 진행한다.

3.2 PSM 주파수 계산에의 적용

PSM의 주파수 계산에 적용 간격 크기 선택법을 적용하기 위해서는 주파수의 허용 오차로부터 에너지 소스 모델의 기계적 출력에 대한 허용 오차를 계산해야 한다. 이는 PSM의 최종 계산의 결과는 주파수로 나타나지만 실제 내부 연산에서 미분방정식으로 표현되는 부분은 에너지 소스 모델이기 때문이다. 다시 말해서 주파수 허용 오차(ϵ_f)로부터 에너지 소스 모델의 기계적 출력에 대한 허용 오차(ϵ_P)를 환산하고, 각 모의 간격에서는 기계적 출력의 추정 오차를 기준으로 모의 간격의 크기를 조정한다.

ϵ_f 로부터 ϵ_P 를 계산해 내는 방법은 다음과 같다. 먼저, 기계적 출력의 오차가 없을 때 주파수 모의 결과를 $f(t+h)$, 기계적 출력에 오차 ϵ_P 가 존재할 때 주파수 모의 결과를 $f(t+h)'$ 라 하면 각각의 주파수 모의 결과는 식 3으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f(t+h) = e^{-\frac{Df_0}{2W_0}h} \Delta f(t) + \frac{P_a}{D}(1 - e^{-\frac{Df_0}{2W_0}h}) + f_0 \quad (12)$$

$$f(t+h)' = e^{-\frac{Df_0}{2W_0}h} \Delta f(t) + \frac{P_a + \epsilon_P}{D}(1 - e^{-\frac{Df_0}{2W_0}h}) + f_0 \quad (13)$$

위의 두 식으로부터 기계적 출력의 오차로 인해 발생하는 주파수의 모의 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_f = f(t+h)' - f(t+h) = \frac{\epsilon_P}{D}(1 - e^{-\frac{Df_0}{2W_0}h}) \quad (14)$$

따라서 적용 간격 크기 선택법에서 사용되는 기계적 출력 허용 오차(ϵ_P)와 주파수 허용 오차(ϵ_f)의 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon_P = \frac{\epsilon_f D}{(1 - e^{-\frac{Df_0}{2W_0}h})} \quad (15)$$

적용 간격 크기 선택법의 경우 매 간격마다 h 가 달라질 수 있기 때문에, ϵ_P 역시 매 간격마다 새롭게 계산해야 한다. 주파수는 훈련원에게 제공되는 가장 중요한 정보 중 하나일 뿐 아니라 DTS의 다른 기능에서도 사용되기 때문에 매초 계산되어야 한다. 따라서 적용 간격 크기 선택법을 사용하더라도 간격의 크기는 1초 보다 크게 설정될 수 없다.

이상과 같은 적용 간격 크기 선택법을 적용하면 그림 1의 PSM 기능 흐름도에서 Energy source model과 Frequency model은 그림 4와 같이 상세하게 나타낼 수 있다.

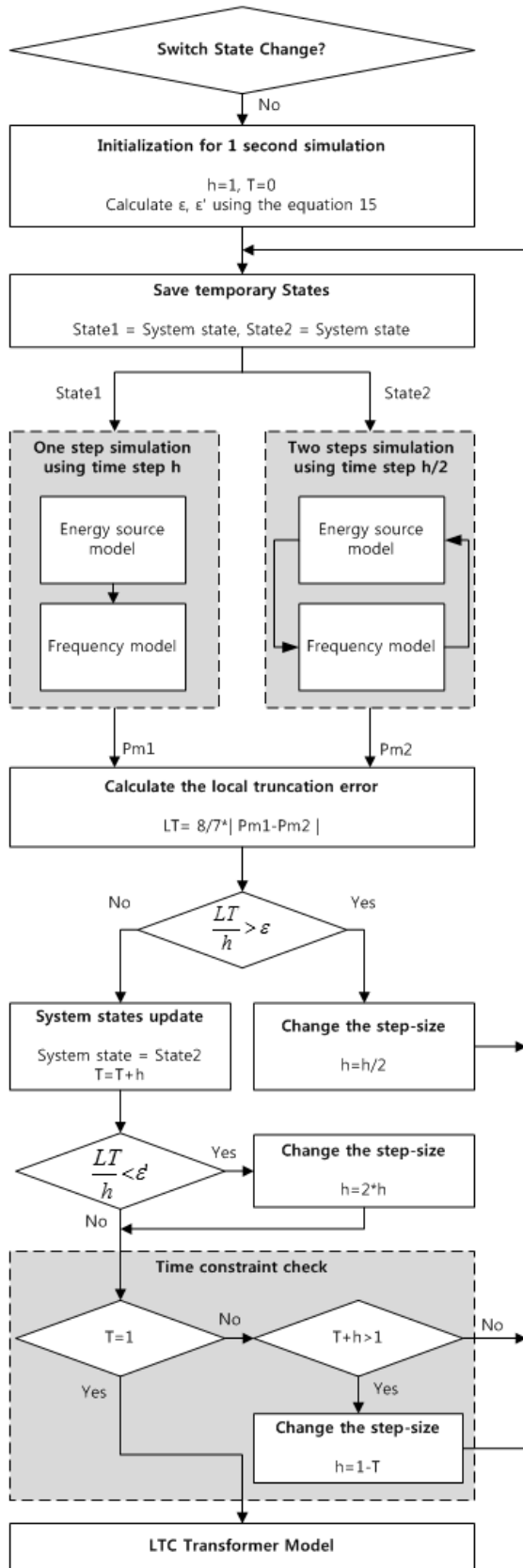


그림 4 Energy source model 및 Frequency model 흐름도
 Fig. 4 Flow chart of the energy source model and the frequency model

3.3 모의 결과

적용 간격 크기 샘플의 효과를 검증하기 위하여 2절에서와 같은 부하 탈락에 대한 모의를 수행하였다. 그림 5는 주파수 허용 오차(ϵ_f)가 0.1Hz/sec인 경우의 모의 결과이다. 적용 간격 크기 샘플을 사용함으로써 기존의 방법에서 문제가 되었던 주파수 오차에 따른 계전기의 오동작 없이 주파수를 정확하게 모의할 수 있음을 알 수 있다.

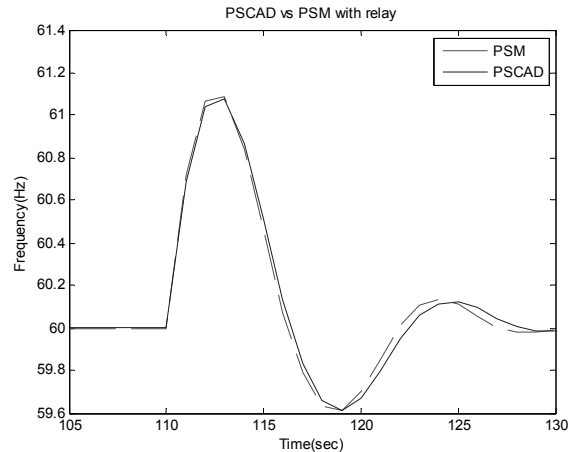


그림 5 $\epsilon_f=0.1\text{Hz/sec}$ 인 경우의 모의 결과
 Fig. 5 Simulation result for the case of $\epsilon_f=0.1\text{Hz/sec}$

표 3 ϵ_f 에 따른 모의 시간 및 최대 오차

Table 3 Summary of results with various ϵ_f

주파수 허용 오차 (Hz/sec)	모의 결과	
	최대 오차 (Hz)	모의 시간 (sec)
고정 간격 크기	1.9194	0.5
0.5	0.14432	0.67
0.3	0.11817	0.7
0.1	0.0663	0.91
0.08	0.0652	0.93
0.06	0.0586	1.12
0.04	0.0471	1.29
0.02	0.0315	2.09
0.01	0.0243	2.90

다양한 주파수 허용 오차(ϵ_f)를 적용했을 때의 모의 시간 및 최대 오차는 표 3과 같다. 여기에서 모의 시간은 과도 상태인 110초에서 130초까지 모의에 소비된 시간만을 의미한다. $\epsilon_f=0.5\text{Hz/sec}$ 일 때는 고정 간격 크기 방법에 비해 연산시간은 1.34배 증가하지만 오차는 7.5% 수준으로 크게 감소함을 알 수 있다. ϵ_f 를 작게 설정할수록 오차가 감소해서 $\epsilon_f=0.01\text{Hz/sec}$ 일 때는 오차가 기존 방법의 약 1.2% 수준으로 감소한다. 하지만 이에 따라 연산 시간도 5.8배 증가함을 알 수 있다.

그림 4에서 알 수 있듯이 적응 간격 크기 샘플을 사용하는 경우 일정 간격 크기 샘플을 사용하는 것에 비해 에너지 소스 모델과 주파수 계산 모델에 대한 계산 양이 최소 3배 이상 증가한다. 하지만 모의 결과 주파수 허용오차가 0.04 Hz/sec 이상인 경우에는 전체 PSM의 모의에 소비되는 시간은 3배 이상 증가하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 PSM의 연산 시간 중에서 에너지 소스 모델과 주파수 모델의 모의가 차지하는 비중이 크지 않기 때문이다. 실제 상업용 프로그램에서 두 모델의 모의에 소비되는 시간은 전체의 약 12% 정도이다[13]. 즉, 적응 간격 크기 샘플을 사용함으로써 두 모델의 모의에 소비되는 시간이 3배 이상으로 증가하더라도 조류 계산, topology process, 계전기 모델 등과 같은 PSM의 다른 기능의 연산에 소비되는 시간은 기존과 같기 때문에 전체 모의 시간은 크게 증가하지 않는 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 DTS의 핵심 요소인 PSM에서 주파수 계산 시 적응 간격 크기 샘플을 적용하는 방법을 제안하였다. 먼저 일반적인 전력계통 시뮬레이터를 Matlab을 이용하여 구현하였으며 PSCAD의 결과와 비교함으로써 고정 간격 크기 샘플을 사용하는 경우 큰 주파수 오차로 주파수 계전기의 오작동 가능성이 있음을 확인하였다. 다음으로 일반적인 수치해석 기법에서 적응 간격 크기 샘플을 적용하는 방법을 살펴보고, 이를 PSM에 적용하기 위하여 주파수의 허용 오차를 에너지 소스 모델의 기계적 출력에 대한 오차로 변환하는 방법을 제안하였다. 제안된 기법을 적용한 모의를 통해 고정 간격 크기 샘플을 사용하는 경우보다 정확한 주파수 모의가 가능함을 확인하였다. 또한, 다양한 주파수 허용 오차에 따른 모의의 정확도 및 연산시간의 관계를 분석해 보았다. 제안된 기법을 PSM에 적용하면 다양한 계통과 다양한 외란에 대해서 보다 정확한 주파수 모의가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부에서 시행한 전력산업 연구개발사업(과제번호: R-2005-1-398-004)으로 수행되었습니다. 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Operator Training Simulator Introduction, Available: http://my.epri.com/portal/server.pt?Attachment_id=292151_OTSO_Overview.pdf
- [2] 안선주, 황평익, 임재성, 문승일, 윤용태, "DTS용 전력계통 시뮬레이터 구성요소 모델링", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 2008.
- [3] Kola V., Bose A., Anderson P.M., "Power plant models for operator training simulators", IEEE Trans. on Power System, vol. 4, No. 2, pp. 559-565, May 1989.
- [4] Yao-nan Yu, Sawada J.H., Wvong M.D., "A dynamic power system model for teaching and research", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 95, No. 4, pp. 1507-1514, July 1976.
- [5] Fuquan Wang, Janka G., Schellstede G., "Dynamic power system simulation for real time dispatcher training", Power System Monitoring and Control Third International Conf., pp. 109-114, 1991.
- [6] Hemmaplardh K., Cate E.G., Hammond R.A., Sackett S.A., "The dispatcher training simulator for Metropolitan Edison Company", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 11, No. 2, pp. 898-904, May 1996.
- [7] Smith L.M., Fink L.H., Schulz R.P., "Use of computer model of interconnected power system to assess generation control strategies", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 94, No. 5, pp. 1835-1842, Sept. 1975.
- [8] Report I.C., "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-92, No. 6, pp. 1904-1915, Nov. 1973.
- [9] Kambale P., Mackauer J.J., "Applications of Dynamic Models in Dispatcher Training Simulator and in Other System Dynamic Performance Studies", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems vol. PAS-104, No. 6, pp. 1349-1355, June 1985.
- [10] EPRI Operator Training Simulator: OTS200: Modeling, EPRI, Palo Alto, CA: 2003.
- [11] Kundur P., "Power system stability and control", McGraw_Hill, 1994.
- [12] Susumago, I., Suzuki, M., Miyama, K., Tsuji, T., Dan, K., Yamanishi, A., "Development of a Large-Scale Dispatcher Training Simulator and Training Results", IEEE Trans. on Power Systems vol. 1, No. 2, pp. 67-73, May 1986.
- [13] Prais Mauro, Zhang Guorui, Chen Yilang, Bose Anjan, Curtice David, "Operator Training Simulator: Algorithms and Test Results", IEEE Power Engineering Review vol. 9, No. 8, pp. 59-60, Aug. 1989.
- [14] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, Numerical recipes in FORTRAN, 2nd Edition, Cambridge university press, 1992.
- [15] Vithal A. Patel, Numerical analysis, Harcourt Brace College Publishers, 1994.
- [16] IEEE 10 Generator 39 Bus System, Available: http://psdyn.ece.wisc.edu/IEEE_benchmarks/
- [17] 2008년도 발전설비현황, 한국전력거래소

저 자 소 개



황 평 익 (黃 珮 益)

1981년 2월 16일생. 2006년 서울대 물리학과 졸업. 현재 동대학원 전기공학부 석, 박사 통합 과정

Tel : 02-886-3101

E-mail : hpi@powerlab.snu.ac.kr



안 선 주 (安 善 柱)

1980년 1월 14일생. 2002년 서울대 전기공학부 졸업. 2004년 동대학원 전기공학부 졸업(석사). 2009년 동대학원 전기공학부 졸업(박사). 현재 명지대학교 연구교수

Tel : 031-333-1542

E-mail : sjahn@mju.ac.kr



문 승 일 (文 承 逸)

1961년 2월 1일생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년, 1993년 미국 Ohio State Univ. 석사, 박사학위 취득. 1993년~1997년 전북대학교 조교수, 1997년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수

Tel : 02-880-1821

E-mail : moonsi@plaza.snu.ac.kr



윤 용 태 (尹 容 兌)

1971년 4월 20일생. 1995년 미국 MIT 수학과 졸업. 1997년, 2001년 동대학원 석사, 박사학위 취득. 2002년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 부교수

Tel : 02-880-9143

E-mail : ytyoon@ee.snu.ac.kr



허 성 일 (許 成 日)

1971년 2월 28일생. 1993년 고려대 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국 전력거래소 근무.

Tel : 02-3456-1748

E-mail : sihur@kpx.or.kr