

무효전력제어를 고려한 EMTDC Classical Generator 모델개발

이승렬

윤재영

최종과

기죽을

한국전기연구원

Development of EMTDC Classical Generator Model Considering Reactive Power Control

Seung-Ryul Lee Jae-Young Yoon Heung-Kwan Choi Jong Yul Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In power system, the study on synchronous generators is an important issue. Among the studies, reactive power control of synchronous generators is very important from the viewpoint of power system stability. In this study, we developed a classical generator model and a power factor regulation model applying a simple algorithm in order to control reactive power generation, using EMTDC.

1. 서 론

전력계통에서 가장 기본적인 요소 중 하나가 동기 발전기이다. 이러한 발전기의 모델링은 계통의 과도안정도 및 경제운용 문제 등의 전력계통 해석을 위해서 매우 중요하다. 때문에 이에 대한 연구가 오래 전부터 전세계적으로 수행되어 왔다([1], [2]). 본 연구에서는 발전기의 기본적인 운전특성을 시험하기 위해서, 이러한 발전기의 모델 중에서 가장 기본적인 모델인 고전모델(Classical Model)을 순시치 해석 프로그램 중 하나인 EMTDC를 이용하여 개발하였다. 전력계통 운용 및 해석에서 이러한 발전기 모델링과 함께 중요시되는 이슈 중 하나가 발전기의 무효전력 출력 및 전압제어로서 이에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다[3]. 일반적으로 전력계통에서 전압과 무효전력은 매우 국지적인 특성을 가지며, 무효전력 출력의 제어를 통해서 전압을 제어한다. 오늘날의 전압 및 무효전력의 제어는 단순한 전압조정판을 고려하는 것이 아니라, 계통 내 무효전력원의 효율적인 협조운용으로 계통 운용비용의 최소화까지 고려한 계통운용의 경제성 실현에 영향을 미친다는 특징이 있다. 따라서 무효전력의 제어문제는 매우 중요하다. 유효전력과는 달리 무효전력의 공급원은 매우 다양하며, 그 중 하나인 발전기의 무효전력 출력을 제어하기 위해서 일반적으로 도입하는 방법으로서 자동전압조정기(AVR), 자동역률조정기(APFR) 등이 있다. EMTDC에서는 자동전압조정 모델은 구현되어 있지만, 자동역률조정기는 구현되어 있지 않으므로, 본 연구에서는 EMTDC에서 역률지정을 통한 무효전력의 출력을 제어하기 위한 간단한 조정기를 구현하여 발전기의 무효전력 출력을 제어함으로써 그 효용성을 보인다.

2. Classical Generator Model

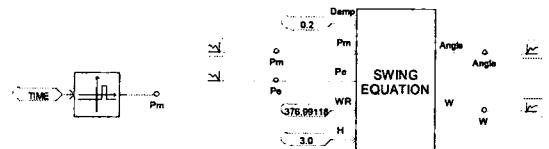
고전적 발전기모델은 고정 전압원과 임피던스를 가지는 등가 전압원 모델에서 관성정수(H)의 특성을 포함하고 있는 발전기 모델이다. (Voltage source behind transient reactance with inertia) 이러한 Classical 발전기 모델을 아래와 같이 EMTDC 내의 등가 전압원을 사용하여 모의하였으며 모의의 정확성을 검증하였다. 관성정수를 가진 고전적 발전기모델은 등가 전압원의 위상을 변경하는 방법으로 모의할 수 있다. 즉, 등가 전압원의 위상각을 External Control을 사용

하여 다음 식(1), (2)와 같은 Classical Model의 동요 방정식에 따라서 구해지도록 모의하였다.

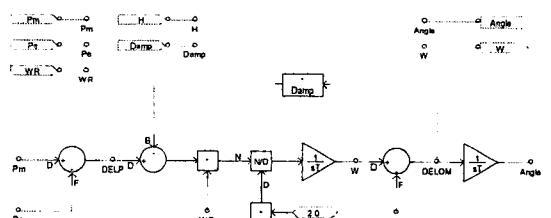
$$\delta = \omega - \omega_0 \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) \quad (2)$$

위의 식을 사용한 EMTDC 위상계산 모델을 나타내면 다음 [그림 1] 및 [그림 2]와 같다.



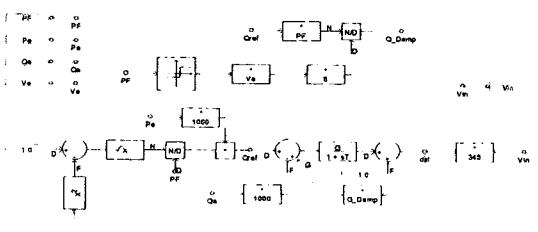
[그림 1] 동요방정식에 의한 위상각 계산 모델



[그림 3] Classical 밤전기 모형 의상과 계산 애플리케이션

3. 문헌 저작권 출판 제어

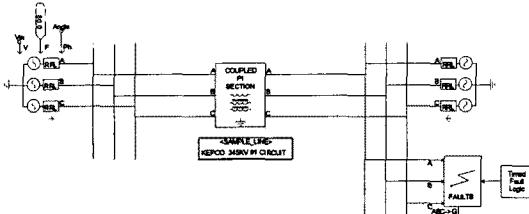
전력계통의 전압 및 무효전력의 제어는 주로 발전기에 의한 무효전력조정, RC 운전, 조상설비의 투입, 변압기의 템 변경 등으로써 가능하다. 이 중 발전기의 제어 방법으로는 발전기 전압을 목표전압으로 유지하기 위한 자동전압조정기(AVR), 발전기 출력이 지정역률을 유지하도록 제어하는 자동역률조정기(APFR) 등이 있다. EMTDC에서 자동전압조정 모델은 구현되어 있지만, 자동역률조정기는 구현되어 있지 않다. 본 연구에서는 다음과 같은 간단한 역률조정기를 적용하였다.



[그림 3] 역률조정기 모델

4. 사례연구

본 연구에서 구현한 Classical Model의 EMTDC 모의를 위한 해석대상계통은 [그림 4]와 같다. 여기서, 등가 전압원의 위상각을 위와 같은 관성정수를 가진 발전기 동요방정식에 의하여 구한다.



[그림 4] Classical 발전기 모의 대상계통

[그림 4]의 계통에서 선로데이터는 [표 1]과 같은 345kV 실계통 데이터를 사용하였다. 각 모선의 등가임피던스 역시 실계통 데이터를 적용하였다.

[표 1] 345kV 선로 데이터

정상·역상 임피던스 ($Z_1 = Z_2$)		영상임피던스 (Z_0)			정상 어드미 턴스	영상 어드미 턴스
		자기임피던스 (Z_r)	2회선인 경우 상호임피던스 (Z_M)			
R (%/km)	X (%/km)	R (%/km)	X (%/km)	R (%/km)	X (%/km)	Y_1 (%/km)
0.0015	0.0255	0.0123	0.0741	0.0108	0.0383	0.6266
						0.2176

주) 100MVA Base, 345kV Base.

483□ × 4 Bundle, 30km=30000m

4.1 초기상태해석

정상상태의 경우 초기화 과정을 거쳐서 1000MW ($P_e = 10.0 \text{ pu}$)의 등가전압원 출력을 내며, 이때 전압 위상각은 9.70978° 를 기록하고 있다. 이는 다음 식 (3)과 같은 계산식의 결과([표 2] 참조)와 일치한다. 이 때, 송·수전단의 전압은 1.0 [p.u] 으로 고정이며, 위상각은 수전단 = 0.0° (고정), 송전단 = 9.70978° 이다.

$$P_i = \sum_{k=1}^N |V_i| |V_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3)$$

[표 2] EMTDC와 수계산 결과 비교

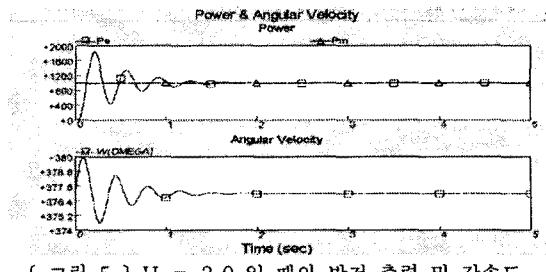
	EMTDC	수계산	오차
송전단전력(MW)	1000.000	1000.046	0.046
수전단전력(MW)	- 995.489	- 995.370	0.119
순실(MW)	4.511	4.676	0.165

4.2 발전기 출력변화추이

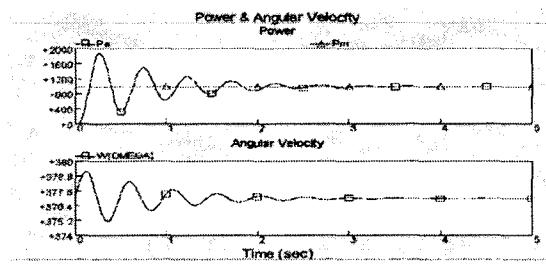
발전기의 관성정수, 기계적입력(P_m), 고장 발생 등에 의한 발전기 출력의 변화를 확인한다. 이 때, 발전단의 전압은 1.0 p.u . 수전단의 전압 및 위상각은 $1.0 \angle 0^\circ \text{ p.u}$ 로 고정하였다.

4.2.1 관성정수 H 에 따른 수렴점도

관성정수란 발전기를 가동해서 정격출력을 내는데 걸리는 시간이므로, 관성정수가 커지면 커질수록 정격출력 까지의 소요시간이 증가한다. 본 연구에서 구현한 발전기모델의 관성정수에 따른 발전기 변화는 [그림 5], [그림 6]과 같다. $H=3$ 일 경우에 비해서 $H=6$ 인 경우에 정격출력까지 걸리는 시간이 더 길어짐을 알 수 있다.



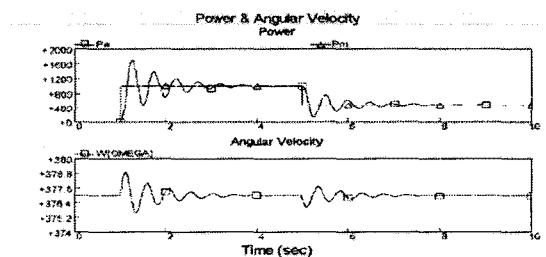
[그림 5] $H = 3.0$ 일 때의 발전 출력 및 각속도



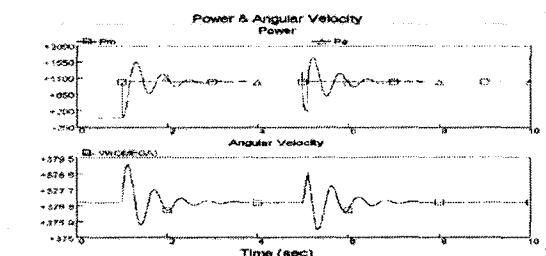
[그림 6] $H = 6.0$ 일 때의 발전 출력 및 각속도

4.2.2 기계적 입력(P_m)에 따른 변화

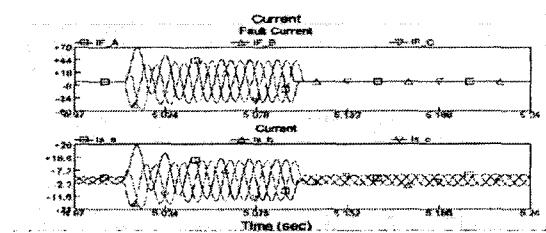
기계적 입력 변화에 따른 결과는 [그림 7]과 같다. 여기서 기계적 입력은 $t = 0\sim 1$ 초에서는 0(zero), $t = 1\sim 5$ 초에서는 1000MW, $t = 5$ 초 이후엔 500MW로 가정하였다. 이렇게 기계적 입력이 변화함에 따라 발전기의 출력이 추종함을 확인할 수 있다.



[그림 7] 기계적 입력의 변화에 따른 결과



[그림 8] 고장 발생시 발전기 출력 및 각속도의 변화



[그림 9] 고장 발생시 전류

4.2.2 고장 발생시 결과

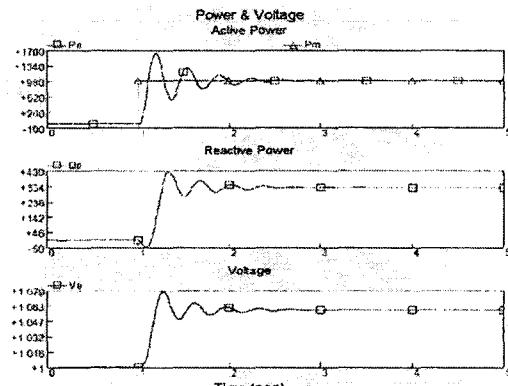
$t=5$ 초일 때 0.1초간 고장이 발생한 것으로 모의했다. [그림 8]과 [그림 9]에 모의 결과를 나타내었다. 고장제거후 발전기의 출력 및 전류값이 정상상태로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

4.3 무효전력출력제어 결과

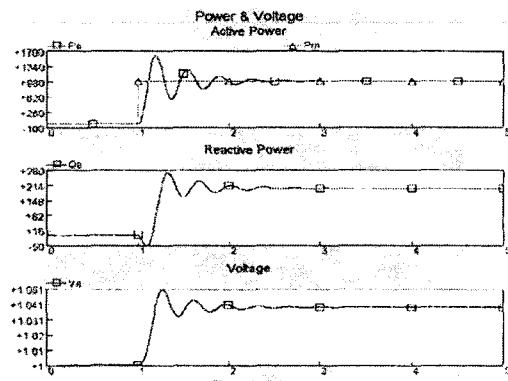
무효전력출력을 제어하기 위하여 [그림 3]의 역률조정기 모델을 적용하였다.

4.3.1 역률에 따른 결과

역률에 따른 결과는 [그림 10], [그림 11], [표 3]과 같다.



[그림 10] 역률 = 0.95 일 때의 출력 및 전압



[그림 11] 역률 = 0.98 일 때의 출력 및 전압

[표 3] 역률에 따른 출력변화 (Pe = 1000 MW)

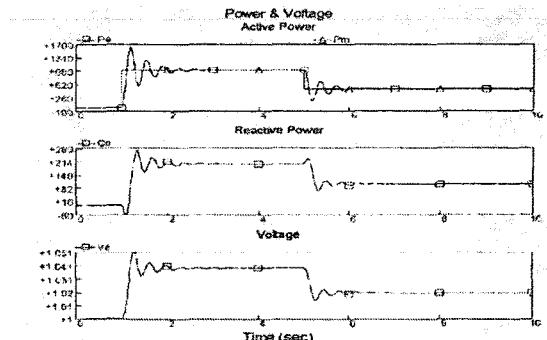
역률	EMTDC 결과	역률에 따른 Q (이론값)	오차 (%)
0.95	Qe = 328.4 MVA	Qe = 328.684 MVA	0.0864
	Ve = 1.05922 p.u	-	-
0.98	Qe = 202.45 MVA	Qe = 203.058 MVA	0.2994
	Ve = 1.03892 p.u	-	-

4.3.2 기계적 입력변화에 따른 결과

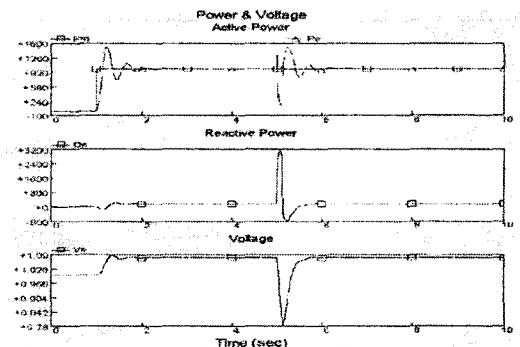
기계적 입력변화에 따른 결과는 [그림 12]와 같다.

4.3.3 고장 발생시 결과

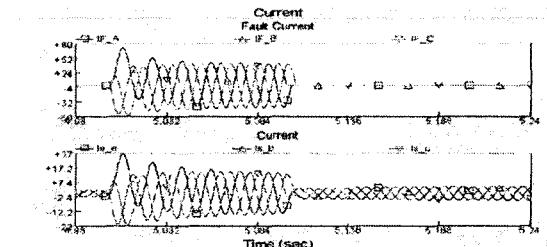
$t=5$ 초일 때 0.1초간 고장이 발생한 것으로 모의했다. [그림 13]과 [그림 14]에 모의 결과를 나타내었다.



[그림 12] 기계적 입력변화에 따른 결과



[그림 13] 고장 발생시의 발전기 출력 및 전압



[그림 14] 고장 발생시 전류

5. 결 론

전력계통에서 발전기에 대한 연구는 매우 중요한 이슈 중 하나이다. 이와 관련하여 발전기의 무효전력출력제어는 계통 안정도 등의 관점에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 EMTDC를 이용하여 발전기 모델 중 가장 기본적인 Classical 발전기 모델을 개발하였으며, 효과적인 무효전력출력제어를 위한 간단한 역률조정기를 구현하였다. 구현한 모델의 효용성을 검증하기 위하여 시험계통에서 관성정수, 기계적 입력변화, 고장발생 등에 따른 결과를 보였다. 본 연구에서 구현한 역률조정기는 매우 간단한 제어기이므로 정확한 무효전력제어를 위해서는 보다 심도 깊은 연구가 필요할 것이다.

【참 고 문 헌】

- (1) Paul M. Adnderson, A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", 1993
- (2) P. KUNDUR, "POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL", 1993
- (3) Thomas W. Eberly, Richard C. Schaefer "Voltage versus var/power factor regulation on synchronous generators", IEEE Transactions on Industry Applications, V.38 N.6, 1682-1687, 2002