

주파수 유연화 운영에 따른 발전기 축 비틀림에 관한 연구

(A Study on the Subsynchronous Resonance by Flexible Frequency Operation)

조운성*

(Yoon-Sung Cho)

Abstract

Subsynchronous Resonance is a condition where the electrical power systems composed of generator and transmission line exchange energy with mechanical turbine-generator system at the frequency of the combined below the subsynchronous frequency. Therefore, the frequency of power systems should be associated with the subsynchronous resonance. This paper describes subsynchronous resonance by flexible frequency operation. It focuses on the characteristics and behavior of subsynchronous resonance. The subsynchronous resonance is being conducted by real-time digital simulator and the IEEE benchmark model for subsynchronous resonance have been utilized for the test systems.

Key Words : Subsynchronous Resonance, Flexible Frequency Operation, Turbine Generator, RTDS, Power System Analysis

1. 서 론

국내 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준에 따르면 주파수 유지 기준은 평상시 $60 \pm 0.2\text{Hz}$, 비상시 62~57.5Hz 범위이다. 주파수 유지 범위는 전력시스템을 구성하는 발전기 및 부하 등에 의해 많은 영향을 받는다. 주파수 변동 범위를 작게 하려면 주파수 응답 특성이 우수한 발전기를 많이 운전해야하므로 발전비용이 상승할 수 있고, 주파수 변동 범위가 크면 전력 설비 또는 생산 활동에 악영향을 미치게 되므로 적절하

게 정해야 한다. 또한 주파수 유지 범위는 예비력과 밀접하게 관련이 되어 있기 때문에 유지범위에 대한 다양한 검토가 요구된다.

표 1 및 2는 국내외 주파수 유지 범위를 나타내고 있다[1-3]. 미국은 북미 신뢰도 위원회(North American Electric Reliability Corporation, NERC)가 정한 바에 따라 60Hz를 표준주파수로 $\pm 0.5\text{Hz}$ 한도 내에서 계통 운영한다. 싱가포르의 50Hz $\pm 0.2\text{Hz}$ 을 표준으로 하며 아무런 조치 없이 0.5Hz 이상 벌어지지 못하도록 규정한다. 영국은 법으로 0.5Hz(60초 이내 복구), 순간적인 범위 내에서는 0.8Hz, 운영상으로는 0.2Hz로 운영하고 있다.

최근 들어 분산전원 용량의 증대 및 철강 부하 등의 투입 등으로 전력시스템에 변화가 있었기에 이러한 변동 범위에 대해 다시 검토할 필요가 있다.

* Main author : Assistant Professor, Dep. of Electronic and Electrical Engineering, Catholic University of Daegu
Tel : 053-850-2782, Fax : 053-850-3397
E-mail : philos@cu.ac.kr
Received : 2014. 12. 24
Accepted : 2015. 1. 26

주파수 유연운전은 기존 전력망에 HVDC를 이용하여 연계하는 방식으로 구성할 수 있다. 그림 1은 HVDC를 활용한 주파수 유연운전 방식을 나타낸다. 기존 전력망에 신규의 고품질 전력망 또는 저품질 전력망을 연계하고자 할 때 HVDC를 활용할 수 있다. 이와 같이 HVDC를 이용하여 주파수 유연운전 방식을 적용할 때 가장 중요한 요소 중 하나는 주파수 유지범위 설정이다. 대부분 수 초 정도 이하의 작은 주기의 변화는 계통관성 또는 자동주파수제어로 해결되나 발전기의 회전시 관성특성이 수십 초 이상의 큰 주기의 변화가 발생 시 주파수 변동 범위가 커진다. 주파수 유지 범위는 발전기-터빈 시스템의 동특성 및 부하별

특성에 영향을 받는다. 그러나 최근 전력시스템에서 철강 부하 등의 대규모 부하가 존재하며, 해당 부하는 전력시스템에서 부하로 동작하거나 전력시스템에 전력을 공급하는 역할도 수행하므로 전력시스템의 주파수에 더 많은 영향을 미친다. 주파수 변동 범위를 설정할 때 이와 같은 현상을 유발하는 요소 중 하나인 발전기 축 비틀림 현상에 대한 상세한 모의가 선행되어야 한다.

본 논문은 주파수 유지범위에 영향을 미치는 요소 중 하나인 발전기-터빈 시스템의 축 비틀림 현상에 대해 소개한다. 우선 주파수 유지 범위와 발전기-터빈 시스템간의 영향을 분석한다. 다음으로 발전기 축 비

표 1. 유럽지역의 주파수 관련 규정
Table 1. Frequency standard of European

	유럽	영국	아일랜드	북유럽
정상 주파수 운영범위	±0.05Hz	±0.2Hz	±0.2Hz	±0.1Hz
최대 순시 주파수 변동범위	0.8Hz	0.8Hz	1Hz	1Hz
정상상태의 최대주파수변동 허용범위	0.2Hz	0.5Hz	0.5Hz	0.5Hz
주파수 회복시간	사용 없음	1분	1분	사용 없음
주파수 회복범위	사용 없음	±0.5Hz	±0.5Hz	사용 없음
주파수 복구시간	15분	10분	20분	15분
주파수 복구범위	사용 없음	±0.2Hz	±0.2Hz	±0.1Hz

표 2. 국내외 계통운영 주파수 비교
Table 2. Frequency comparison between K standard of European

주파수(Hz)	유럽	영국	아일랜드	북유럽	일본(동경)	일본(북해도)	일본(중부/관서/구주)	미국	국내
자체기준	0.05	0.2	0.2	0.1	-	-	-	다양	0.1
규정상범위	0.2	0.5	0.5	0.5	0.2	0.3	0.1	0.5	0.2
공칭주파수	50	50	50	50	50	50	60	60	60

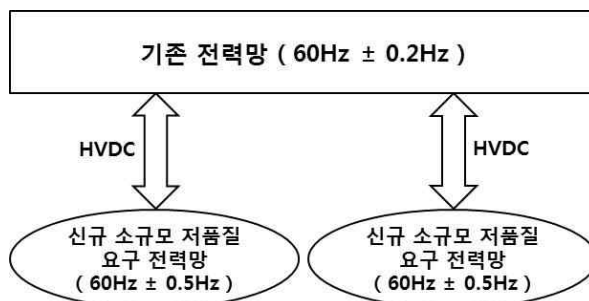


그림 1. 주파수 유연화 운전 방식
Fig. 1. Methodology of Flexible Frequency Operation

틀림 현상에 대해 소개한다. 마지막으로 실시간 시뮬레이터를 활용하여 IEEE Benchmark 시스템을 활용하여 축비틀림 현상을 모의한다.

2. 본 론

2.1 주파수변동에 따른 터빈-발전기 영향

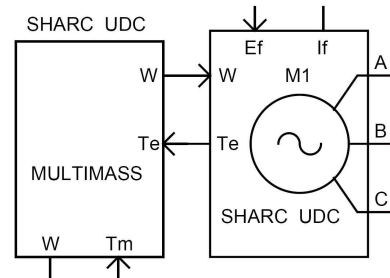
주파수 변동은 발전력과 수요전력의 불균형으로 인하여 발생하게 되거나 발전기의 회전시 관성특성에 따라 기계적으로 발생할 수도 있다. 수 초 정도 이하의 작은 주기의 주파수 변화는 계통의 관성이 흡수할 수 있으며, 수초-수분의 주기를 갖는 주파수 변화는 자동주파수제어 등으로 조정된다. 계통 주파수가 정격 주파수 범위 밖으로 변경될 때는 자동 주파수 응답이 작동되며, 가스터빈의 부하는 Droop 특성에 따라 증발 및 감발된다. 가스터빈의 부하는 연료량 증가와 가변 안내깃을 개방함으로써 급격히 증가시킬 수 있으며, 5%이상의 큰 범위의 주파수로 강하될 경우 주차단기가 자동적으로 개방되고 각 가스터빈은 발전소 단독 운전될 수 있다.

앞서 언급된 바와 같이 수십 초 이상의 주파수 변동에 영향을 미치는 요소 중 하나는 터빈-발전기 시스템의 구성이다. 그림 2 (b) 1에서 보는 바와 같이 일반적인 발전기는 고압터빈, 저압터빈 및 발전기가 커플링 형태로 연결되어 있다. 주파수 변동은 터빈-발전기 시스템 측면에서 공진에 의한 기계적 진동의 지속적인 증가로 터빈이나 발전기가 파괴를 유발할 수 있다. 계통 주파수 저하에 따른 전원측 영향은 다음과 같다.

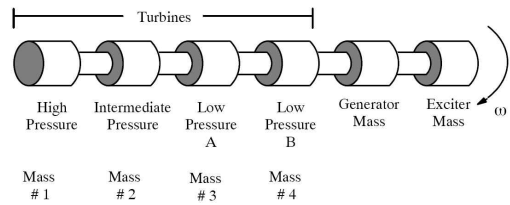
- 발전소 출력 저하 및 제어계의 불안정
 - 터빈 날개에 의한 영향. 즉 저압 터빈의 중단 날개가 공진으로 인하여 급격하게 진동이 증가되고 결국 피로에 의한 균열이 발생
 - 주파수 저하의 한계는 최대 1.5Hz
- 주파수 상승에 따른 전원측 영향은 다음과 같다.
- 터빈 저압부 최종단 Blade의 공진주파수에 의한 진동응력과 날개의 원심력상승이 문제
 - 주파수 저하의 경우보다 연속운전이 가능한 한도

범위가 적음

- 주파수 상승의 한계는 최대 0.5Hz 정도



(a) Multimass와 발전기 연결구조



(b) Multimass 구조

rtids_sharc_mm					
SELF DAMPING		MONITORING		SIGNAL NAMES	
SHAFT SPRING CONSTANT			TURBINE TORQUE SHARE		
CONFIGURATION		INERTIA CONSTANTS		MUTUAL DAMPING	
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Name	Multi-Mass Name	MM			
N	Number of Turbines (1 to 5)	4		1	5
Exc	Model Exciter Mass	Yes			
Freq	Base Frequency	60.0	Hz	0.0	1E38
Fmod	Frequency modulation?	None			
lfm	Lock/Free mode switch operation	RunTl...			
smm	Single/Multi-mass mode SW operation	RunTl...			
deltw	Output omega or delta-omega	Omega			
ieeel	Force FP Input from CC to be IEEE	YES		0	1
ieeo	Force FP Output to CC to be IEEE	YES		0	1
ReqP	Requested 3PC Processor (auto = blank)				[Card][ABC]

(c) Multimass 파라미터

그림 2. RTDS Multimass 모델
Fig. 2. Multimass model of RTDS

2.2 축 비틀림 현상

2.2.1 축 비틀림 매커니즘

전력시스템의 축 비틀림(Subsynchronous Resonance, SSR) 현상은 전기적으로는 유도 발전기 효과와 기계적으로는 축의 기계적인 비틀림 현상으로 설명될 수 있다. 본 논문에서는 주로 비틀림 상호작용(Torsional Interaction)을 중심으로 SSR 현상을

기술하는데, 그 주요 내용은 다음과 같다. 터빈-발전기 축들은 spring mass 시스템의 특징인 Subsynchronous 주파수에서 고유 진동모드를 가지고 있는데, 네트워크의 전기적 공진 주파수가 이 터빈-발전기 축의 비틀림 고유 주파수와 일치하게 되면 비틀림 진동이 야기 된다. 이 상황에서 회전자 진동에 의해 고정자에 유도된 작은 전압은 큰 Subsynchronous 전류를 만들어 낼 수 있다. 이 전류는 회전자 토크에 진동성분을 첨가시켜 더욱 회전자의 진동을 크게 한다. 이 진동 토크가 기계적인 감쇠 토크보다 크면 진동이 더욱 심화된다. 이러한 비틀림 진동이 계속되면 터빈-발전기 축이 붕괴되는 결과를 초래할 수도 있다. 이를 수식적으로 설명하면 다음과 같다.

$$f_{cr} = f_o \sqrt{\frac{X_C}{X + X_E + X_r}} \quad (1)$$

- f_{cr} : 직렬커패시터 보상된 송전선로의 공진주파수
- f_o : 정격주파수
- X_C : 직렬 커패시터 리액턴스
- X : 차과도 발전기 리액턴스
- X_E : 선로 리액턴스
- X_r : 변압기 리액턴스

2.2.2 축 비틀림의 해석적 방법

발전기-축 시스템과 인덕턴스와 커패시턴스로 구성된 네트워크는 상호 작용을 통해 에너지를 교환한다. 그러므로 SSR 현상을 해석하기 위해서는 전기적인 현상뿐만 아니라 기계적인 현상도 포함을 시킨 전기-기계 시스템의 동적 모델을 사용하여야 한다. 계통과 회전자의 결합으로 인해 발생하는 문제를 해석하기 위해 그림 1과 같은 lumped-mass 모델이 사용된다. 이 모델은 5부분으로 구성되어 있다. 또한 여자기 회전자 부분이 발전기 다음에 추가될 수 있다. 크게 나누어 볼 때 SSR에 대한 해석 방법은 동적 시뮬레이션을 통한 시간 영역 해석 및 고유값 분석을 통한 주파수 영역의 해석법으로 나눌 수 있다. 본 논문은 실시간 시뮬레이터(Real-time Digital

Simulator, RTDS) 전기-기계 시스템의 동적 모델인 Multimass을 포함한 동적 시뮬레이션을 통한 시간 영역 해석을 중심으로 한다. RTDS를 이용하면 시간 영역에서의 과도 응답을 손쉽게 모의할 수 있다. 특히 RTDS는 시스템의 3상 모두를 해석하고 전송선, 기기 및 특히 시스템의 비선형 부분까지도 포함하여 매우 세밀하게 모델링되어 있어서 SSR의 시간영역 해석에 장점을 가진다. 따라서 본 케이스에서는 RTDS 발전기, Multimass 모델들을 이용하여 SSR에 의한 과도 상태의 축 토오크를 분석하는 과정을 중심으로 설명된다.

2.2.3 RTDS를 이용한 축 비틀림 모델링

그림 2은 발전기와 Multimass 컴포넌트 및 Multimass의 구조를 나타내고 있다. Multimass 파라미터는 전체 mass의 구조, 관성정수, 댐핑, Shaft Spring Constant, Turbine Torque Share, 출력 모듈로 구성되어 있으며, 다음과 같은 파라미터가 있다.

- N : 터빈의 개수
- Exc : 여자기의 사용 여부
- Ifm : Lock/Free 모드의 컨트롤 위치
- Smm : Single/Multimass 모드의 컨트롤 위치
- Deltw : Multimass의 출력 선택

그림 3은 SSR 현상을 유발시키는 고장 발생 시퀀스이다. 그림 3에 나타나 있듯이 고장을 제어하는 스위치 SWD1A를 초기화 하고, 노드 N4의 전압이 positive 슬로프로 0.0V를 지날 때 90도 위치에서 고장을 발생시켰다가 원하는 시간후 고장을 제거하는 동작을 나타내는 시퀀스이다.

3. 사례 연구

본 논문에서는 참고문헌 [4], [5]의 Benchmark 시스템에 대해 RTDS를 사용하여 모의하였다. 사고시나리오는 다음과 같다.

- 시나리오 1) IEEE First Benchmark Model (FBM)을 사용하여 Multimass Turbine-

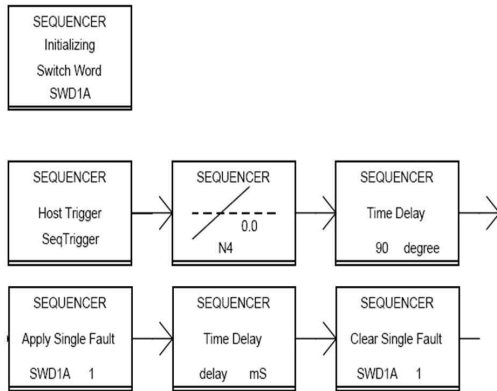


그림 3. 고장 발생 시퀀스
Fig. 3. Sequence of fault simulation

Generator와 Series Comp-ensated 선로로 인한 SSR의 과도 특성 모의

- 시나리오 2) IEEE Second Benchmark Model (SBM#1)을 사용하여 Self-excitation으로 인한 Negative damping과 Torque amplification 현상 모의
- 시나리오 3) IEEE Second Benchmark Model (SBM#2)을 사용하여 Self-excitation으로 인한 Negative damping 현상 모의

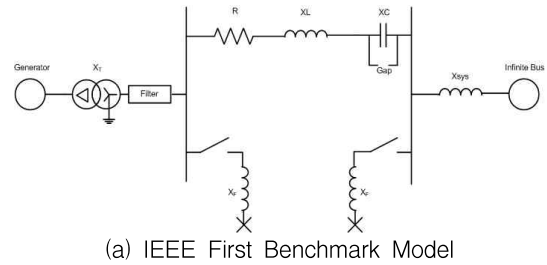
3.1 시나리오 1)모의

그림 4는 RTDS에 구현된 FBM의 계통도이며, FBM은 1회선 선로에 연결된 1개의 발전기로 구성되어 있다. 시나리오 1의 고장 발생은 3상고장에 사고 지속시간은 0.075초다. 표 5를 통해 다음과 같은 결과를 도출할 수 있다.

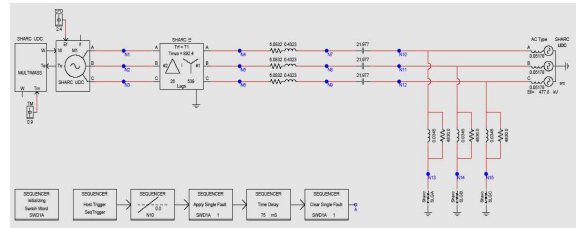
- A상 발전기 전류 및 LPA-LPB의 Shaft Torque를 통해 축 비틀림 현상 확인
- Series Compensated Capacitor의 유무에 따른 발전기 전류, 토크, 축 토크 확인 (Capacitor의 값은 X1의 55%에 해당하는 값)

3.2 시나리오 2)모의

SBM #1은 2회선 선로에 연결된 1개의 발전기로



(a) IEEE First Benchmark Model



(b) RTDS를 사용한 First Benchmark Model

그림 4. 시나리오 1의 시험계통
Fig. 4. Test system of scenario 1

구성되어 있으며, 1회선 Series compensated 선로의 XC값은 앞단의 X1 값의 10-90% 값에 따라 결정된다. 그림 6은 RTDS에 구현된 SBM #1의 계통도이다. 표 3과 그림 7을 통해 다음과 같은 결과를 도출할 수 있다.

- n개의 mass를 가진 회전자는 n-1개의 torsional 모드 존재
- 모드 1은 1개의 극성을 가지며, 모드 2는 2개의 극성, 모드 3은 3개의 극성 존재
- 모드 1에 속하는 여자기와 발전기의 회전자는 나머지 모드와 진동
- 모드 3은 상대적으로 작은 모드 값
- HP-Turbine, LP-Turbine, Exciter의 위상각을 푸리에 해석한 결과 3개의 모드(24Hz, 32Hz, 51Hz)가 존재
- 사고제거시간이 Torque의 크기에 매우 많은 영향을 미침

3.3 시나리오 3)모의

SBM #2은 1회선 선로에 연결된 2개의 발전기로 구성되어 있으며, 1회선 Series compensated 선로의 XC

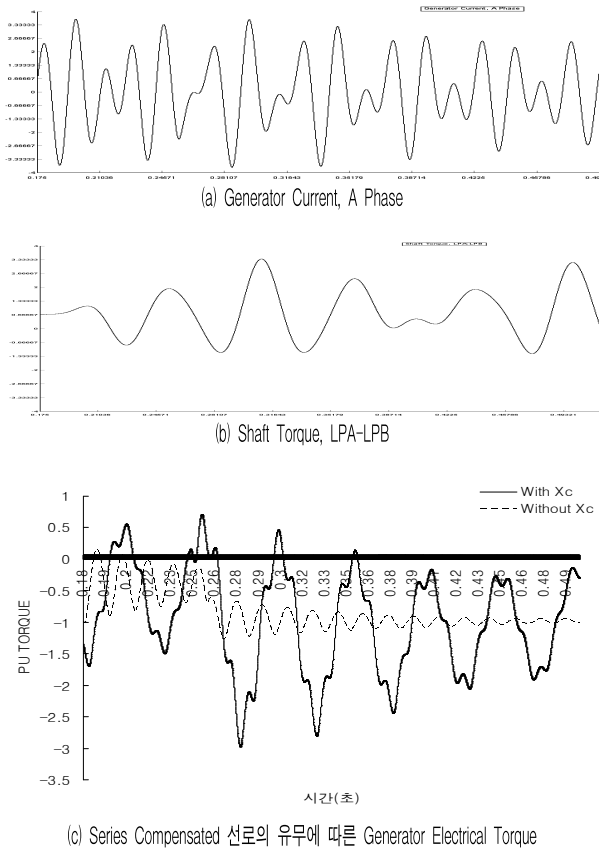


그림 5. 시나리오 1의 결과
Fig. 5. Results of scenario 1

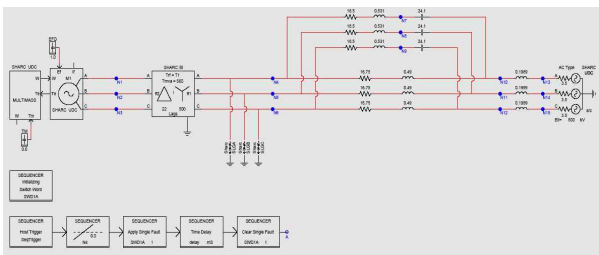
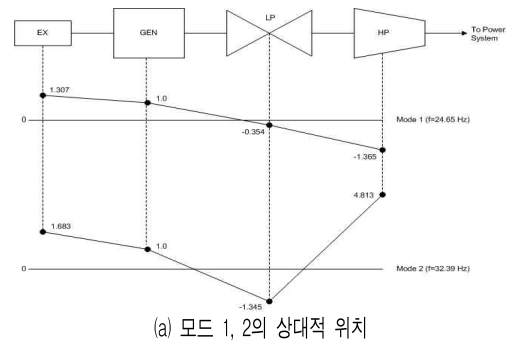


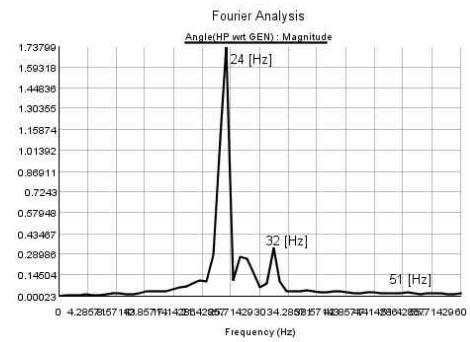
그림 6. 시나리오 2의 시험계통
Fig. 6. Test system of scenario 2

표 3. 시나리오 2의 모드
Table 3. Mode shapes of scenario 2

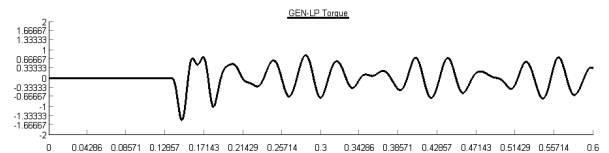
Rotor	Model 1	Mode 2	Mode 3
Exciter	1.307	1.683	-102.6
Generator	1.000	1.000	1.000
Lp-Turbine	-0.354	-1.345	-0.118
Hp-Turbine	-1.365	4.813	0.0544



(a) 모드 1, 2의 상대적 위치



(b) HP-Turbine 위상각에 대한 푸리에 해석 결과



(c) Gen-LP Torque(55% Compensation, 0.040초 사고 지속시간)

그림 7. 시나리오 2의 결과
Fig. 7. Results of scenario 2

값은 앞단의 X1 값의 10~90% 값에 따라 결정된다. 그림 8은 RTDS에 구현된 SBM #2의 계통도 이다. 표 4과 그림 9를 통해 다음과 같은 결과를 도출할 수 있다.

- 70~80%의 선보 보상이 이루어졌을 때 undamping이 가장 큼, 즉 발전기 1, 2의 모드 1이 큰 값을 가짐
- 그림 9는 보상 비율은 75%일 때 발전기의 위상각을 나타냄

4. 결론

본 논문은 발전기의 회전시 관성특성이 수 초 이상

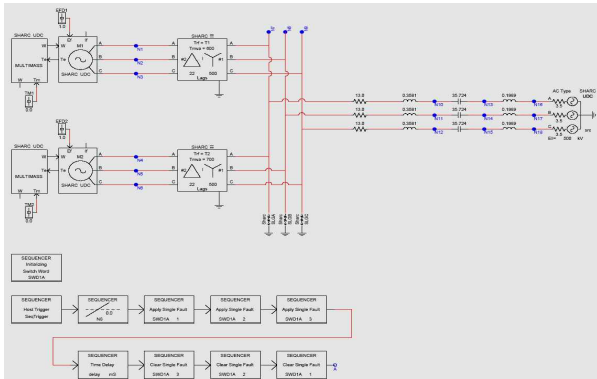


그림 8. 시나리오 3의 시험계통
Fig. 8. Test system of scenario 3

표 4. 보상 비율에 따른 모드 1의 변화
Table 4. Change of mode 1 w.r.t compensation ratio

% Comp	From FSP Minimum δ_1 Required		$\Delta\delta$ From EVP For		Average $\Delta\delta$ from EMTF
	Unit 1	Unit 2	Most Undamped Mode	Remaining Mode	
0	-0.013	-0.007			
20	-0.005	-0.004			
40	0.024	0.006			
50	0.077	0.025	0.063	-0.0070	
55	0.143	0.048	0.091	0.0259	
60	0.287	0.099	0.133	0.1106	0.27
65	0.612	0.123	0.440	0.0863	
70	0.887	0.308	0.951	0.0187	0.87
75	0.890	0.309	1.030	-0.0073	
80	0.650	0.224	0.622	-0.0201	0.62
85	0.313	0.106			
90	0.156	0.051	0.1706	-0.0316	

의 큰 주기의 변화에 영향을 주는 요수 중 하나인 발전기 축비틀림 현상에 대해 소개하였다. 주파수 유지 범위를 조정하기 위해서는 부하 특성, 자동발전제어 특성 및 발전기 축 비틀림 현상 등이 고려되어야 한다. 본 논문에서는 축 비틀림 현상 및 실시간 시뮬레이터를 활용한 multimass 모델링에 대해 소개하였다. IEEE SSR benchmark 모델에 대해 실시간 시뮬레이터를 활용하여 정밀하게 모의하였다.

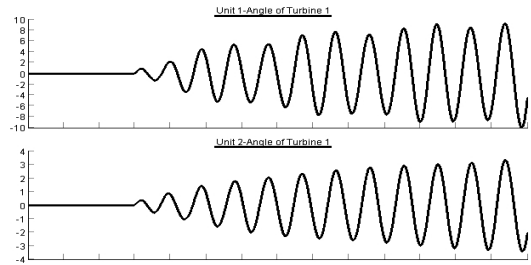


그림 9. 시나리오 3의 결과
Fig. 9. Results of scenario 3

이 논문은 2013년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임

References

- [1] V. Pandurangan, H. Zareipour, O. P. Malik, "Frequency regulation services: a comparative study of select north american and european reserve markets," Proceedings of the 2012 North American Power Symposium (NAPS), 9-11 Sept. 2012.
- [2] NERC Resources Subcommittee, Balancing and frequency control, NERC, 2009.
- [3] Seong-Ho Ryu, Kang-Wan Lee, Gwang-Won Kim, Kab-Ju Hwang, "A study on operating standards for optimal operating reserve in electricity market," The Trans. of the KIEE, 52A(5), pp.287-293, 2003.
- [4] IEEE Subsynchronous Resonance Task Force, "First benchmark model for computer simulation of subsynchronous Resonance," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-96(5), pp.1565-1572, 1977.
- [5] IEEE SSR Working Group, "Second benchmark model for computer simulation of subsynchronous Resonance," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-104(5), pp.1057-1066, 1985.

◇ 저자소개 ◇



조윤성(趙尹晟)

1977년 7월 5일생. 2008년 고려대 대학원 전기공학 졸업(박사). 2012년 LS산전 연구소 책임연구원. 현재 대구가톨릭대학교 전자전기공학과 조교수.