

터빈 발전기 축 시스템의 다중 질량체 모델링을 통한 비틀림 응답 구현

Realization of Torsional Response based on Multi-mass Modeling of Turbine-Generator Shaft System

박 지 경* · 조 규 정* · 손 승 현* · 정 세 진* · 김 철 환**
(Ji-Kyung Park · Gyu-Jung Cho · Seung-Hyun Sohn · Se-Jin Chung · Chul-Hwan Kim)

Abstract - Turbine-generator torsional response is caused by interaction between electrical transient air-gap torque and mechanical characteristics of turbine-generator shafts. If torsional shaft torque exceeds a certain threshold, the loss of fatigue life may occur and, in the end, it is possible to happen permanent shaft failure. Therefore, it is required to understand the torsional response for reliable operation and protection of turbine-generator shaft system. In this paper, we introduced multi-mass modeling method of turbine-generator shaft system using mechanical-electrical analogy and state-space equation to verify the transient torsional response based on ElectroMagnetic Transient Program (EMTP). These simple realization methods for turbine-generator shaft torsional response could be helpful to understand torsional interaction phenomena and develop the transient torque reduction countermeasures for turbine-generator shaft system.

Key Words : Mechanical-electrical analogy, State-space equation, Turbine-generator shaft system, Torsional response

1. 서 론

그동안 터빈 발전기와 전력계통 사이의 전기자기적 상호작용에 의해 야기되는 터빈 발전기 축 시스템의 기계적 손상에 관한 많은 연구들이 수행되었다. 특히 미국의 경우 1970년대 발생한 터빈 발전기 축 균열 및 소손 사고 이후, 터빈 발전기 축 비틀림 상호작용에 대한 연구가 이루어 졌다[1-2]. 하지만, 국내의 경우 관련 분야에 대한 중요성 인식 및 관심이 미미한 실정이며, 연구를 위해 필요한 터빈 발전기 축 시스템의 기계적 데이터 취득 제약과 같은 어려움이 다수 있다.

터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답에 영향을 주는 요인으로는 전력계통 외란에 의한 차단기 스위칭 동작, 선로 보상장치에 의한 차동기 공진, 송전계통 운전 조건 등이 있다. 지속적인 비틀림 응답은 누적되는 스트레스를 야기하며 피로수명을 감소시켜 축 시스템의 균열 및 소손을 야기할 수 있다[3-6]. 이처럼 결과 위주의 연구들이 진행되었지만 비틀림 응답에 대한 이론적, 분석적 방법에 기반을 둔 연구는 상대적으로 부족한 현실이다.

이러한 터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답에 관한 이론적, 분석적 연구를 위해서는 터빈 발전기 축의 기계적, 전기적 시스템 구조 및 비틀림 응답에 대한 근본적인 이해가 필요하다. 뿐만 아니라 비틀림 응답에 대한 다방면의 연구 및 응용을 위하여 기존의 다중 질량체 모델링 기능이 포함된 EMTP-RV와 같은 상용 프로그램 없이도 사용자가 직접 다양한 전력계통 과도현상 분석 프로그램을 이용하여 터빈 발전기 축 시스템의 모드 주파수 특성이 반영된 비틀림 응답을 구현할 수 있어야 한다. 일부 EMTP/ATP와 같은 프로그램에서 발전기 질량체의 관성모멘트를 입력하는 기본 모델링 기능이 있으나 이는 일부 질량체만 고려한 간략화 된 모델이기 때문에 다수의 질량체로 구성된 터빈 발전기 축 시스템 전체의 고유 주파수 특성을 반영한 실질적인 비틀림 응답을 구현하기에는 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 기존 EMTP-RV의 다중 질량체 모델링 기능을 배제하고 사용자가 직접 고유 주파수 특성이 반영된 비틀림 응답을 구현할 수 있는 두 가지 다중 질량체 모델링 방법을 적용하였다. 먼저 기계-전기적 등가화를 이용하여 축 시스템을 간단한 전기적 RLC 회로로 모델링하였고, 다음으로 축 시스템의 운동을 컨트롤 라이브러리 소자를 이용하여 상태 공간 방정식의 형태로 모델링하였다. 이러한 방법으로 구현된 비틀림 응답의 축 토크 파형 및 주파수 성분을 분석하고 다중 질량체 모델링의 적절성을 검증함으로써 축 시스템의 다중 질량체 모델링 기능이 없거나 제한적인 프로그램에서도 고유 주파수 특성이 반영된 비틀림 응답을 구현할 수 있음을 보였다.

† Corresponding Author : College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea.

E-mail : hmwkim@hanmail.net

* College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea.

Received : July 29, 2014; Accepted : January 05, 2015

2. 터빈 발전기 축 시스템 및 비틀림 응답

2.1 터빈 발전기 축 시스템

다중 질량체 모델은 일정한 직경을 가지는 다수의 회전체가 각각 선형적 스프링을 통하여 연결된 시스템을 의미한다. 터빈 발전기 축 시스템은 복잡한 기계적인 요소들로 구성되어 있으며 물리적 구조에 따라 그림 1과 같이 고압터빈, 중압터빈, 저압터빈, 발전기 회전자로 구성된 다중 질량체 모델로 등가화 가능하다. 각 질량체는 고유의 관성모멘트(J)를 가지며, 각 질량체를 상호 연결하는 축은 스프링상수(K)를 가진다. 터빈 발전기 운전 시, 감쇄계수(D)의 영향이 존재하지만 이를 생략하고 터빈 발전기의 비틀림 응답을 분석할 수 있다.

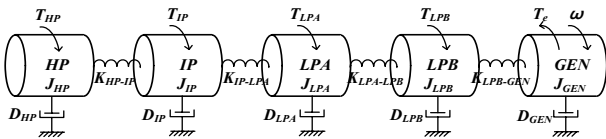


그림 1 터빈 발전기 축 시스템 다중 질량체 모델
Fig. 1 Multi-mass model of turbine-generator shaft system

2.2 터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답

그림 1의 터빈 발전기 축 시스템의 운동 방정식은 식 (1)과 같이 정리된다. 각 터빈에 입력되는 스팀 입력 토크(T_m)에 의해 발전기 공극에 전기적 토크(T_e)가 유도되며 고정자 권선에 전압이 유기되어 계통으로 전력이 공급된다. 전력계통의 정상 운전 시, 식 (1) 우변의 스팀 입력 토크와 전기적 토크는 일정한 값으로 유지되며 터빈 발전기의 기계적 시스템과 전력계통 사이의 일정한 전기자기적 결합을 형성한다. 하지만 외란 시, 발전기 고정자 권선 전류의 급격한 변화에 의한 전기적 토크의 진동이 야기된다. 이때 터빈 발전기 축 시스템에 가해지던 입, 출력 토크의 균형이 깨져 전기자기적 결합이 상실되며 공진 형태의 터빈 발전기 축 시스템 비틀림 응답이 발생하게 된다[7].

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + K\theta = T_m - T_e \quad (1)$$

- 여기서, J : 관성모멘트의 5×5 대각행렬
- D : 감쇄계수의 5×5 대각행렬
- K : 스프링상수의 5×5 비대각행렬
- θ : 각 질량체의 5×1 각변위 행렬
- $T_m - T_e$: 각 질량체의 입,출력 토크의 5×1 행렬

2.3 터빈 발전기 축 시스템의 고유치 해석

터빈 발전기 축 시스템 자체가 가지는 기계적 특성을 이해하기 위해서 고유치 해석을 통한 모드 주파수 및 모드 형상을 도출할 필요가 있다. 터빈 발전기 축 시스템의 모드 주파수는 기계적 시스템이 가지는 고유의 주파수를 의미하며, 일반적으로 N 개

의 질량체로 구성된 다중 질량체 모델은 $N-1$ 개의 차동기 대역의 모드 주파수를 가진다. 터빈 발전기 축 시스템의 모드 형상은 모드 주파수 대역의 외력이 기계적 시스템에 인가되었을 때 시스템 전체에 걸쳐 나타나는 각 질량체의 각변위 즉, 상대적인 비틀림의 정도를 도식적으로 보여준다. 본 논문에서 고려한 터빈 발전기 축 시스템의 고유치 해석 결과는 4.1절에서 설명하였다.

3. 터빈 발전기 축 시스템의 다중 질량체 모델링

3.1 기계-전기적 시스템의 등가화

기계적인 시스템의 운동 방정식을 전기 회로적인 시스템으로 표현할 수 있다. 이러한 기계-전기적 시스템의 등가화는 두 시스템을 정의하는 미분방정식의 동일성에 근거한다. 따라서 전기적 회로 형태로 등가화 된 시스템은 원래의 기계적 시스템이 가지는 운동 특성을 정확히 나타낼 수 있다[8]. 그림 2와 같이 기계-전기적 시스템의 등가성 원리를 이용하여 단일 질량체 회전 시스템을 직, 병렬 RLC 회로의 형태로 등가 표현할 수 있다. 직렬 RLC 회로는 전압원 등가모델에 해당되며 병렬 RLC 회로는 전류원 등가모델에 해당된다. 이와 같이 기계-전기적 시스템의 등가화 방법을 통하여 축 시스템의 비틀림 응답을 회로적으로 간략히 분석할 수 있다.

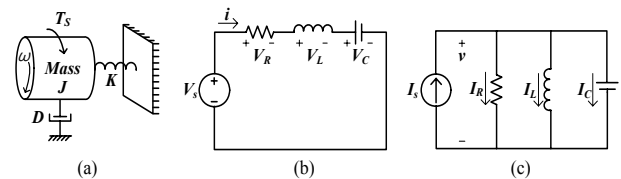


그림 2 기계-전기적 시스템의 등가화 : (a) 단일 질량체 회전 시스템, (b) 직렬 RLC 회로, (c) 병렬 RLC 회로

Fig. 2 Mechanical-electrical analogy : (a) single-mass rotating system, (b) series RLC circuit, (c) parallel RLC circuit

그림 2의 (a)~(c) 시스템의 특성을 서술하는 미분방정식을 각각 식 (2)~(4)와 같이 정리할 수 있으며, 각 미분방정식 항의 유사한 형태를 서로 비교하여 대응관계를 살펴보면 표 1과 같이 기계-전기적 시스템 파라미터의 등가관계를 정리할 수 있다[9].

$$T_s = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + K \int \omega dt \quad (2)$$

$$V_s = V_L + V_R + V_C = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt \quad (3)$$

$$I_s = I_C + I_R + I_L = C \frac{dv}{dt} + Gv + \frac{1}{L} \int v dt \quad (4)$$

3.1.1 다중 질량체 전압원 등가모델

3.1절의 기계-전기적 시스템의 등가화 원리를 이용하여 단일

질량체 회전 시스템을 다중 질량체 회전 시스템의 형태로 확장할 수 있다. 터빈 발전기 축 시스템에 입, 출력 되는 토크를 전압원으로 고려하면, 그림 1의 터빈 발전기 축 시스템을 그림 3과 같이 다중 질량체 전압원 등가모델로 구성할 수 있다. 표 1에서 전압원 등가모델의 축에 해당되는 파라미터는 커패시터에 대응된다. 따라서 각각의 축에서 나타나는 기계적 토크는 해당되는 커패시터에 걸리는 전압을 통하여 확인할 수 있다.

표 1 기계-전기적 시스템 등가모델 파라미터 관계

Table 1 Relation of mechanical-electrical system equivalent model parameters

기계적 파라미터	전압원 등가모델	전류원 등가모델
각속도 ω	전류 i	전압 v
인가 토크 T_s	인가 전압 V_s	인가 전류 I_s
감쇄 계수 D	저항 R	컨덕턴스 G
스프링 상수 $1/K$	커패시턴스 C	인덕턴스 L
관성 모멘트 J	인덕턴스 L	커패시턴스 C

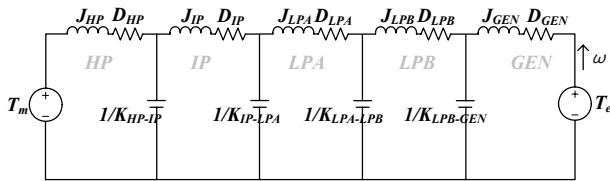


그림 3 터빈 발전기 축 시스템 다중 질량체 전압원 등가모델
Fig. 3 Thevenin equivalent model of multi-mass shaft system

3.1.2 다중 질량체 전류원 등가모델

터빈 발전기 축 시스템에 입, 출력되는 토크를 전류원으로 고려하면 그림 4와 같이 다중 질량체 전류원 등가모델로 구성할 수 있다. 표 1에서 전류원 등가모델의 축에 해당되는 파라미터는 인덕터에 대응된다. 따라서 터빈 발전기 각각의 축에서 나타나는 기계적 토크는 해당되는 인덕터에 흐르는 전류를 통하여 확인할 수 있다.

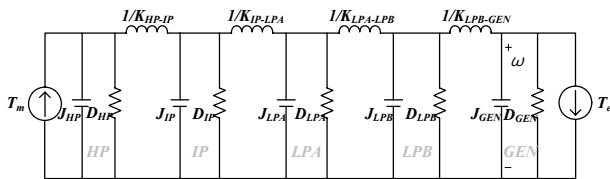


그림 4 터빈 발전기 축 시스템 다중 질량체 전류원 등가모델
Fig. 4 Norton equivalent model of multi-mass shaft system

3.2 상태 공간 방정식을 통한 모델링

수식적으로 비틀림 응답을 구현할 수 있는 방법으로 상태 공

간 방정식을 활용한 터빈 발전기 축 시스템 다중 질량체 모델링이 있다. 2.2절에서 서술된 터빈 발전기 축 시스템의 회전 운동 방정식 식 (1)을 식 (5)와 같이 상태 공간 형태의 방정식으로 변형할 수 있다.

그림 1처럼 5개의 다중 질량체를 고려할 경우, U 는 입력으로써 각 질량체에 인가되는 스티프 토크와 전기적 토크의 출력성분으로 구성된 5×1 행렬을 의미하며, Y 는 출력으로써 각 질량체의 각변위 및 각속도 성분으로 구성된 10×1 행렬을 의미한다. 행렬 A, B, C 는 축 시스템 고유의 특성을 나타내는 성분으로 기계적 데이터에 의해 각각 $10 \times 10, 10 \times 5, 10 \times 10$ 행렬로 구성된다. EMTP-RV의 컨트롤 라이브러리 소자 등을 이용하여 다중 질량체 모델의 상태 공간 방정식을 구현할 수 있다.

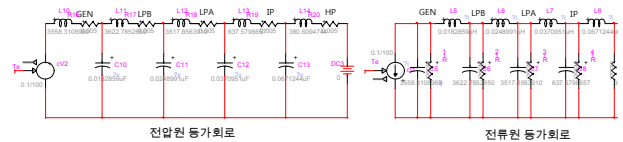
$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $X = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$, $\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}$, $\theta = [\theta_{HP} \ \theta_{IP} \ \theta_{LPA} \ \theta_{LPB} \ \theta_{GEN}]^T$

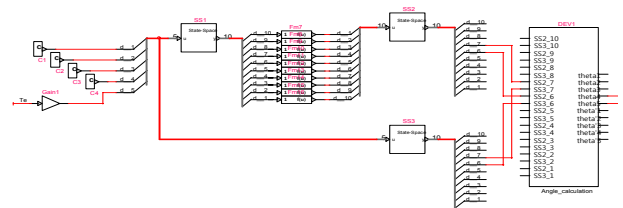
$$U = [T_{HP} \ T_{IP} \ T_{LPA} \ T_{LPB} \ -T_e]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{5 \times 5} & I_{5 \times 5} \\ -K/J & -D/J \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0_{5 \times 5/J} \\ I_{5 \times 5/J} \end{bmatrix}, \quad C = [I_{10 \times 10}]$$

그림 5는 기존 EMTP-RV에 내장된 다중 질량체 모델링 기능을 배제하고 구현한 축 시스템의 다중 질량체 전압원, 전류원 등가모델 및 상태 공간 방정식 모델이다. 이러한 방법을 응용함으로써 다양한 프로그램에서 터빈 발전기 축 시스템의 다중 질량체 구현이 가능하다.



(a) 전압원, 전류원 등가모델로 구현한 다중 질량체 모델



(b) 컨트롤 라이브러리로 구현한 다중 질량체 상태 공간 방정식

그림 5 EMTP를 이용하여 구현된 축 시스템 다중 질량체 모델
Fig. 5 Multi-mass modeling based on EMTP

최종적으로 두 가지 방법으로 모델링된 터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답이 계산 되는 과정을 도식적으로 표현하면 그림 6과 같다. 터빈 발전기 축 시스템의 특성을 정의하고 입, 출력되는 외부조건을 대입하는 과정을 통하여 비틀림 응답이 구현된다.

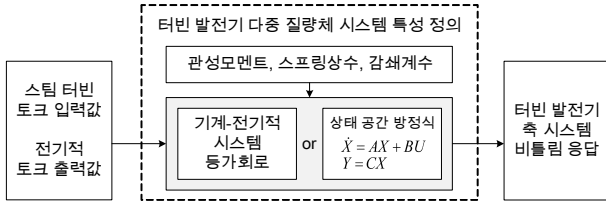


그림 6 다중 질량체 모델링을 통한 비틀림 응답 구현
Fig. 6 Torsional response through multi-mass modeling

4. 시뮬레이션 조건 및 전기적 토크의 구현

4.1 시뮬레이션 조건

전기적 회로 및 상태 공간 방정식으로 다중 질량체 모델링된 터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답을 구현하기 위하여 그림 7의 154kV 1기 무한모선 시뮬레이션 계통을 구성하였다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 5개의 질량체로 구성된 축 시스템을 가정하였으며, 표 2의 기계적 데이터를 고려하였다. 두 가지 방법으로 모델링된 다중 질량체 모델에서 비틀림 응답이 적절히 구현되는지 확인하기 위하여 시뮬레이션 계통의 A상 단상 고장 및 3상 고장을 모의하였다. 이때 고장 발생은 0.1초, 고장 제거는 0.2초에 이루어진 것으로 모의하였으며 비틀림 응답의 간략한 구현을 위하여 일정한 스팀 입력 토크를 가정하였고 조속기 및 여자기 제어는 생략하였다.

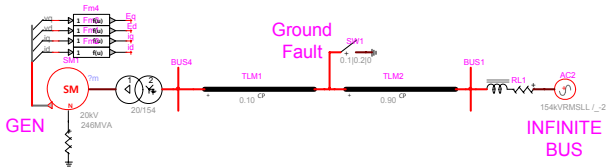


그림 7 154kV 1기 무한모선 시뮬레이션 계통
Fig. 7 154kV Single machine infinite bus simulation system

표 2 터빈 발전기 축 시스템의 기계적 데이터

Table 2 Mechanical data of turbine-generator shaft system

질량체	관성모멘트 J (kg·m ² /rad)	축	스프링상수 K (Nm/rad)
HP	380.6094744	HP-IP	14,897,722.21
IP	637.5798657	IP-LPA	26,957,718.48
LPA	3,517.8563910	LPA-LPB	40,162,024.68
LPB	3,622.7852650	LPB-GEN	54,686,897.09
GEN	3,558.3108960		

표 2의 기계적 데이터를 바탕으로 분석한 축 시스템의 고유치 해석 결과는 그림 8과 같다. 16.0030, 25.4441, 32.1907, 47.4377Hz 총 4개의 모드 주파수가 존재하며 각 모드 주파수에

해당하는 모드 형상을 확인할 수 있다. 이러한 고유치 해석 결과는 터빈 발전기 축 시스템의 다중 질량체 모델링을 통한 비틀림 응답이 적절히 구현되는지 검증하는데 응용될 수 있다.

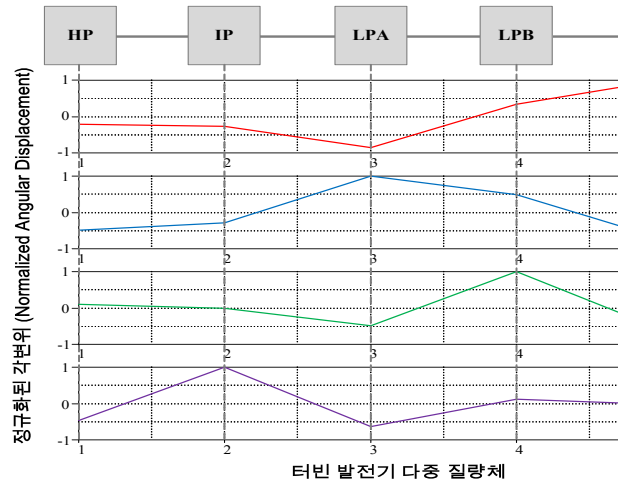


그림 8 터빈 발전기 축 시스템의 모드 주파수 및 모드 형상
Fig. 8 Mode frequencies and mode shape of turbine-generator shaft system

4.2 전기적 토크의 구현

비틀림 응답을 구현하기 위해서는 축 시스템의 다중 질량체 모델링뿐만 아니라 발전기의 전기적 토크 역시 구현되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 그림 9와 같이 비틀림 응답과 연관된 발전기 회전자와 과도현상을 모의하기 위한 d-q축 등가회로를 구현하였다[10]. 전기적 파라미터 값은 본 논문에서 생략하였으며 일정한 계자전압을 가정하고 여자기의 전기적 토크 진동을 무시함으로써 과도 축 토크 계산 시 필요한 단계를 최소화 하였다.

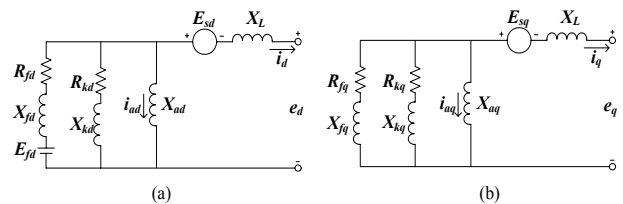


그림 9 과도현상 분석을 위한 동기 발전기 모델 : (a) d축 등가회로, (b) q축 등가회로
Fig. 9 Synchronous generator model for transient studies : (a) d-axis equivalent circuit, (b) q-axis equivalent circuit

그림 7의 시뮬레이션 계통 동기 발전기 내부 d-q축과 연관된 파라미터들을 식 (6)에 대입하면 발전기 공극에 존재하는 전기적 토크(T_e) 값을 계산할 수 있다.

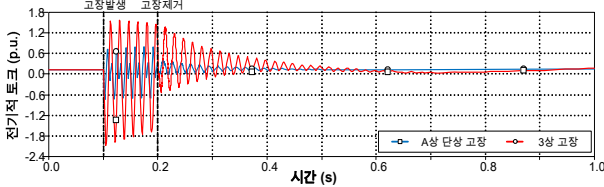
$$T_e = X_{ad}i_{ad}i_q - X_{aq}i_{aq}i_d \quad (6)$$

여기서 X_{ad} : d축 전기자 반작용 리액턴스
 X_{aq} : q축 전기자 반작용 리액턴스
 i_{ad} : d축 전기자 반작용 리액턴스 전류
 i_{aq} : q축 전기자 반작용 리액턴스 전류
 i_d, i_q : d축, q축 전류

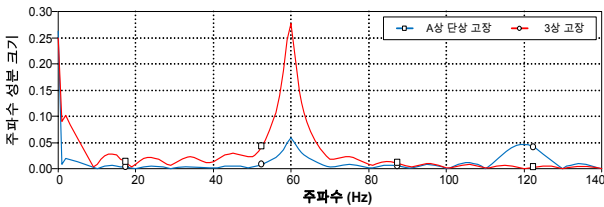
5. 시뮬레이션을 통한 비틀림 응답 구현

5.1 전기적 토크 구현 결과

전력계통의 단상, 3상 고장 발생 및 차단기 고장 제거 동작 시, 동기 발전기 d-q축 등가회로 모델링을 통하여 구현되는 전기적 토크의 파형 및 주파수 성분은 그림 10과 같다. 비틀림 응답 구현의 간략화를 위하여 일정한 계자전압을 가정하였으므로 외란 이후 전기적 토크가 빠르게 정상상태로 수렴하고 3상 고장과 같이 고장 레벨이 심해질수록 전기적 토크의 진동 폭이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 외란에 의해 전기적 토크의 다양한 주파수 성분이 야기됨을 확인할 수 있다.



(a) 전기적 토크의 순시 파형



(b) 전기적 토크의 주파수 성분

그림 10 전기적 토크의 파형

Fig. 10 Waveform of electrical torque

5.2 등가회로를 통한 비틀림 응답 구현 결과

터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답은 기계적 축 토크의 순시 파형과 주파수 성분 두 가지로 분석할 수 있다. 일반적으로 터빈 발전기 축 시스템에서 LPB-GEN에 해당하는 축이 전력계통과 물리적인 거리가 가장 가깝고 기계적 상수 특성에 의해 상대적으로 가장 큰 비틀림 응답이 나타난다. 따라서 본 논문에서는 LPB-GEN 축에서 야기되는 토크 분석에 주목하였다.

그림 10의 전기적 토크 변화와 같이 축 시스템에 인가되는 외란에 의하여 전기자기적 결합이 상실되면 그림 11과 같은 공진 형태의 축 토크 파형이 나타나게 된다. 이때 터빈 발전기의 다중

질량체 전압원, 전류원 등가모델 모두 동일한 축 토크 순시 파형을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 전압원, 전류원 등가모델 모두 기계-전기적 시스템의 등가화 원리에 의해 모델링되었기 때문에 등가회로의 구성만 다를 뿐 동일한 비틀림 응답 특성을 보여주는 것을 의미한다.

또한 고장 레벨이 커질수록 기계적 축 토크 파형의 진동 폭이 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 3상 고장이 단상 고장보다 발전기 고정자 권선 전류의 더 큰 변화를 야기하여 전기적 토크의 심한 진동을 만들기 때문이며 이는 최종적으로 터빈 발전기 축 시스템에 더 큰 기계적 토크를 유발하게 된다. 그리고 고장 제거 이후 그림 10의 전기적 토크 진동과 달리 기계적 축 토크의 진동이 지속되는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적으로 감쇄계수가 축 토크 크기의 최대값에 미치는 영향이 미미하고 시스템 운전 특성을 반영한 실질적인 감쇄계수 파라미터를 얻기가 어려운 제약사항이 있기 때문에 본 논문에서 감쇄계수 영향을 생략하여 비틀림 응답을 구현하였기 때문이다.

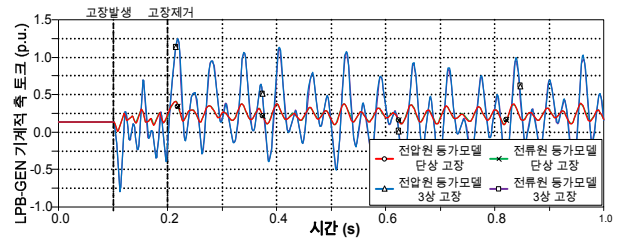


그림 11 LPB-GEN 기계적 축 토크 순시 파형

Fig. 11 Instantaneous waveform of LPB-GEN mechanical shaft torque

그림 12와 같이 축 토크 순시 파형을 주파수 영역으로 변환하면, 터빈 발전기 다중 질량체 전압원, 전류원 등가모델의 축 토크가 축 시스템의 모드 주파수 성분으로 구성되어 있으며, 동일한 주파수 응답 특성을 가짐을 알 수 있다. 이는 전기적 토크의 진동이 축 시스템 모드 주파수와 공진을 야기하였음을 보여주는 결과이다. 특히 축 토크 파형에서 상대적으로 Mode 1, 2, 3의 주파수 성분이 가장 크게 나타게 되는데 이는 그림 8의 모드형상에서 Mode 4보다 Mode 1, 2, 3의 LPB-GEN 사이 상대적인 각 변위 변화가 크게 나타나기 때문이다.

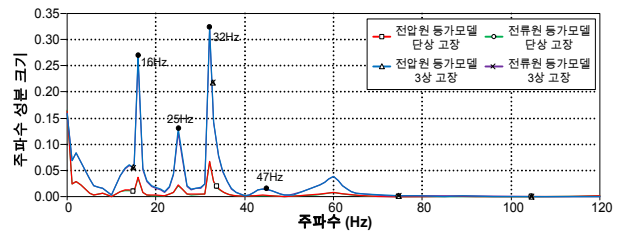
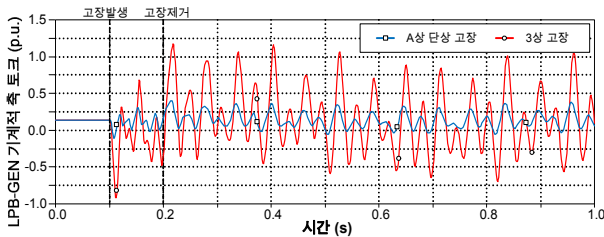


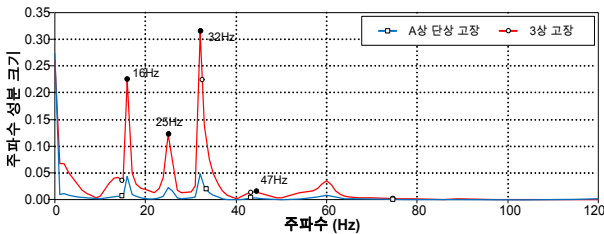
그림 12 LPB-GEN 기계적 축 토크의 주파수 성분

Fig. 12 Frequency components of LPB-GEN mechanical shaft torque

동일 시뮬레이션 조건에서 EMTP-RV 상용 프로그램에 내장된 기존의 다중 질량체 모델링 기능을 이용한 비틀림 응답 결과는 그림 13과 같다. 이를 비교하여 살펴보면, 본 논문의 다중 질량체 등가회로 모델의 비틀림 응답과 거의 동일함을 확인할 수 있다. 따라서 축 시스템의 다중 질량체 모델링 기능이 포함되지 않거나 제한적인 기능만을 가진 프로그램일지라도 본 논문과 같이 간략한 등가회로 구성을 통하여 계통 외란에 의해 야기되는 비틀림 응답을 모드 주파수 특성을 반영하여 적절히 구현할 수 있음을 알 수 있다.



(a) LPB-GEN 기계적 축 토크 순시 파형

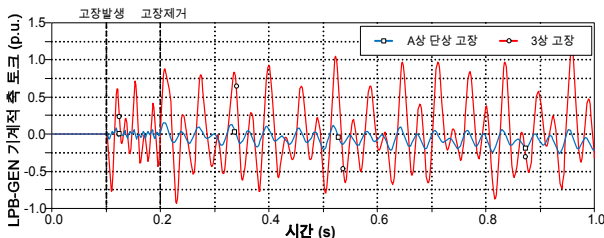


(b) LPB-GEN 기계적 축 토크의 주파수 성분

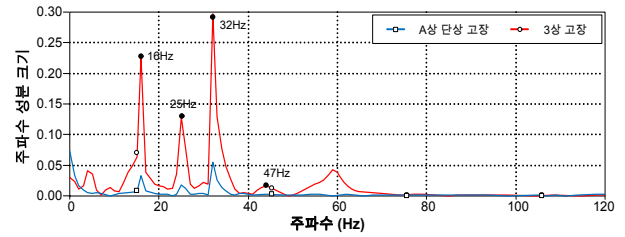
그림 13 EMTP-RV 다중 질량체 모델링 기능을 이용한 비틀림 응답
Fig. 13 Torsional response of multi-mass modeling in EMTP-RV

5.3 상태 공간 방정식을 통한 비틀림 응답 구현 결과

축 시스템 다중 질량체의 상태 공간 방정식을 모델링하여 구현한 비틀림 응답 결과는 그림 14와 같다. 축 토크 순시 파형이 5.2절의 등가회로 모델링을 통하여 구현한 축 토크 파형과 다소 상이하게 나타나는 이유는 상태 공간 방정식의 초기 조건 설정에 따른 영향으로 해석되며 축 토크 파형 분석에 있어서 기계-전기적 등가회로 모델을 이용한 비틀림 응답 구현 방법이 상태 공간 방정식을 이용한 방법보다 더 용이할 것으로 사료된다.



(a) LPB-GEN 기계적 축 토크 순시 파형



(b) LPB-GEN 기계적 축 토크의 주파수 성분

그림 14 상태 공간 방정식 모델링을 통한 비틀림 응답

Fig. 14 Torsional response of state-space equation modeling

주파수 성분 분석 시, 전기적 토크의 진동이 터빈 발전기 축 시스템 모드 주파수 성분과 공진을 야기한 것을 확인할 수 있으므로 상태 공간 방정식을 이용한 다중 질량체 모델링 방법도 터빈 발전기 축 시스템 모드 주파수와 연관된 비틀림 응답 본연의 특성을 잘 구현할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 터빈 발전기 축 시스템의 다중 질량체를 두 가지 방법으로 모델링하여 모드 주파수 특성이 반영된 비틀림 응답이 적절히 구현되는지 검증하였다. 먼저 기계-전기적 등가화 방법으로 터빈 발전기 축 시스템의 다중 질량체 전압원, 전류원 등 가모델을 구현하였으며, 다음으로 회전 시스템의 상태 공간 방정식을 이용한 수식적 모델링을 진행하였다.

그 결과, EMTP-RV에서 비틀림 응답을 모의하는 기존의 기능 없이도 축 시스템의 다중 질량체를 구현함으로써 모드 주파수와 연관된 공진형태의 축 토크 파형 및 주파수 응답을 간략하게 구현할 수 있음을 확인하였다. 이러한 방법은 터빈 발전기 축 시스템의 실제 모드 주파수 특성이 반영된 다중 질량체 모델링에 기능적으로 제한이 있는 EMTP/ATP 및 기타 전력계통 과도현상 분석 프로그램에도 응용될 수 있다. 또한 본 논문의 터빈 발전기 다중 질량체 모델링 방법을 바탕으로 축 비틀림 현상에 대한 근본적인 이해 및 분석적 접근이 가능할 것이며 향후 다방면에 걸친 응용 및 대책 개발에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

“이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2013R1A1A2009294)”

References

[1] IEEE Working Group Interim Report, "Effects of Switching Network Disturbances on Turbine-Generator Shaft Systems," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-101, pp. 3151-3157, 1982.

- [2] IEEE Working Group on the Effects of Switching on Turbine-Generators, "IEEE Screening Guide for Planned Steady-State Switching Operations to Minimize Harmful Effects on Steam Turbine-Generators," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-99, pp. 1519-1521, 1980.
- [3] D. N. Walker, S. L. Adams and R. J. Placek, "Torsional Vibration and Fatigue of Turbine- Generator shafts," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-100, pp. 4373-4380, 1981.
- [4] C. E. J. Bowler, P. G. Brown and D. N. Walker, "Evaluation of the Effect of Power Circuit Breaker Reclosing Practices on Turbine-Generators Shafts," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-99, pp. 1764-1779, 1980.
- [5] J. S. Joyce, T. Kulig and D. Lambrecht, "The Impact of High-Speed Reclosure of Single and Multi-Phase Systems Faults on Turbine-Generator Shaft Torsional Fatigue," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-99, pp. 279-291, 1980.
- [6] J. S. Joyce, T. Kulig and D. Lambrecht, "Torsional Fatigue of Turbine-Generator Shafts Caused by Different Electrical System Faults and Switching Operations," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-97, pp. 1965-1977, 1978.
- [7] J. Stein, P. Zayicek, "Steam Turbine-Generator Torsional Vibration Interaction with the Electrical Network," EPRI, Palo Alto, CA, Rep. 1011679, Nov. 2005.
- [8] G.D. McCann, C.E. Warren, H.E. Criner. "Determination of transient shaft torques in turbine generators by means of the electrical-mechanical analogy," Electrical Engineering, vol. 64, pp. 492-493, 1945.
- [9] W.M. Lin, C.C. Tsai, C.H. Lin, "Analysing the linear equivalent circuit of electromechanical systems for steam turbine generator units", IET Gener. Transm. Distrib, vol. 5, pp. 685-693, 2011.
- [10] IEEE Subsynchronous Resonance Task Force of the Dynamic System Performance Working Group, "First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. 96, pp. 1565-1572, 1977.

저 자 소 개



박 지 경(Ji-Kyung Park)

1985년 5월 16일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2012년~현재 성균관대 정보통신대학 석박사통합과정
 Tel : 031-299-4630
 Fax : 031-299-4137
 E-mail : dclover@skku.edu



조 규 정(Gyu-Jung Cho)

1986년 12월 20일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2014년 성균관대 정보통신대학 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정
 Tel : 031-299-4630
 Fax : 031-299-4137
 E-mail : thug1220@naver.com



손 승 현(Seung-Hyun Sohn)

1986년 11월 04일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2014년 성균관대 정보통신대학 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정
 Tel : 031-299-4630
 Fax : 031-299-4137
 E-mail : sons88@hanmail.net



정 세 진(Se-Jin Chung)

1990년 12월 17일생. 2013년 가천대학교 전기소방공학부 졸업. 2013년~현재 성균관대 정보통신대학 석박사통합과정
 Tel : 031-299-4630
 Fax : 031-299-4137
 E-mail : 12sj17@gmail.com



김 철 환(Chul-Hwan Kim)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 성균관대 정보통신대학 교수, 전력IT인력양성센터 센터장
 Tel : 031-290-7124
 Fax : 031-299-4137
 E-mail : hmwkim@hanmail.net