

터빈 블레이드 모델링을 통한 터빈 발전기 축 시스템의 기계적 토크 응답 분석

Analysis of Turbine-Generator Shaft System Mechanical Torque Response based on Turbine Blade Modeling

박 지 경* · 정 세 진* · 김 철 환*
(Ji-Kyung Park · 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. There are various factors that affects torsional interaction such as fault, circuit breaker switching and generator mal-synchronizing, etc. Fortunately, we can easily simulate above torsional interaction phenomena by using ElectroMagnetic Transient Program (EMTP). However, conventional EMTP shows the incomplete response of super-synchronous torsional mode since it does not consider turbine blade section. Therefore, in this paper, we introduced mechanical-electrical analogy for detailed modeling of turbine-generator shaft system including low pressure turbine blade section. In addition, we derived the natural frequencies of modeled turbine-generator shaft system including turbine blade section and analyzed the characteristics of mechanical torque response at shaft coupling and turbine blade root area according to power system balanced/unbalanced faults.

Key Words : Mechanical-electrical analogy, Mode frequency, Turbine blade, Turbine-generator shaft system, Torsional response

1. 서 론

1970년대 미국에서 발생한 터빈 발전기 축 균열 및 소손 사고 이후, 터빈 발전기의 기계적 축 시스템과 전력계통의 전기적 시스템 사이의 비틀림 상호작용에 대한 활발한 연구가 이루어 졌다 [1, 2]. 하지만, 국내의 경우 관련 분야에 대한 연구가 미미하며 터빈 발전기 축 시스템의 기계적 데이터를 취득하는데 어려움이 있다.

터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답은 발전기 공극 토크의 조건에 따라 두 가지로 분류된다. 첫 번째로 계통 고장, 선로 스위칭, 부하 탈락, 비동기 투입 등에 의해 야기되는 공극 토크의 과도적인 큰 변화에 의해 발생하는 비틀림 응답이 있다. 두 번째로 선로 정수의 불평형, 부하 불평형, 선로 직렬보상 커패시터에 의한 차동기 공진 등에 의해 야기되는 공극 토크의 지속적인 고조파 성분으로 인한 비틀림 응답이 있다[3]. 축 시스템에서 일어나는 지속적인 비틀림 응답은 누적되는 스트레스를 야기하며 피

로수명을 감소시켜 축 시스템의 균열 및 소손을 야기하게 된다 [4-6].

이처럼 전력계통에서 일어나는 다양한 현상에 의한 터빈 발전기 기계적 축 시스템의 영향을 분석하기 위해서는 축 시스템의 정확한 모델링은 필수적이다. 하지만 현재 상용 전력계통 과도현상 분석 프로그램에 내장된 축 시스템의 다중 질량체 모델링 기능은 터빈 블레이드 영역의 모델링을 포함하지 않아 초동기 비틀림 모드에 대한 응답을 구현할 수 없어 다양한 영향요인에 의한 기계적 토크 응답을 분석하기에 제약이 있다.

따라서 본 논문에서는 터빈 발전기 축 시스템의 상세 모델링을 위하여 ElectroMagnetic Transient Program (EMTP)를 바탕으로 터빈 블레이드 영역을 포함한 기계적 축 시스템을 전기적 시스템으로 등가화 모델링 하였다. 그리고 모델링된 시스템을 345kV 계통에 적용하여 계통 외란에 따른 축 시스템의 기계적 토크 응답 특성을 분석하고 모델링의 유효성을 확인 하였다.

2. 터빈 발전기 축 시스템

2.1 터빈 발전기 축 시스템의 다중 질량체 등가화

터빈 발전기 축 시스템은 복잡한 기계적인 요소들로 구성되어 있으며 물리적 구조에 따라 그림 1과 같이 고압 터빈, 중압 터

† 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 : March 11, 2015; Accepted : August 12, 2015

빈, 저압 터빈, 발전기 회전자로 구성된 다중 질량체 모델로 등가화 가능하다. 각 질량체는 고유의 관성모멘트(J)를 가지며, 각 질량체를 상호 연결하는 축은 스프링상수(K)를 가진다.

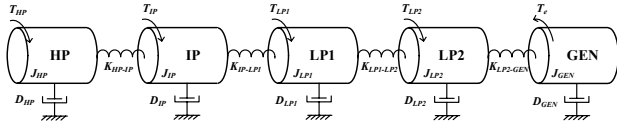


그림 1 터빈 발전기 축 시스템 다중 질량체 모델
Fig. 1 Multi-mass model of turbine-generator shaft system

2.2 터빈 발전기 축 시스템의 기계적 토크 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 출력 토크(T_e)가 유도된다. 전력계통의 정상 운전 시, 식 (1) 우변의 입, 출력 토크는 일정한 값으로 유지되며 터빈 발전기의 기계적 시스템과 전력계통 사이의 일정한 전기자적 결합을 형성한다. 하지만 외란 발생 시, 발전기 고정자 권선 전류의 급격한 변화에 의한 전기적 토크의 진동이 야기되며, 입, 출력 토크의 균형이 깨져 전기자적 결합이 상실된다. 그 결과 축 시스템에 공진 형태의 기계적 토크 응답이 발생하게 된다 [3].

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

- 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 비틀림 모드

터빈 발전기 기계적 축 시스템의 비틀림 모드 (Torsional Mode)는 60Hz 이하의 고유 주파수를 가지는 차동기 비틀림 모드 (Sub-synchronous Torsional Mode)와 60Hz 이상의 고유 주파수를 가지는 초동기 비틀림 모드 (Super-synchronous Torsional Mode) 두 가지로 분류 될 수 있으며, 축 시스템의 물리적인 위치에 따라 각기 다른 비틀림 모드의 토크 응답이 나타난다. 이때 터빈 발전기 축 시스템의 물리적 영역에서 지배적으로 나타나는 비틀림 모드 토크 응답이 다른 이유는 각 영역과 연관된 시스템의 비틀림 모드 주파수, 즉 고유 주파수 대역이 다르기 때문이다.

차동기 비틀림 모드는 축 시스템의 주 회전자 사이 커플링 영역의 비틀림 응답에서 지배적으로 나타나며 평형 고장, 발전기

단자 고장, 발전기 비동기 투입 등에 의한 계통 외란에 의해 주로 야기된다. 이는 상기의 외란이 주로 60Hz 혹은 그 이하의 주파수 값을 가지는 공극 토크를 발생시켜 비틀림 응답을 유발하기 때문이다.

이와 다르게 초동기 비틀림 모드는 터빈 회전자 자체 및 터빈 블레이드 연결 지점 (Blade root)의 비틀림 응답에서 지배적으로 나타난다. 이러한 초동기 비틀림 모드는 불평형 고장과 같은 과도상태 외란뿐만 아니라 정상상태의 부하 불평형, 비연가 선로 조건 등에 의해 야기되며, 이는 상기의 외란이 120Hz 부근의 주파수를 가지는 공극 토크를 발생 시켜 비틀림 응답을 유발하기 때문이다[3].

3. 터빈 발전기 블레이드의 등가화 모델링

3.1 기계-전기적 시스템의 등가화 원리

기계-전기적 시스템의 등가화는 두 시스템을 정의하는 미분방정식의 동일성에 근거하며, 기계적 시스템을 전기적 회로 형태로 등가화 시킨 시스템은 원래의 고유한 운동 특성을 정확히 나타낼 수 있다. 그림 2와 같이 기계-전기적 시스템의 등가성 원리를 이용하여 단일 질량체 회전 시스템을 직, 병렬 RLC 회로의 형태로 등가 표현할 수 있다.

그림 2의 (a)~(c) 시스템의 특성을 서술하는 미분 방정식을 각각 식 (2)~(4)와 같이 정리할 수 있으며, 항의 유사한 형태를 서로 비교하여 대응관계를 살펴보면 표 1과 같이 기계-전기적 시스템 파라미터의 등가관계를 정리할 수 있다[7].

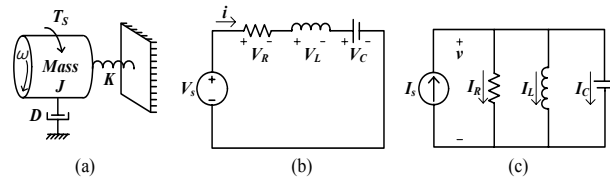


그림 2 기계-전기적 시스템의 등가화 : (a) 단일 질량체 회전 시스템, (b) 직렬 RLC 회로, (c) 병렬 RLC 회로

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

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

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

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

여기서, T_s : 단일 질량체에 인가되는 토크

J, D, K : 관성모멘트, 감쇄계수, 스프링상수

- ω : 단일 질량체의 각속도
- V_s : 전압원 등가모델의 인가 전압원
- V_L, V_R, V_C : 인덕터, 저항, 커패시터 전압
- i : 전압원 등가모델의 전류
- I_s : 전류원 등가모델의 인가 전류원
- I_C, I_R, I_L : 커패시터, 저항, 인덕터 전류
- v : 전류원 등가모델의 전압
- R, L, C, G : 저항, 인덕터, 커패시터, 컨덕턴스

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

3.2 터빈 블레이드의 등가화

터빈 블레이드 영역이 적절히 모델링 되지 않으면 터빈 발전기 축 시스템의 초동기 비틀림 모드를 구현할 수 없다. 따라서 전력계통의 과도현상에 따른 터빈 발전기 축 시스템의 영향을 상세히 평가하기 위해서는 터빈 블레이드 모델링이 필수적이다.

터빈 블레이드 영역을 포함한 터빈 발전기 축 시스템 모델링을 위하여 그림 3과 같이 터빈 블레이드 영역을 그림 1에서 저압 터빈에 블레이드 질량체가 연결된 형태의 응용된 다중 질량체 모델로 간주할 수 있다. 이때, 고압, 중압 터빈 블레이드는 저압 터빈 블레이드 보다 상대적으로 길이가 짧아 모델링에서 생략하였다. 저압 터빈 회전체에 연결된 다수의 터빈 블레이드 열을 통합하여 하나의 질량체로 간주하고 터빈 블레이드와 저압 터빈 회전체를 연결하는 지점을 스프링 모델로 간주하여 최종적으로 터빈 블레이드를 포함한 축 시스템을 간략히 등가화 할 수 있다.

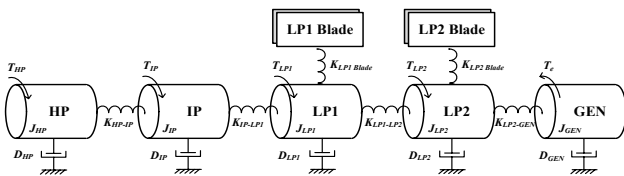


그림 3 터빈 블레이드 영역을 포함한 터빈 발전기 축 시스템 다중 질량체 모델
Fig. 3 Multi-mass model of turbine-generator shaft system including turbine blade section

3.3 터빈 블레이드의 진동 모드

터빈 블레이드의 진동 모드는 표 2와 같이 3가지로 분류되며 그에 따른 터빈 블레이드 모델을 그림 4 과 같이 도식화 할 수 있다. 특히, 굽곡 모드가 터빈 블레이드의 진동 모드 중에서 상대적으로 낮은 공진 주파수를 가지므로 터빈 블레이드의 초동기 대역의 공진 현상을 분석할 때 주로 적용된다[8, 9].

표 2 터빈 블레이드 진동 모드의 종류
Table 2 Types of turbine blade vibration mode

진동 모드	특징
굽곡 모드 Flexural Mode	터빈 회전 방향으로 나타나는 진동
축 모드 Axial Mode	터빈 회전 방향과 수직으로 나타나는 진동
비틀림 모드 Torsional Mode	터빈 회전 방향에서 비틀림으로 나타나는 진동

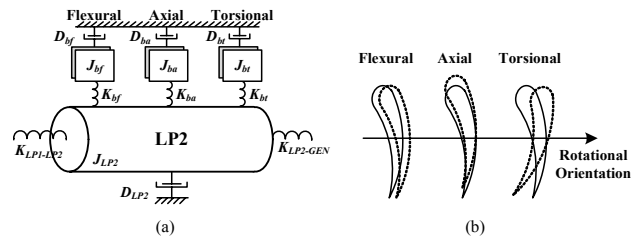


그림 4 (a) 터빈 블레이드 모델, (b) 터빈 블레이드의 진동 모드
Fig. 4 (a) Turbine blade model, (b) Vibration mode

4. EMTP를 이용한 터빈 블레이드 모델링

4.1 터빈 블레이드 모델링 조건

3장의 터빈 블레이드 모델링 원리를 이용하여 본 논문에서는 참고문헌 [10]의 기계적 데이터를 바탕으로 345kV 발전단 계통의 정격과 유사한 터빈 발전기 축 시스템을 모델링하였다. 고려된 터빈 발전기 축 시스템은 그림 5와 같이 크게 고압, 중압, 저압 터빈 질량체, 발전기 회전자로 구성되며 기계적 데이터는 표 3과 같다. 이때 저압 터빈 질량체는 터빈 블레이드의 세부 구조에 따라 전단 블레이드 (Front Blade) 그리고 후단 블레이드 (Rear Blade)로 구분하였다.

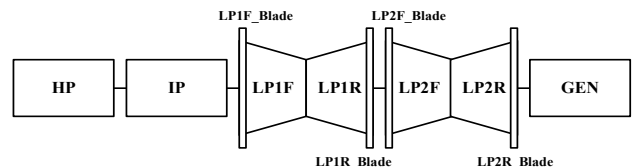


그림 5 345kV 계통 터빈 발전기 축 시스템 모델
Fig. 5 Turbine-generator shaft model in 345kV system

표 3 345kV 계통 터빈 발전기 축 시스템 기계적 데이터
Table 3 Mechanical parameter of turbine-generator shaft model in 345kV system

질량체	관성모멘트 [kg · m ² /rad]	축	스프링상수 [Nm/rad×10 ⁶]
HP	1219.7100	HP-IP	142.8140
IP	5414.3226	IP-LP1F	274.0212
LP1F	7407.5073	LP1F root	1012.3142
LP1F_Blade	2379.9220	LP1F-LP1R	6255.8094
LP1R	7377.7582	LP1R root	1012.3142
LP1R_Blade	2379.9220	LP1R-LP2F	249.7983
LP2F	7437.2563	LP2F root	1012.3142
LP2F_Blade	2379.9220	LP2F-LP2R	6255.8094
LP2R	7377.7582	LP2R root	1012.3142
LP2R_Blade	2379.9220	LP2R-GEN	185.4563
GEN	12658.2102		

4.2 터빈 블레이드 모델링 결과

4.1절의 터빈 블레이드 모델링 조건을 이용하여 그림 6과 같이 EMTP를 바탕으로 터빈 블레이드 영역을 포함한 터빈 발전기 축 시스템을 전류원 등가회로 형태로 모델링 하였다. 터빈 블레이드 질량체의 관성모멘트는 커패시턴스로 등가화 되며 터빈 블레이드 질량체와 터빈 회전체 연결 지점의 스프링상수는 인덕턴스로 등가화 될 수 있다.

전류원 등가회로 형태로 모델링 된 터빈 발전기 축 시스템에서 표 1의 기계-전기적 시스템 파라미터의 등가관계를 이용하여 RLC 소자에 각각 대응되는 기계적 파라미터의 값을 단위 변환하여 입력하였다. 이러한 과정으로 전류원 등가회로 형태로 모델링 된 터빈 발전기 축 시스템의 전기적 특성을 분석하면 원래의 기계적 특성을 정확하게 유추할 수 있다.

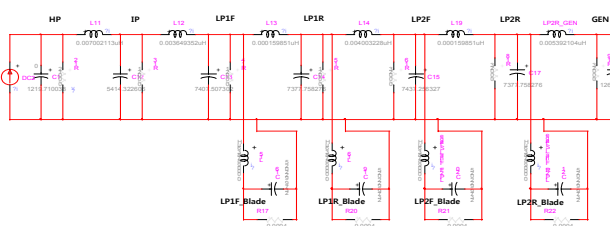


그림 6 EMTP를 이용한 터빈 발전기 축 시스템 전기적 등가모델
Fig. 6 Electrical equivalent model of turbine-generator shaft system using EMTP

4.3 터빈 발전기 축 시스템의 고유 주파수

4.3.1 주파수 스캔

주파수 스캔 (Frequency Scanning)은 시스템의 입력 단자에

일정한 크기, 다양한 주파수 대역의 값을 입력하여 특정 입력 주파수 성분에 대하여 시스템의 각 영역에서 나타나는 반응의 크기를 분석하는 방법이다. 이러한 방법을 터빈 발전기 축 시스템에 적용하면 시뮬레이션을 통하여 직관적이고 간략하게 고유 주파수를 도출할 수 있다. 발전기 회전자를 1 p.u.의 외력이 인가되는 단자로 가정하고 0~140Hz 주파수 대역의 외력이 인가됨에 따라 터빈 발전기 축 시스템의 다양한 영역에서 나타나는 dB 단위의 토크 응답을 분석함으로써 축 시스템의 고유 주파수를 확인할 수 있다.

4.3.2 터빈 발전기 축 시스템의 고유 주파수 도출

모든 기계적 시스템은 고유의 진동수, 즉 고유 주파수를 가지고 있으며 만일 해당 시스템에 고유 진동수와 동일한 주파수를 가진 외력이 가해지면 시스템이 공진 혹은 진동 현상을 겪게 된다. 본 논문에서는 터빈 블레이드 영역을 포함하여 모델링된 터빈 발전기 축 시스템의 고유 주파수를 도출하기 위하여 주파수 스캔 방법을 적용하였다. 저압 터빈 2와 발전기 회전자 축 커플링 (LP2R-GEN), 저압 터빈 2 질량체의 전단, 후단 블레이드 연결 지점 (LP2F_Blade, LP2R_Blade)에서 나타나는 인가 외력의 주파수 성분에 따른 토크 응답을 도식화하면 그림 7과 같다. 이때 토크 응답의 크기가 상대적으로 크게 나타나는 지점의 주파수가 터빈 발전기 축 시스템의 고유 주파수가 되며 도출된 고유 주파수는 표 4와 같다. 즉, 해당 터빈 발전기 축 시스템 모델은 총 8개의 고유 주파수를 가지는 것으로 분석할 수 있다.

LP2R-GEN 축 커플링 부분은 차동기 비틀림 모드의 응답이 상대적으로 초동기 비틀림 모드 보다 더 크게 나타남을 알 수 있다. LP2R_Blade, LP2F_Blade 지점은 차동기 비틀림 모드뿐만 아니라 초동기 비틀림 모드의 응답이 고루 나타남을 확인할 수 있다.

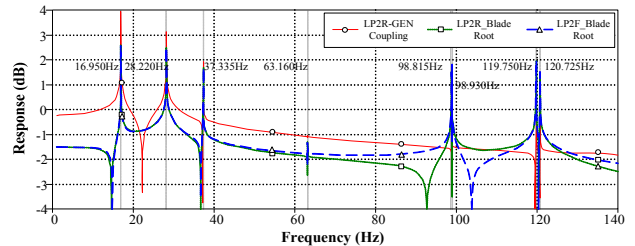


그림 7 터빈 발전기 축 시스템의 주파수 스캔 결과
Fig. 7 Frequency scanning of turbine-generator shaft system

표 4 터빈 발전기 축 시스템의 고유 주파수
Table 4 Natural frequency of turbine-generator shaft system

비틀림 모드	주파수 [Hz]	비틀림 모드	주파수 [Hz]
1	16.950	5	98.815
2	28.220	6	98.930
3	37.335	7	119.750
4	63.160	8	120.725

이처럼 주파수 스캔 방법을 이용하여 터빈 발전기 축 시스템의 위치에 따라 나타나는 기계적 토크의 주파수 응답의 특성이 다름을 확인 하였다. 또한 터빈 블레이드 영역을 포함하여 모델링함으로써 기존의 상용 프로그램에서는 구현될 수 없었던 축 시스템의 초동기 비틀림 모드의 고유 주파수 영역을 구현 할 수 있음을 확인하였다.

5. 터빈 발전기 축 시스템 기계적 토크 응답

5.1 시뮬레이션 조건

터빈 발전기 축 시스템의 모델링을 검증하고 기계적 토크 응답 특성을 분석하기 위하여 그림 8과 같이 345kV 발전단 계통을 구성하였다. 터빈 발전기의 기계적 시스템은 4장에서 설명한 내용과 같이 구성되며 발전기 정격 및 전기적 파라미터는 표 5와 같다.

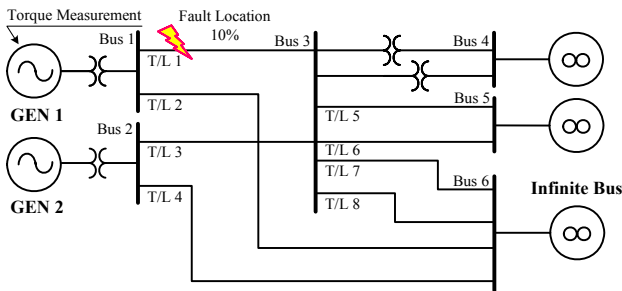


그림 8 345kV 발전단 시뮬레이션 계통

Fig. 8 345kV transmission system for simulation

표 5 345kV 계통 발전기 정격 및 전기적 파라미터

Table 5 345kV system generating rating and electrical parameters

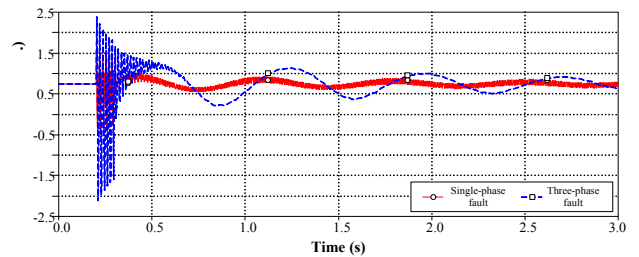
정격	612MVA, 22kV, 2극	
리액턴스 (p.u.)	$R_a = 0.0010$	$X_o = 0.1250$
	$X_L = 0.1500$	$X_q = 1.4578$
	$X_d = 2.1957$	$X'_q = 0.2920$
	$X'_d = 0.2600$	$X''_q = 0.2030$
	$X''_d = 0.2030$	
시정수 (s)	$T'_{do} = 7.9000$	$T'_{qo} = 0.5000$
	$T''_{do} = 0.0430$	$T''_{qo} = 0.0730$

전력계통 외란에 따른 축 시스템의 기계적 토크 응답을 확인하기 위하여 T/L 1의 10% 지점에서 A상 단상, 3상 고장을 각각 모의하였다. 고장 발생 시간은 0.2초, 고장 제거 시간은 0.3초를 가정하였으며 현행 국내 345kV 계통의 차단기 운영 방식을 반영하여 단상 고장의 경우 차단기 단상(single pole) 동작, 3상 고장의 경우 차단기 3상(triple pole) 일괄 동작을 고려하였다. 이러한 고장 발생, 제거 과정에서 나타나는 GEN1의 LP2R-GEN, LP2R_Blade, LP2F_Blade 에서의 기계적 응답을 확인하였다.

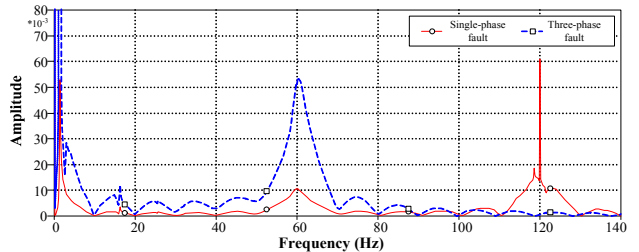
5.2 터빈 발전기 축 시스템 기계적 토크 응답 분석

5.2.1 계통 외란에 따른 발전기 전기적 토크 변화

계통 고장에 따른 발전기 전기적 토크의 변화는 그림 9와 같이 확인할 수 있다. 전기적 토크의 순시 파형에서 볼 수 있듯이 고장 정도가 심해질수록 공극 토크의 더 큰 변화가 야기됨을 알 수 있다. A상 단상, 3상 고장 및 수반되는 다른 차단기 스위칭 동작에 의하여 다양한 주파수 성분의 전기적 토크 성분이 야기된다. A상 단상 고장의 경우 A상만 트립되어 계통 불평형이 발생하기 때문에 역상분 전류에 의한 120Hz 성분의 공극 토크가 크게 발생함을 알 수 있다. 3상 고장의 경우 3상이 일괄 트립됨에 따라 120Hz 성분의 공극 토크는 야기되지 않는다.



(a) 전기적 토크의 순시 파형



(b) 전기적 토크의 주파수 성분

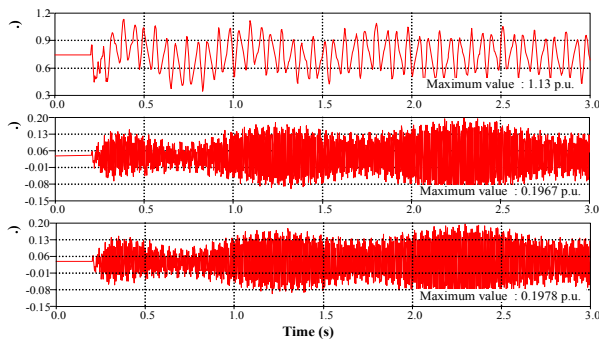
그림 9 계통 고장에 따른 전기적 토크

Fig. 9 Generator electrical torque due to system faults

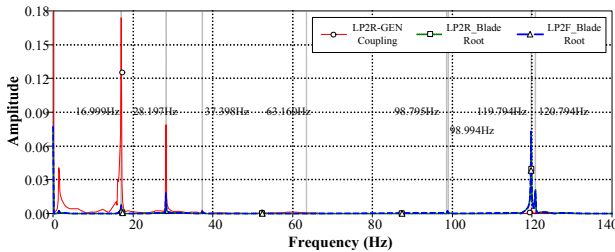
5.2.2 단상 고장에 대한 축 시스템 기계적 토크 응답

단상 고장에 의하여 축 시스템 LP2R-GEN, LP2R_Blade, LP2F_Blade 영역에서 나타나는 기계적 토크 응답은 그림 10과 같다. 주파수 성분 분석에서 확인할 수 있듯이 터빈 발전기 축 시스템의 토크 응답은 고유 주파수 성분으로 구성되어 있으며, 이는 전기적 토크의 진동이 축 시스템 모드 주파수와와의 공진을 야기하였음을 보여주는 결과이다.

단상 고장의 경우 LP2R-GEN 축 커플링 영역에서는 차동기 비틀림 모드에 의한 영향이 우세하게 나타나고 LP2R_Blade, LP2F_Blade 영역에서는 차단기 단상 동작에 의한 역상분 전류의 영향으로 120Hz 성분의 공극 토크가 야기되어 축 시스템의 초동기 비틀림 모드 응답이 나타남을 확인할 수 있다.



(a) 토크 응답의 순시 파형



(b) 토크 응답의 주파수 성분

그림 10 단상 고장에 따른 축 시스템의 기계적 토크 응답

Fig. 10 Shaft system torque response due to single-phase fault

5.2.3 3상 고장에 대한 축 시스템 기계적 토크 응답

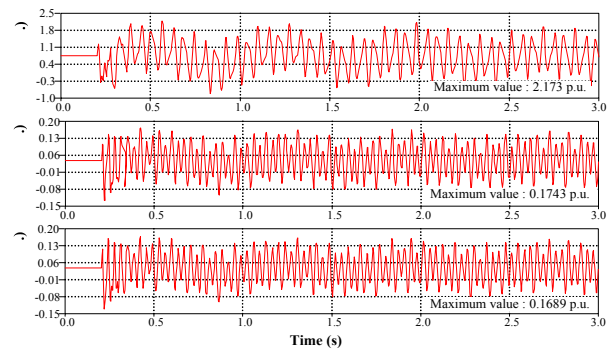
3상 고장에 의하여 축 시스템 LP2R-GEN, LP2R_Blade, LP2F_Blade 영역에서 나타나는 기계적 토크 응답은 그림 11과 같다. 3상 고장의 경우 단상 고장 보다 큰 정상분 고장전류에 의한 공극의 토크 진동이 야기된다. 따라서 상대적으로 더 큰 LP2R-GEN 기계적 토크 응답이 차동기 비틀림 모드 영역에서 나타나게 된다.

또한 3상 고장의 경우 국내 345kV 계통에서 3상 일괄 차단방식이 적용되므로 역상분 전류가 나타나지 않는다. 따라서 공극 토크의 120Hz 성분이 존재하지 않으므로 축 시스템의 차동기 비틀림 모드 응답이 나타나지 않게 되어 LP2R_Blade, LP2F_Blade 토크 응답의 크기는 단상 고장의 경우보다 상대적으로 더 작게 나타나게 됨을 확인할 수 있다.

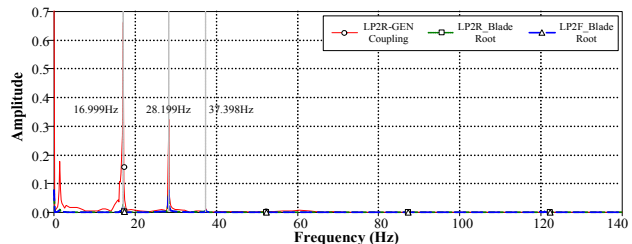
상기와 같이 A상 단상, 3상 고장에 대하여 각각의 축 시스템 영역이 나타내는 기계적 토크 응답을 분석하였고 그 결과 터빈 블레이드를 포함한 축 시스템의 모델링이 적절히 수행되었음을 확인 하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 기계-전기적 시스템 등가원리를 이용하여 터빈 블레이드 포함한 터빈 발전기 축 시스템을 모델링 할 수 있음을 보였다. 이를 통하여 기존의 상용 프로그램에서는 터빈 블레이드



(a) 토크 응답의 순시 파형



(b) 토크 응답의 주파수 성분

그림 11 3상 고장에 따른 축 시스템의 기계적 토크 응답

Fig. 11 Shaft system torque response due to three-phase fault

영역을 고려하지 않아 축 시스템의 차동기 비틀림 모드의 토크 응답을 구현하지 못하는 제한을 해결하였다. 또한 345kV 계통에서 A상 단상, 3상 고장을 모의하여 야기되는 축 시스템의 기계적 토크 응답을 확인함으로써 터빈 블레이드 영역을 포함한 터빈 발전기 축 시스템이 적절히 모델링되었음을 검증하고 축 시스템 각 영역에서의 토크 응답 특성을 분석하였다.

상세한 터빈 발전기 축 시스템 모델링을 바탕으로 향후 불평형 고장, 계통 불평형, 기기 의존형 차동기 진동(Device Dependent Subsynchronous Oscillation)과 같은 다양한 계통 영향요인에 의한 터빈 발전기 축 시스템의 기계적 토크 응답을 분석할 수 있을 것이며 다방면에 걸친 저감 대책 개발에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

“이 논문은 2015년도 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] J. Stein, P. Zayicek, "Steam Turbine-Generator Torsional Vibration Interaction with the Electrical Network," EPRI, Palo Alto, CA, Rep. 1011679, Nov. 2005.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] T.P. Tsao and C.H. Lin, "Long term effect of power system unbalance on the corrosion fatigue life expenditure of low pressure turbine blades", IET Proc.-Sci. Meas. Technol., vol. 147, No. 5, pp. 229-236, 2000.
- [9] C.H. Lin and T.P. Tsao, "Suppress vibration on turbine blades by high-temperature super- conductive fault current limiter", IET Gener. Transm. Distrib, vol. 148, pp. 97-103, 2001.
- [10] T.P. Tsao and C. Chyn "Restriction of turbine blade vibrations in turbogenerators", IET Proceedings, vol. 137, No. 5, pp. 339-342, 1990.

저 자 소 개



박 지 경 (Ji-Kyung Park)

1985년 5월 16일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2012년~현재 성균관대 정보통신대학 석박사통합과정
Tel : 031-290-7166
Fax : 031-299-4137
E-mail : dclover@skku.edu



정 세 진 (Se-Jin Chung)

1990년 12월 17일생. 2013년 가천대학교 전기소방공학부 졸업. 2013년~현재 성균관대 정보통신대학 석박사통합과정
Tel : 031-290-7166
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(공학). 현재 성균관대 정보통신대학 교수, 전력IT인력양성센터 센터장
Tel : 031-290-7124
Fax : 031-299-4137
E-mail : hmwkim@hanmail.net