전력망에 연결된 디젤 발전기 세트의 비틀림 진동에 대한 기초 연구

The Fundamental Study for Torsional Vibration of Diesel Generator Set connected Electric Power Grids

김효정*·윤현우**·로날드 디 바로***·이돈출†

Hyujung Kim, Hyunwoo Yun, Ronald D. Barro and Donchool Lee

Key Words : Diesel generator set (디젤 발전기 세트), Electric power grid (전력망), Torsional vibration (비틀림 진동)

ABSTRACT

A Shipboard power system consists of three or four diesel generator sets connected to a grid. In case of dual fuel diesel generator sets employed LNG ship as a prime mover, large amounts of electricity are required for electric propulsion, auxiliary machinery and accommodation facilities. The electrical connection between generators through a network, torsional vibration can lead power swings.

In this paper, the influence on the network by the torsional vibration of diesel generator sets in grid operation were studied. The torsional vibration characteristics were investigated and analyzed through theoretical analysis and the vibration measurement and the results were presented.

1. 서 론

선박에서 발전시스템은 통상 3~4개의 디젤 발전기 세트로 구성되며 선내에서 소규모의 전력망을 구축하게 된다. LNG선박과 함께 이원 연료(Dual fuel) 엔진을 원동기로 한 발전기 세트는 전기 추진 시스템을 주축으로 선내 거주 및 보조기계를 위한 30 MW 이상의 대용량 전력이 필요하다. 또한 대형 컨테이너선을 중심으로 증가되는 냉동 컨테이너화물을 운용하기 위하여 보조 발전용량도 10 MW이상으로 설계 건조되고 있다. 선박에서 이러한 대용량의 발전시스템은 선박 운항 시 자체 전력망 내에 연결되어 부하 특성에 따라 서로 유기적인 역할을 하며, 이중 비틀림 진동은 출력 변동(Power swing)의 원인을 제공하게 된다.

본 논문에서 이러한 디젤 발전기가 선내 자체 전력망에 연결될 때 비틀림 진동에 의해서 전력망에 미칠 수 있는 영향을 연구하고자 한다. 그리고 173, 000 CBM LNG 선박에 적용된 12V50DF 발전기 세트(11.4 MW)를 모델로 선정하여 이론적인 해석과 계측결과를 중심으로 검토하였다.

† 이돈출 ; 정회원, 목포해양대학교 기관시스템공학부
E-mail : ldcvib@mmu.ac.kr
Tel : 061-240-7219, Fax : 061-240-7201
* 바르질라-현대엔진
** 선박안전기술공단
*** 목포해양대학교 실습선

2. 전력망에 연결된 디젤 발전기의 비틀림 진동 특성

디젤 발전기 또는 하나의 단위 발전시스템은 차상위 전력망에 연결되며 국가와 같이 거대한 전력망이라고 가정하면 Fig. 1과 같이 무한한 전력망에 연결된다고 볼 수 있다. Fig. 2는 발전기가 무한한 전력망에 강성과 감쇠를 갖고 연결된 디젤발전기의 비틀림 진동을 모델링한 것이며, 여기서 $\triangle T$는 토크

변동으로 즉 출력변동을 의미한다.(1)

그러나 선박과 같이 제한된 소규모 전력망의 경우 자체 내 몇 개의 발전기로 구성되며 이를 구성하는 시스템을 Fig. 3에 보인다. 그리고 여기서 $\triangle T_1$, $\triangle T_2$, $\triangle T_3$, $\triangle T_n$은 디젤발전기에서 발생하는 각각의 토크변동을 의미하며, 이는 발전기와 네트워크 사이에 연결된 강성과 감쇠를 통해서 출력변동인 $\triangle P_1$, $\triangle P_2$, $\triangle P_3$, $\triangle P_n$가 발생되며, 이들은 통합된 네트워크에서 출력변동으로 작용하게 된다.

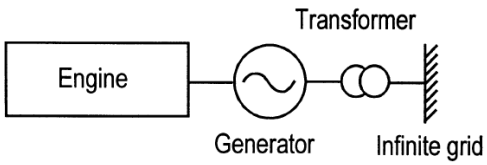

Fig. 1 Schematic arrangement for diesel generator

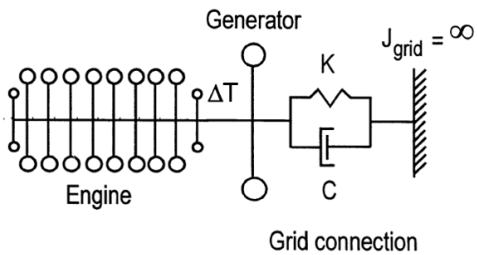

Fig. 2 Equivalent mass-elastic model

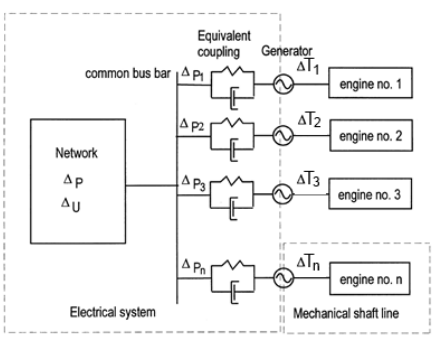

Fig. 3 Schematic diagram of the complete vibration system for the power swing calculation

3. 사례 연구

사례연구 모델인 12V50DF엔진의 전체적인 모습은 Fig. 4에, 주요 요목은 Table 1과 같다. 이 엔진은 실린더 직경이 500 mm로 대구경이고 동기회전수는 514r.p.m.이다. 그리고 크랭크축과 발전기축 사이는 Table 1에 언급한 Vulkan사의 탄성커플링이 강성을 낮추기 위하여 직렬 2단으로 연결되어 있다. 발전기가 전력망에 연결되지 않은 단독운전 상태를 편의상 Mode 1 그리고 두 개의 발전기와 전력망으로 연결된 운전 상태를 Mode 2라고 하면 비틀림 진동의 고유진동수 계산결과는 Table 2와 같다. 여기서 Mode 1의 1절 진동인 190.0 c.p.m.은 Mode 2에서 1절 진동인 147.1 c.p.m.과 2절 진동인 284.8 c.p.m으로 서로 나누어져 있다. 실제 이론적인 계산과 실제 운전 중에 이 진동모드의 0.5차 및 1차 진동에 의해서 전체 계에 영향을 미치므로 설계 시 유의해야 한다. 강제진동해석으로 한 실린더 착화실패, 무 부하 및 운전 Mode 1에서 탄성커플링에 걸리는 진동토크를 Fig. 5에 보인다. Fig. 6은 한 실린더 착화실패, 전(Full) 부하 및 운전 Mode 2 상태에서 전력망과 발전기사이에서 발생하는 진동토크다. 그리고 이 토크 변동에서 각속도만 곱할 경우 출력 변동 값이 되며 이 값은 비교적 큰 편이다. 비틀림 진동 계측은 Fig. 7과 같이 배치를 하였으며 무 부하 시 탄성커플링의 엔진 쪽에서 계측한 각속도 변동 값을 Fig. 8과 Fig. 9에 보인다. 우선 Fig. 8에서 주 진동은 0.5차가 주이며 0.5차만을 분석한 결과는 Fig. 9과 Fig.10에 각각 보이며 이론적으로 해석한 고유진동수와 거의 일치한다. Fig. 11은 부하 시 비틀림 진동을 계측한 결과로 부하가 증가할수록 1차와 4.5차가 증가하였다. 한 실린더 착화실패에 대한 실험은 현장 여건이 어려워 수행하지 못하였다.

Table 1 Specification of the generator set

Flexible coupling	Type	Vulkan G5620
	M.O.I(total)	979 kg·m^2
	Diameter×Width	1,710 × 1,064 mm
	Torsional stiffness	1,400 kN·m/s
	Weight	3,130 kg
Engine	Type	12V50DF(V Type)
	Cyl.bore×stroke	500×580 mm
	Power at MCR	11,400 kW×514 r.p.m.
	Reciprocating mass	535.7 kg/cyl.
	Firing order	1-5-3-6-2-4 with A, B bank firing interval 45°
	Conn. ratio(r/l)	0.364
	Crankshaft diameter	450 mm
	No. of cylinder	12 ea
	Weight(dry)	188 ton
Generator	Type	B225X14
	No. of poles	14 ea
	Idling speed	480 r.p.m.
	Dia of rotor/shaft	1,812/315 mm
	Weight of rotor	25.33 ton
	Length of spider	1,350 mm
	M.O.I for rotor	9101 kg·m^2

Table 2 Natural frequencies for torsional vibration (Unit : cycles/min(or c.p.m.))

Node	Mode 1	Mode 2	Remarks
1st	190.9	147.1	
2nd	1263.5	284.8	
3rd	2560.9	1263.7	
4th	3172.3	2560.9	
5th	4907.3	3712.6	

Fig. 4 Overview for 12V50DF engine

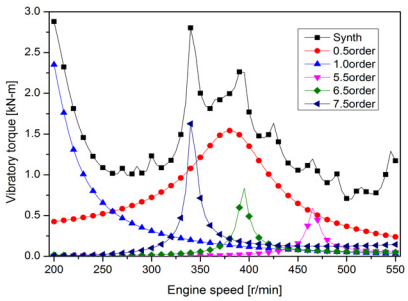

Fig. 5 Vibratory torque of flexible coupling at Mode 1

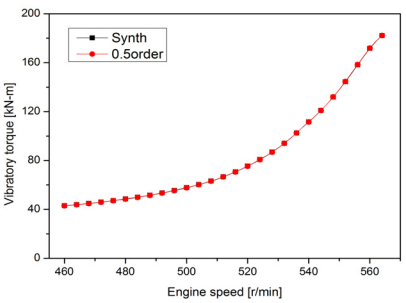

Fig. 6 Vibratory torque between generator and network at Mode 2

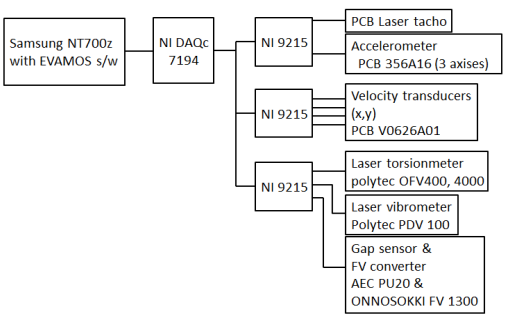

Fig. 7 Equipment arrangement for vibration measurement

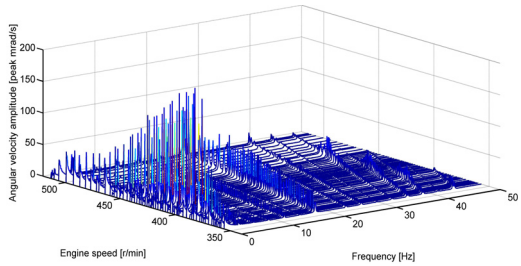

Fig. 8 Measured angular velocity amplitude at engine side of flexible coupling

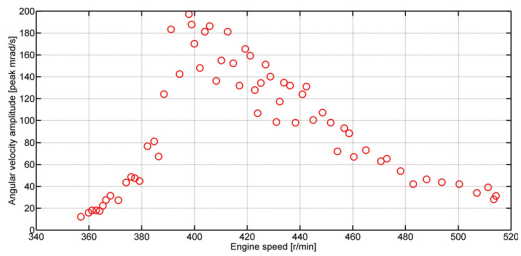

Fig. 9 Measured 0.5th angular velocity amplitude at engine side of flexible coupling

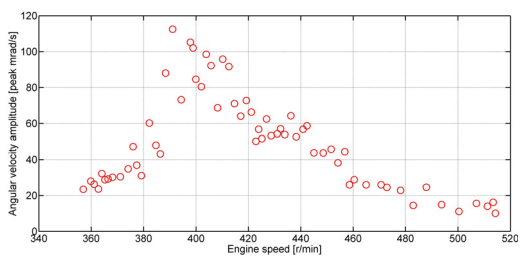

Fig. 10 Measured 0.5th angular velocity amplitude without load at generator side of flexible coupling

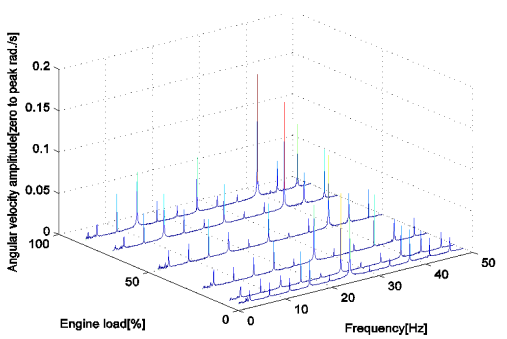

Fig. 11 Measured angular velocity amplitude of engine side of flexible coupling at synchronized speed (514 r.p.m)

4. 결 론

본 연구에서는 12V50DF을 원동기로 한 디젤 발전기를 사례 모델로 디젤발전기가 전력망에 연결된 경우의 비틀림 진동의 특성을 검토하기 위하여 이론해석 및 진동 계측을 통해서 확인하였으며 이를 정리 요약하면 다음과 같다.

(1) 디젤 발전기가 전력망에 연결되고 엔진에 부하가 걸리게 되면 그리드와 발전기 사이에 강성과 감쇠력이 작용하여 강체모드의 진동이 일어나며 동시에 고유진동수도 변하게 된다. 이러한 변화는 디젤엔진에 비해 발전기의 관성모멘트가 상대적으로 적고 회전수가 높은 4행정 디젤엔진에서 크므로 설계 시 이를 충분히 검토하여야 한다.

(2) 디젤엔진 운전 시 실린더간의 불균등한 부하는 피할 수 없으며 4행정 디젤엔진에서 0.5차와 1차 성분이 비교적 크다. 이는 발전기 출력변동에 민감하며 이를 피하기 위하여 발전기 동기회전수를 중심으로 비틀림 진동의 주 진동차수의 공진점을 피하는 것이 바람직하다.

(3) 디젤엔진과 발전기 사이에 탄성커플링이 연결될 경우 탄성커플링의 동 특성에 따라 출력 변동에 영향력이 큰 0.5차 또는 1차 비틀림 진동의 영향을 받게 된다. 따라서 비틀림 진동을 제어하기 수단으로 설계과정에서 탄성커플링 선정의 중요함을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) J. Jenzer, “Dynamic aspects in diesel power plants withtwo-stroke diesel engines”, 1999, Wartsila NSD corporation.

(2) A Kikuchi, H Makuta and S Yoshinara, “Vibration analysis of a diesel engine crankshaft system considering coupling effects of torsional and axial modes”, 1995, Yokohama Reserch Institute and Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

(3) Troy Feese and Charles Hill, “Prevention of torsional vibration problems in reciprocating machinery”, Engineering dynamics incorporated San Antonio, Texas.

(4) Erik sandberg and Paul martin, “Torsional dynamics in marine propulsion systems with nonlinear flexible couplings and influence of speed governors”, 1985, Det norske veritas, Oslo, Norway.