

EMTP를 이용한 디젤발전시스템 Harmonic Torque의 계통영향 평가

°김수남 정문구 백병산 김익모
현대중공업

Assessment of the Influence on Harmonic Torque in Diesel Generating System by using EMTP

Soo-Nam Kim Moon-Goo Jung Byung-San Baek IK-Mo Kim
Hyundai Heavy Industries Co., LTD

Abstract - This paper presents method of the assessment on the Influence of harmonic torque in diesel generating system by using EMTP (Electromagnetic Transient Program). The objectives is to analysis the influence on power oscillation and voltage fluctuation due to the periodically varying torque developed by the new diesel generator to be installed in existing power system.

1. 서 론

전력수요가 급격히 증가함에도 불구하고 대규모 발전원은 지역적, 환경적 제약으로 건설에 어려움을 겪고 있다. 또한, 기존의 발전원은 부하와 지역적으로 떨어져 있어 송전손실과 전력수급의 불균형을 초래하고 있다. 이에 최근 분산발전이 그 대책으로 각광을 받고 있으며 디젤발전과 같이 중·소규모로 소비지에 설치 가능한 전원 도입이 요구되고 있다. 디젤발전시스템은 비상발전기의 역할과 대체에너지와 hybrid 형태로의 사용 등 그 활용도가 다양해지고 있는 추세이다.

그러나 분산전원이 설치되어서는 배전계통은 부하와 전원이 혼재되어 있어 계통연계시 충분한 검토와 사전 준비가 필요하다. 특히, 디젤발전시스템은 연료의 misfiring과 엔진의 pulsation으로 인해 harmonic torque를 내재하고 있다. 발전기의 입력으로 harmonic torque가 유입되면 전력동요와 전압변동의 문제가 발생하고 이는 flicker와 고조파 문제 등 전력품질의 문제를 발생시킨다. 따라서 디젤발전시스템을 계통연계시 사전에 설치하고자 하는 지역의 계통조건과 디젤발전기의 특성을 적절히 모의하고 평가하는 기술이 요구되고 있다[1,2].

본 논문은 EMTP를 이용하여 디젤발전시스템의 harmonic torque를 모의하고 전력동요 및 전압변동을 평가하는 방법을 제시한다[3].

2. 본 론

2.1 Harmonic Torque in Diesel Generation

디젤 엔진의 특성상 엔진을 구동시키는 힘은 가스 폭발력에 의존하고 있다. 실린더의 왕복운동이 회전운동으로 변환되는 과정에서 일정한 토크를 발생시키기 위해 각 실린더는 일정한 간격으로 위상차를 갖는다. 또한, crankshaft에 적절한 flywheel을 부차하여 토크의 관성을 유지하도록 되어있다. 그러나 원천적인 엔진의 pulsation 특성과 연료의 misfiring에 의한 손실은 그대로 회전운동에 전달되어 일정한 토크가 아닌 harmonic 토크를 발생시킨다. 디젤발전시스템에서 harmonic torque는 엔진의 각 실린더에서 가스 폭발력을 실린더 crank 각도에 따라 vector 합을 취해 구해될 수 있다.

발전시스템이 기계적 입력으로 디젤엔진의 구동력을 이용한다면 출력은 일정 전력이 아닌 어느 정도 oscillation을 갖는 전력을 생산하게 된다. 그림 1에서와 같이 계통에 디젤발전이 연계되었을 경우 해당 모선과 혹은 주변 부하선로에 영향을 주게 된다.

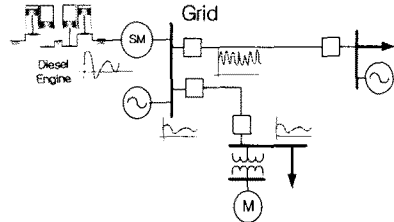


그림 1 디젤발전이 연계된 계통의 전력동요

그림 2는 각각의 실린더에서의 벡터합으로 표현된 디젤발전기 토크의 예를 보여준다.

Engine speed:	107.1 RPM								
Engine power:	30316 kW								
Mean torque (T0):	2720. kNm								
Cyl no.	Area	Stroke	Control	M(Crank)	Firing	Harmon	P1		
1	800	2.300	2.920	13908	120.00	243532	4.40		
2	800	2.500	2.920	13908	240.00	243532	14.70		
3	800	2.300	2.920	13908	360.00	243532	14.70		
4	800	2.100	2.920	13908	280.00	243532	14.70		
5	800	2.300	2.920	13908	160.00	243532	14.70		
6	800	2.300	2.920	13908	40.00	243532	14.70		
7	800	2.300	2.920	13908	80.00	243532	14.70		
8	800	2.300	2.920	13908	300.00	243532	14.70		
9	800	2.300	2.920	13908	340.00	243532	14.70		
Firing order: RRRLLRR									
	1	6	7	3	5	8	2	4	9
Torque Order(n)	Cosine component	Sine component	Magnitude	Phase					
1	-329.	-528.	621.	212.04					
2	-19.	-587.	597.	181.89					
3	78.	-458.	476.	159.46					
4	99.	-298.	312.	161.51					
5	117.	-188.	221.	148.14					
6	94.	-104.	140.	134.04					
7	76.	-63.	98.	129.75					
8	61.	-28.	69.	112.64					
9	339.	240.	413.	24.69					
10	33.	2.	31.	85.40					

그림 2 디젤발전기의 Harmonic Torque 특성예

디젤 엔진에서 발생하는 토크의 총합은 식(1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$T = T_0 + \sum_{n=1}^n T_n \sin(n \times \alpha + \phi_n) \quad (1)$$

ϕ_n : phase angle in mechanical degree

α : crankshaft angle in mechanical degree

T_0 : mean torque in kNm

2.2 Power Oscillation Assessment

Harmonic torque에 의한 발전기 출력의 전력동요 ΔP 는 발전기 정격에 대하여 $\pm\%$ 값으로 구한다. 따라서 전력동요 평가를 위해 사전에 적절한 부하설정에 대하여 일정 토크입력을 사용하여 조류계산 결과를 이용한다. 식(2)는 본 논문에서 사용한 전력편차 계산식이다.

$$\Delta P = \frac{|\pm P_{peak} - P_{rated}|}{P_{rated}} \times 100 [\%] \quad (2)$$

2.3 Voltage Fluctuation Assessment

Flicker를 발생시키는 전압변동은 IEC등 국제 규격에

서 제공하는 "Flicker Curve"를 참조하여 그 허용치를 규정한다. 그림 3은 IEEE 141에서 제공하는 flicker curve를 나타낸다. 예를 들어, 1% 전압변동으로 분당 30번 깜빡인다면 visibility정도이고 50번정도 흔들린다면 irritation을 느끼게 된다. 따라서 harmonic torque에 의해 발생한 전압변동의 크기와 주파수를 평가하여 flicker 효과를 분석한다. 전압변동의 크기는 식 (3)과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\Delta V = \frac{V_{peak-peak}}{V_{busbar}} \times 100 [\%] \quad (3)$$

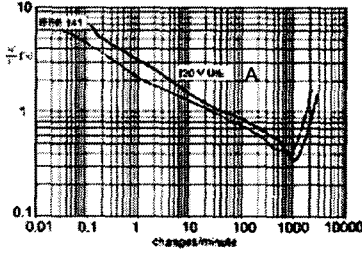


그림 3 Flicker curve

2.4 사례연구

2.4.1. Test system

EMTP를 이용하여 그림 4와 같은 계통에 적용하였다. 사용된 동기발전기 data는 표1과 같고 계통 data는 Benchmark case DC-53(DC53.dat)을 이용하였다. 그림에서 DGB모선에 표 2와 같은 harmonic torque를 갖는 디젤발전시스템이 가동될 경우 저압측 모선에 전력동요와 전압변동을 알아본다.

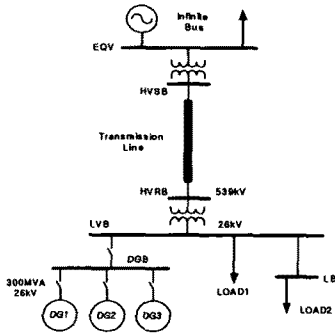


그림 4 Test system

표 1 Synchronous Machine Parameter (pu)

Machine Electrical Parameter (pu)			
X_1	0.13	X_0	1.71
X_0	0.13	X_d'	0.228
R_a	-	X_q'	0.20029
X_d	179	T_{d0}	4.3[sec]
X_d'	0.169	T_{d0}'	0.32[sec]
X_d''	0.13504	T_{d0}''	0.85[sec]
		T_{d0}'''	0.05[sec]

2.4.2 Harmonic Torque Modelling

EMTP상에서 식(1)을 TACS를 이용하여 계산하고 계산한 torque를 발전기 기계적 입력으로 설정한다. 다음의 그림 5는 표2의 평균토크와 harmonic torque를 이용하여 모의된 해당발전기에 입력토크를 보여준다.

표 2 Harmonic Torque Component(T_0 2.58 pu)

Harmonic order	Torque Amplitude (pu)	Frequency (Hz)	Phase Shift Angle (Degree)
N=1	0.062	1.79	0.0
N=2	0.004	3.57	-45.9
N=3	0.014	5.36	-77.8

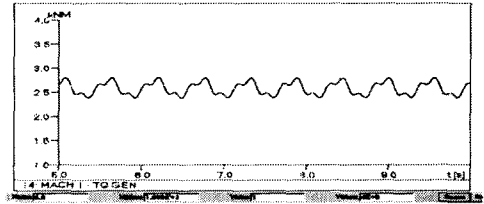


그림 5 Synchronous Machine Torque

2.4.3. Power Oscillation Simulation

그림 6은 모의 계통에서 일정한 토크를 입력 하였을 때와 harmonic이 포함된 토크를 입력 하였을 때 DGB 모선에서 발전기외부로 출력되는 전력의 편차를 보여준다. 식(2)를 이용하여 계산한 결과 6%의 동요를 갖고 있음을 알 수 있다.

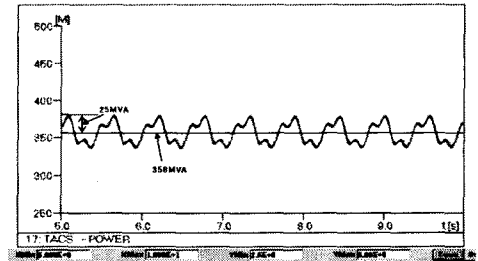


그림 6 Power oscillation

2.4.4 Voltage Fluctuation Simulation

디젤발전의 출력전압의 변동에 대한 모의결과를 그림 7이 보여준다. 여기서 전압은 rms 값으로 식(3)에 의하면 전압변동의 크기는 2.6%이며 harmonic torque의 기본 주파수가 1.79Hz이므로 그림 3의 flicker curve에서 점 A에 해당한다. 이는 전압변동의 값이 irritation을 넘어서 심각한 flicker를 발생시킬 수 있다는 것을 설명한다.

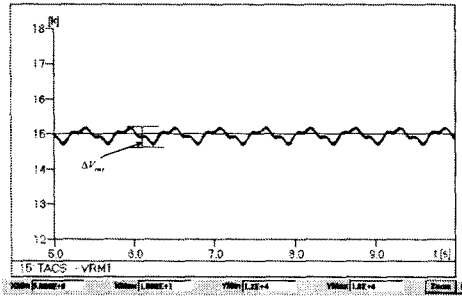


그림 7 Voltage Fluctuation

2.4.5 Diesel generating with parallel

같은 모선에서 여러 대의 디젤발전을 연계하였을 경우 계통의 영향을 최소화 하는 디젤엔진의 초기위상각을 설정하고자 한다. 표3과 같이 3기의 디젤 발전의 경우 각각 초기위상각 설정에 차이를 두어 모의하였다. 모선 DGB의 전력동요와 디젤발전근처 부하모선인 LB의 전압변동을 검토한다. 그림 8은 평균토크를 1.0으로 하였을 때 case5의 경우처럼 각 디젤엔진이 90°의 차이를 가지고 있을 때의 입력토크를 나타낸다.

표 3 디젤 엔진의 초기 위상각 조건에 따른 전력동요

Case No.	Torque Initial Angle (Degree)			Power Oscillation DGB (%)	Voltage Fluctuation LB (%)
	DG1	DG2	DG3		
Case1	0	0	0	11.9	2.5
Case2	0	0	90	7.1	1.6
Case3	0	90	90	8.3	1.0
Case4	0	0	180	3.5	1.1
Case5	0	90	180	3.5	0.7
Case6	0	180	180	3.5	1.1

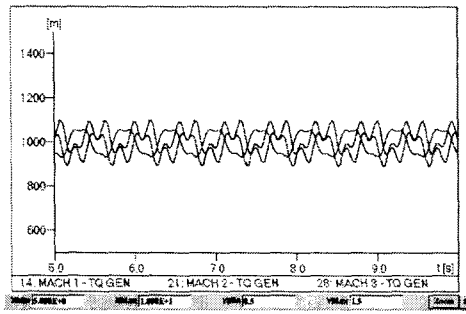


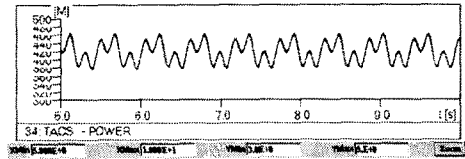
그림 8 90° 차이를 갖는 디젤엔진의 토크

그림 9의 (a)와 (b)는 모선 DGB의 전력동요로서 각각 case1과 case5의 경우이다. (c)와 (d)는 모선 LB의 전압변동에 대해 case1과 case5의 경우를 나타낸다.

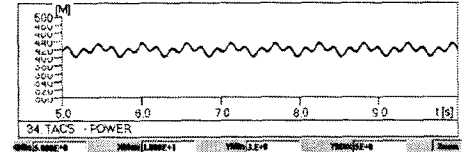
모의 결과 case5와 같이 서로 다른 초기위상각으로 운전하는 것이 계통 전체의 영향을 최소화 하는 것을 알 수 있다.

그러므로, 여러 대의 디젤발전기를 운용하게 될 경우

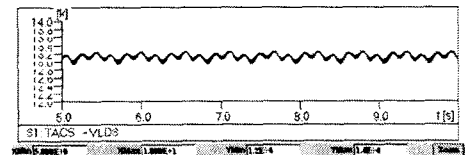
디젤엔진 토크의 초기 위상각을 각기 달리하여야 계통의 동요를 최소화 할 수 있다는 것을 보여준다.



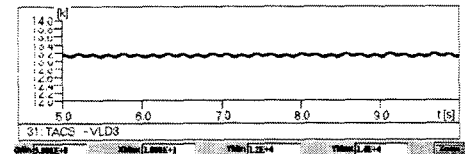
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 9 Voltage Fluctuation and power oscillation

3. 결 론

본 논문은 디젤발전시스템의 harmonic torque를 모의하고 전력동요 및 전압변동을 평가하는 방법을 제시하였다. 또한, 여러 대의 디젤발전이 동시에 운전될 경우 harmonic torque의 위상각을 달리하여 모의함으로써 발생할 수 있는 최대 전력동요와 전압변동을 평가하는 기법을 제시하였다. EMTPT의 TACS를 사용하여 대상 계통과 디젤발전기의 토크를 구현하고 다양한 계통조건에 대하여 모의함으로써 제안된 방법의 효용성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] A. A. Fouad, Vijay Vittal, "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method", Prentice-Hall, 1992.
 [2] P. M Anderson and M. Mirheydar, "Analysis of a Diesel-Engine Driven Generating Unit and the Possibility for Voltage Flicker", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 1, March 1995.
 [3] I. D. Hassan, R. Weronick, R.M. Bucci and W. Bush, "Evaluating the Transient Performance of Standby Diesel-Generator Units by Simulation", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7, No. 3, September 1992.