한국형 다중추진시스템의 AC/DC 컨버터 설계

성호경*, 조정민*, 정병수**, 조흥제*, 김수용*, 김봉섭*
한국기계연구원*, 충남대학교**

AC/DC Converter Design of The korean type Multi-Propulsion System

H.K. Sung*, J.M. Jho*, B.S. Jeong**, H.J. Jo*, S.Y. Kim*
KIMM*, Chung-Nam Univ.**

Abstract -This paper presents a model and simulation for the korean type multi-propulsion system consisting of a gas turbine driven synchronous alternator coupled to a rectifier and dc-to-dc converter. The simulation modules include turbine system, alternator and rectifier, dc-to-dc converter, power management module. A modular, system level simulation of the propulsion system prototype is presented in order to confirm stability for loads with uncertain input impedances and uncertain control loop speeds.

1. 서 론

동북아 지역의 대륙철도·고속철도시장을 고려할 때 기존의 시베리아 철도의 구간별 전압 변화 및 북한의 열악한 철도 수송시스템 Infra 개선을 위한 기술적 문제점을 극복하며 저 비용에 의한 기존 철도 수송 능력 향상을 위해 다중추진시스템 개발이 필요하게 되었다[1].

다중추진시스템은 가스터빈에 의해 구동되는 동기발전기와 4개의 유도모터를 구동하는 V/F 인버터, 그리고 유도모터와 커플링된 플라이휠 에너지 저장시스템으로 구성되어져 있다. 여기에서 터보 교류발전기와 플라이휠 에너지저장시스템은 응답 및 연료효율을 개선하도록 전력을 공유한다.

이러한 복합전력시스템의 개발은 부대설비와 제어기 디자인 그리고, 차후 빠른 원형개발 및 시험을 돕기 위해서 시뮬레이션에 많은 의존을 한다. 본 논문은 가스터빈발전기에 의해 구동되는 동기발전기의 출력으로부터 브리지 다이오드정류기에 의해 만들어진 DC전원이 DC/DC 컨버터에 의해 부하시스템의 전력요구변화에 대하여 안정한 전원을 공급할 수 있음을 확인하기 위해서 다중추진시스템의 구성에 대하여 규격화된 시스템 수준의 시뮬레이션을 제시하였다.

2. 가스터빈을 이용한 다중 추진시스템

2.1 시스템 개요

그림 1은 다중추진 시스템의 전력 흐름도를 나타내고 있다. 시스템의 주 동력원은 동기 발전기를 구동시키는 가스터빈 엔진이다. 동기발전기의 출력은 3상 다이오드 브리지 정류회로를 경유하여 DC링크단으로 공급된다. 5개의 양방향 DC/AC 컨버터중 4개는 가변전압, 가변주파수의 출력을 추진모터에 공급하고, 나머지 하나의 DC/AC 컨버터는 플라이휠을 구동한다. 단방향 DC/AC 컨버터는 전등이나 팬 부하와 같은 열차의 부대설비에 AC 전력을 공급한다. 저항뱅크는 브레이크 동작시 발생되는 회생전력에 의한 잉여전력을 소비하기 위해 이용된다. 열차는 속도지령을 받아 지령속도를 추종하도록 제어한다. 전력관리시스템(power management system)은 부하시스템에 최적의 DC전력을 분할하여 연료소모를 최소화하는 역할을 한다. 이러한 시스템의 장점은 터빈이

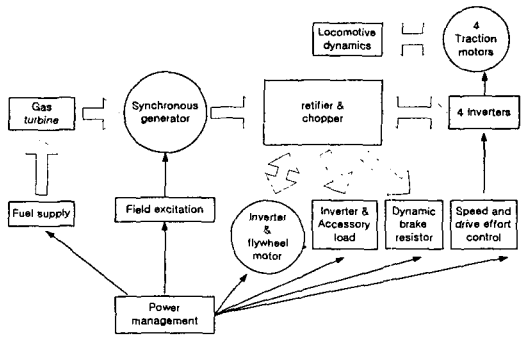


그림 1 다중추진시스템의 전력 흐름도

부하로부터 독립되어져있으므로 터빈 속도와 소비전력을 연료 효율면에서 최적화되도록 할 수 있다[2].

2.2 시스템의 시뮬레이션 모델

동기 발전기와 정류기는 하나의 통합된 모듈로 형성할 수 있다. 동기 발전기의 각상은 기기의 내부임피던스를 표현하는 RL 임피던스 성분을 직렬로 구성한 전압원으로 구성한다. 여기에서 저항성분 R은 무시할 수 있으나, 인덕턴스 값 L은 양의 값이어야만 한다. 이러한 모듈에 입력으로는 자속전류 I_f, 기계적 출력 P_m, 그리고 DC 전류 I_{dc}등이 있고, 출력은 DC 버스 전압 V_{dc}와 축 회전 각속도 ω이다.

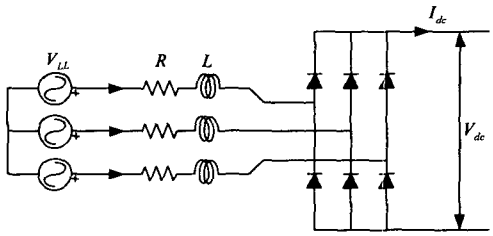


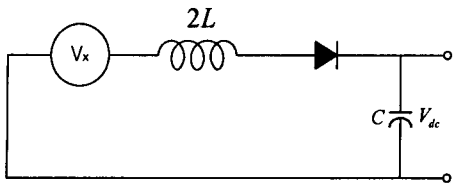
그림 2 동기발전기와 정류기 모델

여기에서, 내부저항 R을 무시하면, DC 버스 전압은 식 (1)과 같다.

$$V_{dc} = 3\frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} - \frac{3}{\pi}\omega L_s I_{dc} \quad (1)$$

내부 전압원 V_{LL}의 RMS값은 자속전류 I_f와 회전축 각속도 ω에 대한 함수이다. 여기에서 자속전류 I_f를 고정시키면, V_{LL}은 기계적 각속도 ω에 비례하게 된다.

동기발전기와 정류기의 시뮬레이션 모델에 있어서, dc 링크단에 흐르는 전류가 dc링크전압 V_{dc}에 미치는 영향을 고려하기위해 그 상관관계를 표현하면 다음과 같다.



$$V_x = \max(V_a, V_b, V_c) - \min(V_a, V_b, V_c)$$

그림 3 3상 정류기의 등가회로

dc전류는 dc링크 전압이 dc링크 커패시터 전압보다 높을 때만 도통하기 때문에, dc 등가회로는 그림 3과 같다. 그리고 이때의 상태방정식은 식 (2)와 식(3)과 같다. 여기에서 다이오드는 일정한 전압드롭 V_{drop}을 갖는 것으로 가정하였다[3].

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{2L}(V_x - V_{dc} - 2*(i_d*R + V_{drop})) \quad \text{if } V_x > V_{dc} \qquad (2)$$
$$= 0 \quad \text{if } V_x < V_d$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}(i_d - i_o) \qquad (3)$$

동기발전기의 선간 전압 V_{LL}은 P를 극수, f_n은 공칭 전기적 주파수, ω_n은 f_n에 해당하는 공칭 축각속도, 그리고 V_0는 자속 전류가 I_f이고, 회전각속도가 ω_0일 경우의 값이다. 여기에서 V_0의 값은 실험적으로 결정된다. 그러므로 각속도 ω이고 자속전류 I_f일 경우 V_{LL}전압은 식 (4)처럼 표현할 수 있다.

$$V_{LL}(\omega, I_f) = \frac{V_0(\omega_n, I_f)\omega \frac{P}{2}}{2\pi f_0} \qquad (4)$$

회전자의 동특성은 전력 흐름 밸런스를 토대로 계산할 수 있다. 그림 4는 동기 발전기의 전력흐름도를 나타내고 있다.

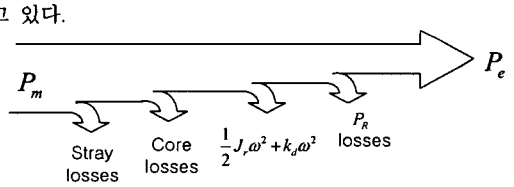


그림 4 동기발전기의 전력흐름도

다이오드 브리지 정류기에서의 전력손실 및 동기발전기에서의 철손 및 표류손을 무시하면, 전력 밸런스는 식 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_m = P_e + \frac{1}{2}J_r\omega^2 + k_d\omega^2 + P_R \qquad (5)$$

여기에서, P_m은 터빈으로부터 발생된 기계적 출력이고, P_e는 DC 버스 전력, $P_e = V_{dc}I_{dc}$, J_r은 회전자 관성, 그리고 k_d는 기계적 마찰계수이다. 발전기 고정자의 동손은 고정자 상전류 I_{ph}를 이용하여 계산한다. I_{ph}의 실효값은 대략 $0.816I_{dc}$이다[4]. 그래서 동손은 식 (6)과 같이 계산할 수 있다

$$P_R = 3\times(0.816\,I_{dc})^2 R \qquad (6)$$

식 (6)으로부터, 회전자 동특성은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega = \sqrt{\frac{\int 2(P_m - P_e - P_R - k_d\omega^2)}{J_r}} \qquad (7)$$

발전기의 여자회로는 시험적으로 관측된 특성과 1차 지연특성을 고려하여 표현할 수 있다. 발전기 각속도 ω_0에서 발전기의 개방 회전단자전압은 자속전류 I_f와의 함수로써 $V_e(\omega_n, I_f)$로 측정될 수 있다. I_f와 V_e 사이의 지연을 고려하면 단자전압은 식 (8)와 같다.

$$V_0 = \frac{V_e}{1 + T_e s} \qquad (8)$$

여기에서 T_e는 지연시간을 나타낸다.

2.3 DC-DC컨버터의 설계[5]

DC-DC 컨버터의 전력부는 그림 5와 같다. 강압쵸퍼의 인덕턴스는 2가지의 제약조건에 의해 결정된다. 첫 번째의 제약조건은 정격부하의 10%이상의 부하에 대하여 연속모드로 강압쵸퍼를 운전하여야한다. 두 번째 조건은 사용 가능한 인덕턱의 코어에 의해 결정된다. 식 (9)은 임계 인덕던스에 대한 방정식을 나타낸다.

$$L_{chop} = \frac{R_{Load}}{2f_s}(1 - D) \qquad (9)$$

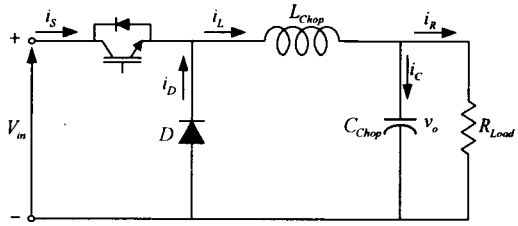


그림 5 DC-DC 컨버터의 전력부

실제 시스템은 85%의 시비율에 스위칭주파수 $f_s = 500$ [Hz], 부하저항 $R_{chop} = 26.13[\Omega]$(정격 전력의 10%)이므로 인덕턴스값은 3.9[mH] 값이 된다.

커패시터는 출력전압리플이 1% 보다 작거나 $\Delta V_0 < 3V$가 되도록 설계한다. 식 (10)은 커패시터의 크기를 산출할 수 있는 방정식이다.

$$C_{chop} = \frac{D}{8L_{chop}f_s^2\Delta V_0}(V_{in} - V_0) \qquad (10)$$

식(10)으로부터 7155[μF]가 된다. 본 논문에서는 인덕터에 의한 전압강하를 고려하여 인덕턴스 2[mH], 커패시터 20000[uF]로 하였다.

2.4 DC-DC컨버터의 상태궤환제어기

DC-DC 컨버터는 여러 종류의 부하시스템들이 병렬로 구성되어져 있다. 그러나 짧은 시간동안에 전류가 급변하는 부하 시스템들과 알 수 없는 제어루프속도를 갖는 정전력 부하들은 DC-DC 컨버터의 제어 안정성에 큰 영향을 줄 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 다른 종류의 부하에 대하여 DC-DC 컨버터 시스템의 제어 안정 및 원하는 특성을 기대할 수 있는 상태 궤환 제어기를 적용하였다.

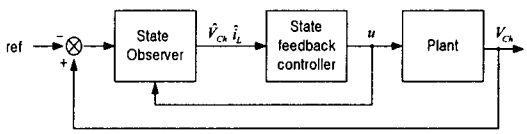


그림 6 상태궤환 제어기의 블록

2.5 시뮬레이션

그림 7은 전체 제어시스템을 포함하는 Simulink 블록도를 나타내고 있다. 시뮬레이션 모듈모델들은 동기발전

기와 3상 다이오드 브리지정류기, 그리고 DC-DC 컨버터 및 제어기로 구성되어져 있다.

그림 8 ~그림 11은 시스템 기동에서부터 정격부하시험까지 포함하는 시뮬레이션 결과이다. 우선, 그림 8은 이때의 동기 발전기의 속도와 소비전력을 나타내고 있다. 실제 연구대상의 동기발전기는 8극, 용량 3[MW] 정격속도 12000- 15400[rpm]의 발전기로서, 출력은 선간 전압 2400[V]이다. 그림 8은 동기발전기의 속도 및 출력전력으로써, 정격속도 15000[rpm]으로 구동되다가 정격출력이 요구되는 경우 대략 15500[rpm] 정도까지 상승되는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 이때의 동기 발전기의 선간 전압 및 상전류 그리고 브리지정류기에 의해 정류된 dc 출력전압을 나타내고 있다. 그림 9의 파형으로부터 정류 dc 출력전압은 가스터빈의 연료공급을 조절함으로써 3200[V]정도로 유지시키고 있는 것을 알 수 있으며, 정격부하 투입한 경우 ±150[V]정도의 전압 맥동이 발생하여 10%이내의 전압변동이 나타나는 것을 알 수 있다.

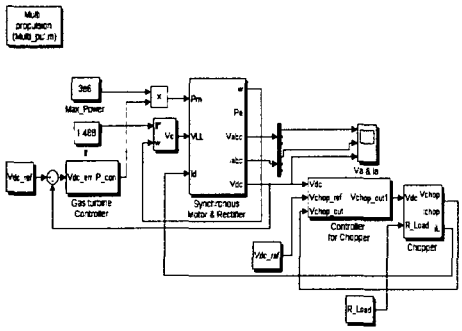


그림 7 전체 제어시스템에대한 Simulink 블록도

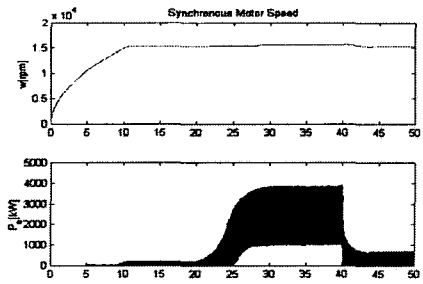


그림 8 동기 발전기의 속도 및 출력전력

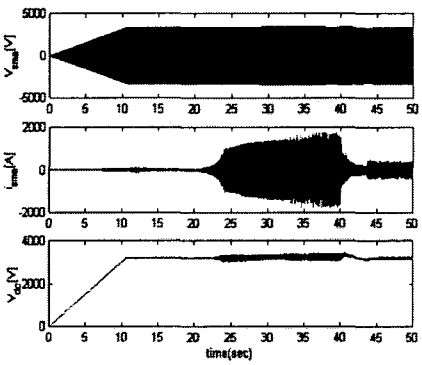


그림 9 동기발전기의 선간 전압 및 전류, 정류전압

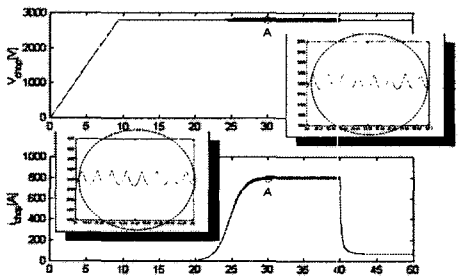


그림 10 DC-DC 컨버터의 출력전압 및 전류

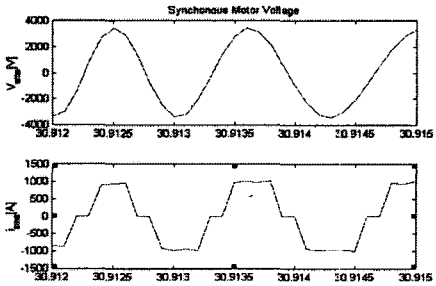


그림 11 동기발전기의 선간 전압 및 상전류

그림 10은 DC-DC 컨버터의 출력전압 및 전류 파형으로써 정격부하투입시 ±40의 전압맥동이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 대략 1.4%의 리플전압으로 일반적인 시스템 권장사양인 10%이내로써, 전압 제어특성이 양호한 것을 알 수 있다. 그림 11은 동기발전기의 출력전압 주파수 및 정류기의 상전류파형 형태를 살펴보기 위한 것으로 정격부하투입시 선간전압주파수는 대략 850~1000[Hz]이며, 상전류의 피크치는 대략 1000[A]정도로 나타나고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 한국형 다중추진시스템의 DC-DC 컨버터의 설계 및 제어기의 부하응답특성을 분석하기 위하여 동기발전기와 정류기 그리고 DC-DC 컨버터에 대한 모델링 및 시뮬레이션에 관한 것이다. 시뮬레이션결과로부터 본 연구에서 제시한 시뮬레이션 모델은 빠른 원형개발 및 시험을 돕기 위해서 전력 관리의 전망으로부터 이러한 시스템을 디자인하기 위한 선행작업으로써 유용할 것이라 판단된다.

[참 고 문 헌]

[1] 김수용, "한국형 다중추진 시스템 기술개발", 고속철도개발사업 1차년도 연구보고서, 1권, pp. 1-5, 2003.10

[2] S.D. Sudhoff, K.A. Corzine and S.F. Clover, "DC Link Stabilized Field Orientation Control of Electric Propulsion System", IEEE Trans. on energy Conversion, Vol 13, No. 1, pp.27-33, March 1998

[3] Jih-Sheng Lai, "Power Electronics System Modeling and Simulation," IEEE Trans., pp.45-55, 1994

[4] M. Mohan, T M. Undeland and W P. Pobbins, Power Elecronics, John Wiley & Sons, 2nd. 1995, pp.108

[5] R.W. Ashton, J.G. Ciezki, M.G. Badorf, "The Synthesis and Hardware Validation of DC-to-DC Convertr Feedback Controls", IEEE Trans., pp.65-71, March 1998