

디젤-전기 Hybrid 엔진용 유도기의 설계 및 특성해석

조윤현, 이재상**, 구대현**, 하희두**, 유우현***
*동아대 **한국전기연구소 ***이천전기

Design and Characteristics Analysis of Induction machine for Diesel-Electric Hybrid Engine

Y.H.Cho, J.B.Lee**, D.H.Koo**, H.D.Ha**, W.H.Ryu***
*Dong-A Univ. ** KERI *** Leechun Electric Mfg.Co.

Abstract

This paper presents the design and characteristics analysis of induction machine for diesel-electric hybrid vehicle powertrain. Diesel-electric hybrid vehicles are very efficacious in reduction of consumption energy, environment pollution and safty yields with high dynamic of machines. However, their sophisticated construction requires from designers both complex made-technology and control strategy which would be able to put into practice this requirements. These problems are still considered in processing the design and analysis of induction machine. The requirements for a given volume, input power to weight ratio, high efficiency and wide speed range are met by the induction machine.

1. 서 론

지구환경 보존의 일환으로 대기오염의 주범인 배기가스를 없애기 위하여 전기자동차는 세계각국이 심혈을 기울여 개발 중에 있으며, 일부 국가에서는 모든 자동차중 전기자동차가 짐하는 비율을 법규화 하는 움직임을 보이고 있는 실정이다. 하지만 대형차의 경우 대기오염도가 가장 심한 디젤엔진이 당분간 주류가 될 것이 불가피하므로 디젤엔진에서 나오는 NO_x와 흑연배출의 저감이 당면의 과제로 남아 있는 실정이다. 이에 선진국 중심으로 디젤, 전기의 hybrid 엔진개발에 상용화 연구를 진행하고 있으며, 국내에서는 초기단계의 개념연구에 머무르고 있는 실정이다.[1]-[5]

이 시스템은 디젤엔진과 발전,전동기를 조합한 것으로 배기가스 문제의 개선 외에 차량전력의 공급력 증대, 전기 제동력, 시동,발전도 겸하는 차량시스템의 기능확대에 충실을 지향하는 것이다.

따라서, 본 연구에서는 디젤 차량의 배기가스, 안전성 향상 및 연비 개선을 하기 위하여 기존 디젤 엔진에 발전기 겸용 전동기 및 컴퓨터에 의한 Inverter 제어에 의해 retarder, 모디, 발전 및 회생과 전기식 브레이크의 다기능을 가질 수 있는 Hybrid 차량으로 디젤 엔진의 전기식 구동장치가 요구된다. 이에 차량의 구동 시에 필요한 기동력과 감속 시에 발전,회생이 가능한 유도기의 설계와 유한요소법에 의한 자속분포 특성, 등가회로에 의한 정상상태의 특성 해석에 대하여 논하였다.

2. Hybrid 엔진의 구조 및 유도기 설계

2.1 Hybrid 엔진의 구조

디젤-전기 엔진시스템용 발전,전동기는 견고하며,보수,유지가 용이한 3상 유도기를 사용하였으며, 이에 대한 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 여기서 유도기의 직경은 축길이에 비해 상당히 큰 초박형기로 엔진의 flywheel housing내에 장착시킴으로써 종래의 엔진과 동일 공간에 hybrid엔진을 구성하는 것을 가능하도록 하였다. 이것은 종래 차의 엔진,기계 계의 기술을 이용하는 데에 결정적으로 중요한 요소이다.

제어장치는 3상 유도기를 전동기/발전기로서 동작시킴 인버터로 제어함으로써 의해 제동, 발전, 배터리충전, 시동, 보조구동(엔진 쪽에서의 토크 조정)의 각기능을 수행케 하도록 하였다.

본 연구에서 기존 엔진구조를 크게 변경하지 않은 범위 내에서 3상 유도기의 설계 사양 및 설계치수는 다음과 같이 얻었다.

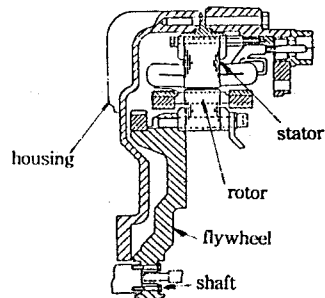


그림 1. 디젤-전기 Hybrid 엔진의 구성

2.2 유도기의 설계 사양

성에너지화 및 경량화의 필요성 때문에 hybrid 엔진시스템의 전용 초박형 유도기의 설계는 공간을 유효하게 이용하는 관점에서 고정자는 flywheel-housing을 끼운 엔진본체에, 회전자는 엔진의 flywheel 외주 면에 각각 장착한 구조를 채용한 것으로 하였다. 이 때문에 기중의 선정에 있어서는 완전한 brushless화가 첫 번째 조건이 되며, 다음에 제약조건 내에서 고토오크를 발생시키기 위해 회전자 단위 면적당의 토크가 큰 것으로 하였다. 이러한 검토결과에서 순위를 붙이면, 동기기 = 유도기 > 가변라엑턴스 > 다극 유도자형이 되지만 실용성, 구조의 단순성, 범용성, 제어성등을 고려하여 이 시스템의 발전전동기에는 3상 유도기를 채택하였다.

이에 대한 hybrid형 자동차 엔진의 사양곡선으로 디젤엔진 부담과 유도가기 부담분은 다음 그림 2와 같다.

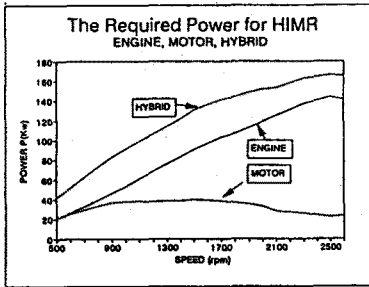


그림 2. 박형유도기의 요구사양

그림 2에서 박형 유도기 설계를 하기 위한 기본 base속도는 유도기가 가장 운행속도가 빈번한 범위로 800~2300(rpm)내로 1550(rpm)을 선택하였으며, 정격출력은 그 점에서 요구되는 출력에 대해 0.5이상으로 요구되는 최대출력에 여유도를 고려하여 선택하였다.

설계 사양에 부합한 필요한 출력을 얻을 수 있는 유도기의 기본 외형 설계치수는 그림 2에서 직경 D가 축방향 길이 L에 비하여 상당히 큰 박형기가 된다. 박형유도기는 기존의 디젤엔진의 flywheel에 치부되는 구조로 기계 기구적으로 유도기의 축경과 길이가 제약받으며, 이에 대한 구조적 제약조건은 다음과 같다.

- 유도기 최대 직경 : 620 mm이하
- 유도기 축길이 (end ring포함): 135 mm이하
- 유도기 최소 직경 : 436 mm이하

또한, 인버터 구동 박형유도기의 설계사양은 다음과 같다.

- 인버터의 출력전압 : 170 (V)
- Shaft에서의 출력 : 약 34 (KW)
- 최대 출력 토크 : 44 (Kg.f)
- 최고 회전수 : 2300 (rpm)

2.3 유도기의 설계

1) 출력 계수

제약된 설계사양 범위 내에 가능한 최대토크의 발생이 필요함으로 유도기의 설계치수는 다음과 같은 출력 식에서 얻을 수 있다.

$$P_0 = K_0 D^2 L N \quad (1)$$

여기서, P_0 는 최대 유도기 출력, K_0 는 출력계수, D는 공극직경, L는 직중길이, N은 회전수이다.

출력계수 K_0 는 전기장하 및 자기장하분배, 냉각효율등에 따라 상이하게 된다. 최적의 설계는 최소의 가격으로 최대출력을 갖게 하는 것으로 hybrid용 유도기의 경우는 제한된 공간에 장착되어야 하기 때문에 D^2L 의 결정 즉, 직중길이 L과 극간격 r의 관계에 있어서 극간격의 감소로 가변주파수 운전시의 자속감소로 yoke 의 두께를 작게할수 있으며, 권선 끝부분을 짧게 할 수 있는 장점이 있다.

2) 장하분배

Hybrid형 구동용 유도기는 정출력 영역이 800 (rpm)부터 2300 (rpm)까지로 박형으로 제작되어야 한다는 제약 때문에 철심의 단면적이 적고 누설이 작으며 정동토크가 큰 전기장하형으로 설계하였다.

3) 회전자 도체

회전자 도체는 일반적으로 $\bar{P}R$ 손실을 최소화하기 위하여 도전율이 높은 구리를 사용하였다. bar구조는 표피효과에 의한 고조파 손실을 감소하기 위하여 얇은 bar를 사용하였다.

4) 고정자 철심

고정자 철심은 사용 주파수 범위가 광범위하기 때문에 고주파에서 고조 파와 철손이 상당히 증가한다. 따라서 고정자 철심은 고경도 규소강판을 직중하여 사용한다. 또한, 슬롯 형상 최적화에 의해 슬롯내 도체 집적율을 향상시켜 동손을 저감시키며 고정자 도체는 얇은 도체를 사용하여 인버터 구동으로 인한 고조파에 의한 손실을 저감시킨다.

5) 슬롯 및 결선 방법

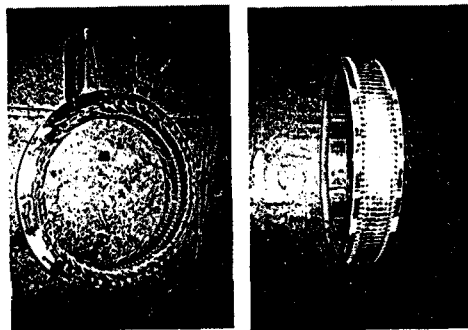
공간고조파 성분의 감소 및 누설 리액턴스감소를 위하여 기존에 비하여 슬롯수를 증가하여 설계하였으며, 인버터 출력전압과 3배수 고조파 감소효과를 얻기 위하여 델타결선을 하였다.

6) 기타

차량 내부에 장착하는 방법에 따른 취부형태, 속도센서 및 온도센서 선정기준 및 전선의 인출부 구조를 고려하여 외형치수를 결정하였다.

표 1. 유도기의 설계치수

항 목	치 수
고정자 길이	50(mm)
고정자 외경	610(mm)
고정자 내경	520(mm)
회전자 외경	517.4(mm)
고정자 슬롯수	108
회전자 슬롯수	136
사 용 도 체	Φ1 X 5
권 선 방 식	Delta
권 선 수	22(turn)



(a) stator

(b) rotor

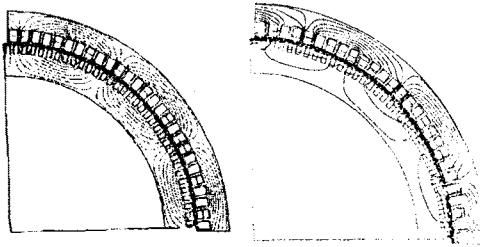
사진 1 박형 유도기의 시험기

3. 유도기의 특성 고찰

본 연구에서의 3상 12극기 박형유도기 자계해석은 유한요소 해석 패키지인 Magnet 5.0을 이용하여 자속밀도분포 및 공극 자속분포곡선을 해석하였다. 해석모델은 그림 3과 같이 12극의 유도기에 대하여 3극분으로 주기경계조건을 주어 해석하였다. 해석과정에서 해석영역의 요소분할 개수는 약 45,000개 분할하여 정밀하게 해석하였다.

그림 3(a)는 무부하시의 자속분포를 나타내며, 그림 3(b)는

구속시험 조건하에의 자속분포를 나타낸다. 또한, 그림 4는 정격부하시의 공극내의 자속분포 곡선으로 약 0.6(T)정도로 나타났으며, 고정자 치부 분에서는 약 1.5(T)정도로 자성체의 포화치에서 동작점으로 설계 사양에 충족됨을 알았다.



(a) 무부하시 (b) 구속시
그림 3. 자속 분포도

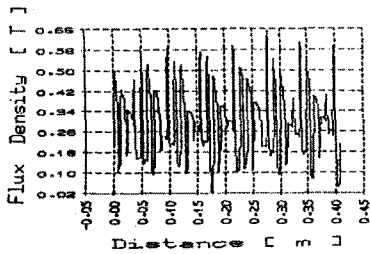


그림 4 공극 자속 분포곡선(정격운전시)

본 연구를 통하여 설계, 제작한 3상 12극기의 박형유도기의 시험기는 사진 1과 같다. 사진 1 (a)의 고정자는 diesel 엔진시스템의 housing에 치부되며, 사진 1(b)의 회전자는 flywheel부에 장착된다. 이 시험기의 최대출력은 34(Kw), 최대속도 2300(rpm)으로 인버터에 의해 base속도 800(rpm)까지는 전압/주파수 비가 일정하게 운전되며, 그 이상에서는 전압 170(V) 일정 주파수변화로 운전된다.

따라서 이에 대한 속도 대 토오르크, 전류곡선은 그림 5, 그림 6과 같다. 그림 5, 그림 6은 설계과정에서 설계치수를 파라미터로 한 등가회로정수로 부터 구한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 시뮬레이션 결과 값은 사진 1의 박형 유도기에 대하여 구속시험, 무부하시험을 통하여 얻어진 등가회로 정수로 부터 구한 값과 거의 같은 값을 얻었다. 이때 실험에 의해 구한 등가회로 정수는 80(Hz)에서 1차저항은 0.0339[Ω], 2차 저항 0.205[Ω], 1차 누설저항은 0.1074[Ω], 2차 누설저항 0.523[Ω], 자화저항은 1.1159[Ω]를 얻었다.

본 연구의 박형유도기의 설계치 토오르크는 400(rpm)에서 430(N.m), 800(rpm)에서 400(N.m), 2300rpm에서 137(N.m)이상 요구되었다. 그림 5에서 최고속도 2300(rpm)에서 100(N.m)으로 37 (N.m)가 부족하며, 그 외의 영역에서는 모두 충족됨을 알 수 있었다.

또한, 그림 6의 전류곡선에서 base 속도 800(rpm)에서 정격부하 400(N.m) 인가 시에 전류는 약 75(A)가 흐르며, 슬립은 0.07정도로 역률,효율이 가장 높은 점이 요구되었다. 이때 시뮬레이션 결과 값으로 최대효율 0.9,역률 0.8의 값을 얻었다.

따라서, 본 연구과정에서 설계된 12극 박형유도기가 디젤-전기 hybrid형 엔진용 구동장치의 요구조건을 거의 만족됨을 알 수 있다.

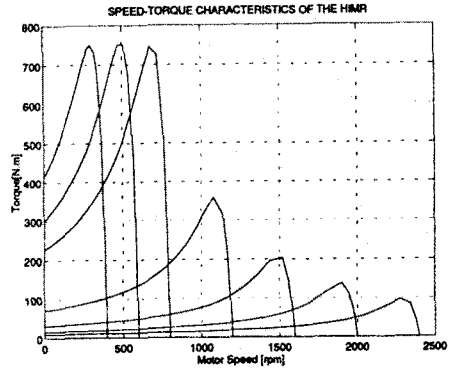


그림 5 속도-토오르크 곡선

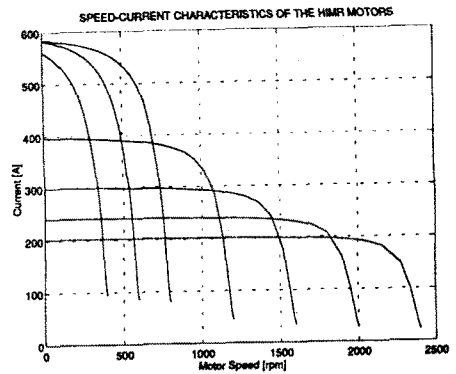


그림 6 속도-전류곡선

4. 결론

본 연구를 통하여 디젤-전기 hybrid 엔진 구동용 발전.전동시스템으로 최대출력 34 Kw, 최대속도 2300(rpm)의 12극 3상 박형유도기를 개발하였다. 박형유도기의 특성해석은 기존의 유도기의 등가회로법과 수치해석 방법으로 전기기기 해석분야에 널리 사용되고 있는 유한요소법을 적용하여 설계검증을 하였다.

등가회로법에 의한 유도기의 속도-토오르크 곡선 및 전류곡선은 박형유도기가 요구하는 사양으로 최대 속도에서 요구되는 최대 토오르크가 조금 약 40(N.m)가 부족하며, 그 외의 영역에서는 많은 여유도를 갖음을 알 수 있었다.

따라서, 이는 디젤-전기 hybrid엔진의 특성상 최대 속도에서 과잉의 토오르크 요구조건으로 생각되며, base속도 근방에서 주로 운전하는 특성으로 볼 때 큰 어려움이 없을 것으로 사료된다. 단, 이 시스템의 보급과 적용차종의 확대에 주력하여 환경보전에 기여하기 위해서는 신뢰성 시험 및 성능의 제평가연구가 이루어 지야 할 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. 清水浩, 電氣自動車のすべて, 日刊工業新聞社, 1992
2. 조윤현, 오성철, 하희두, "전기자동차용 전동기 및 제이기", 대한전기학회지, 4~7, 제193호, 1993.1
3. Alger, P., Induction Machines, 2nd ed, New York: Gordon and Breach, 1970
4. Veinott, C., Theory and Design of Small induction Motors, New York, McGraw-Hill, 1959