

수소연소 동력/발전시스템용 리니어 발전기 설계에 대한 연구

최동민*, 노태석*, 임재원**, 김기영*, 오시덕*
(주)효성*, 서울대학교**

Study of Linear Generator for Power/Generation System using Hydrogen

Dong-Min Choi*, Tae-Seok Noh*, Jae-Won Lim**, Ki-Young Kim*, Si-Deok Oh*
Hyosung co., Seoul National University**

Abstract - 수소리니어 동력/발전시스템은 기존의 인프라를 이용한 개발이 가능한 이점과 고압축비, 초회박연 소 실현에 의한 고효율, 저배기 달성이 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 엔진 혹은 발전기의 구조변경 없이 다양한 연료를 사용이 가능하기 때문에 차세대 수소이용 기관으로 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 기존에 설계한 5kW급 리니어발전기의 성능향상을 위해 공극구조의 개선과 디텐트력 감소 설계를 했다. SPM 타입의 자석을 적용한 내충격 구조의 이동자 설계와 디텐트력 감소를 위한 치 형상설계가 이루어졌다.

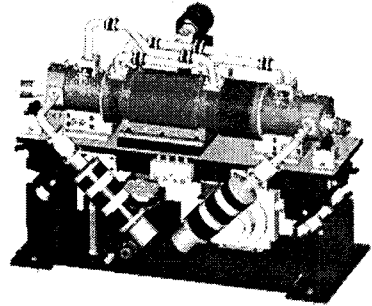


그림 1. 5kW급 리니어 동력/발전시스템 개념도

1. 서 론

유가 급등과 각국의 환경규제의 강화로 고효율/친환경 에너지에 대한 관심이 증대됨과 더불어 사용자 입장에서 고압에너지인 전기에너지의 안정적 공급에 대한 요구가 커지고 있다. 또한 배기가스 저감을 위해 에너지 이용효율이 높은 시스템을 이용함으로써, 적은 연료를 사용하여 배기가스를 최대한 줄이는 고효율 발전시스템 개발이 요구되고 있다. 이러한 측면에서 분산발전 기술은 천연가스와 같은 청정연료를 사용하여 저배기를 실현하고, 수요측 근처에 설치되어 전력 생산과 동시에 폐열을 회수하여 전기와 열을 동시에 생산할 수 있기 때문에 에너지이용 효율을 높일 수 있다[1].

그림 1. 에 5kW급 리니어 동력/발전시스템의 개념도를 나타내었다. 리니어 동력/발전시스템은 그림에서 알 수 있듯이 두개의 엔진이 하나의 커넥팅로드를 중심으로 대칭형태를 이루고 있어 한쪽의 엔진폭발력이 그대로 반대편엔진의 압축력으로 작용을 하게 된다. 피스톤의 움직임을 구속하는 크랭크 구조가 없기 때문에 기존 엔진과 비교할 때 피스톤의 상사점 도달속도가 빨라 연료가 자발화 되는 시점전에 최고 압축비에 도달 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 초회박, 고압축비 실현이 가능하여 기존 내연기관의 효율한계를 넘을 수 있는 기관이다. 이런 리니어엔진의 동력을 전기에너지로 변환 시켜주는 것이 리니어발전기이다. 리니어발전기는 발전시스템의 전체효율을 향상 위해 고효율의 발전성능과, 엔진에서 전달되는 연소충격에 견딜 수 있도록 기계적으로 강한 구조도 요구되어진다. 또한 기계적 에너지를 전기적인 출력으로 변환할 수 있는 제어시스템이 요구되어진다. 소형 발전기기의 경우 작은 손실에도 전체 효율의 변화를 갖기 때문에 발전기의 디텐트력을 감소시키는 부분도 출력의 안정성을 확보하고 효율을 향상하기 위해 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 공극구조개선을 위해 SPM(Surface Permanence Magnet)을 이용한 이동자 설계를 하였고 기계적인 강도를 확보하기 위한 자석고정방식에 대한 연구와 디텐트력 감소를 위한 치 형상 설계에 대한 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 공극구조

고효율/고출력을 얻기 위해서 공극을 줄이는 방법으로 발전기 설계를 진행하였다. 이때 발생될 수 있는 이동자 축 변형량을 구조해석 한 결과 공극을 기존 2mm에서 0.5mm까지 축소가 가능하여 개선된 발전기 설계에 반영하였다.

2.1.1 자석구조

공극이 0.5mm로 줄어들어 따라 반경방향으로 자화된 자석을 적용할 수 있기 때문에, 적은 양의 자석으로 원하는 자속밀도를 확보할 수 있다. 즉 SPM방식이 적용된 발전기의 경우 동일한 축방향 면적(스트로크)에서 기존 발전기에 적용된 IPM(Interior Permanent Magnet) 방식에 사용된 자석보다 외경이 작아도 동일한 자속밀도를 얻을 수 있다(그림 2. 와 그림 3. 참조) 이동자 질량을 줄일 수 있다. 단 자석 감자에 대응할 수 있는 정도의 두께가 고려되어야 한다.

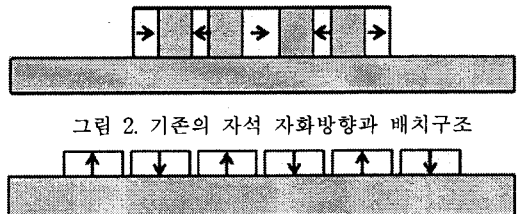


그림 2. 기존의 자석 자화방향과 배치구조

그림 3. 개선된 자석 자화방향과 배치구조

결과적으로 공극 축소를 통해서 이동자의 외경 감소와 질량 저감의 효과를 얻을 수 있어 이동자의 질량은 기존 이동자 대비 약 60% 수준까지 줄일 수 있다. 이동자의 질량은 시스템의 운전속도와 관련이 있으며, 기계적인 손실과도 관련이 있어 시스템 전체의 관점에서 결정되어

저야 한다.

2.1.2 자속밀도 & 역기전력

그림 4와 5는 시뮬레이션을 통해서 얻어진 축방향 자석과 반경방향 자석을 비교한 발전기의 자속밀도와 역기전력 파형이다. 축방향 자석의 경우 쇄교 자속 파형이 고르지 않은 반면 반경방향 자석의 경우 쇄교 자속 파형이 진행방향에 따라 고르게 분포되어 있으며 전체 자속량도 더 크음을 알 수 있다. 동일한 이동자 크기를 기준으로 하였을 때 반경방향 자석을 사용하는 것이 자속의 측면에서 이득이 있고 쇄교 자속의 미분값으로 결정되어지는 역기전력의 측면에서도 동일한 이득이 기대 된다. 따라서 반경방향 자석을 사용하는 것이 기기의 전반적인 성능을 향상시킬 수 있다.

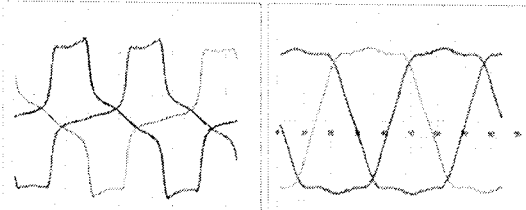


그림 4. 자속밀도 파형 (좌)축방향, (우)반경방향 자석

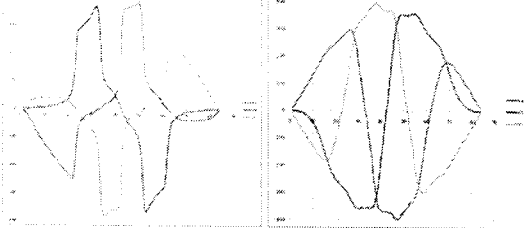


그림 5. 역기전력 파형 (좌)축방향, (우)반경방향 자석

그림 5의 역기전력파형 그래프는 동일한 크기의 이동자를 가정하였을 때 축 방향/반경방향 자석을 적용한 발전기의 역기전력파형을 나타낸 것이다. 쇄교 자속량의 차이로 반경방향 자석을 이용한 발전기가 큰 역기전력을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있으며 권선 턴 수 등을 이용하여 역기전력 최대값을 일치시킨 경우에도 역기전력의 RMS 값이 반경방향 자석의 50%정도 수준의 값을 가지는 것을 확인하였다. 따라서 반경방향 자석의 사용이 기기의 출력 및 효율측면에서 유리하다.

2.1.3 형상설계

리니어발전기의 경우 엔진 피스톤의 커넥팅로드의 역할을 하기 때문에 연소에서 발생하는 모든 충격이 그대로 전달되어 진다. 따라서 이런 충격에 견딜 수 있는 기계적인 구조가 요구되어지며, 지지구조에 대한 보강도 필요하다.

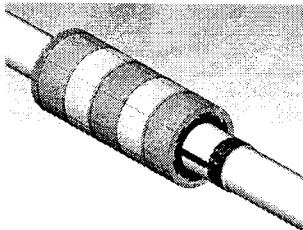


그림 6. 이동자 설계 개념도

기존 원통형 발전기의 이동자 구성은 링 형태의 자석

을 이용하기 때문에 연소에 의한 반복 충격에도 자석이 반경방향으로 이탈하는 문제가 없다. 단, 축방향으로 발생하는 슬립현상만을 방지해 주면되기 때문에 제작이 비교적 간단하다 할 수 있다.

하지만 3차 발전기의 경우 6조각의 부분형 자석을 원형대로 조립을 하기 때문에 자석이 충격에 또는 상호 반발력에 의해 떨어지는 것을 방지하는 구조가 요구되고 그 결과 그림 7과 같이 자석을 형상가공 하고 자석을 고정할 수 있는 코어를 제작하는 방식의 설계를 적용했다.

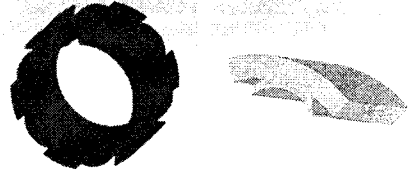


그림 7. 자석조립용 서브코어 및 영구자석

코어는 링 형태를 유지하고 있어 축에 고정되며 코어표면에 형성된 요철 부분이 영구자석의 요철 부분과 맞물려 자석이 이탈되는 것을 방지하는 구조를 가지고 있다. 이때 영구자석은 6조각이 1set을 이루며 축과 수직면으로 자화된 자석을 사용하여 전체적으로 SPM 구조를 가지도록 하였다.

2.2 디텐트력 감소

공극감소에 따라 디텐트력이 증가하였고, 이를 개선하기 위해 치 형상설계를 변경하였다. 개선 전 발전기의 경우 철심을 십자모양으로 적층한 후 내부를 원형으로 가공하는 방식을 사용하였다. 때문에 가공면 안쪽에 챔퍼링을 적용할 경우 가공 시 절삭되는 부분이 위치마다 다르게 되어 효과를 얻을 수 없었다. 부채꼴 모양의 적층은 철심의 효율적인 이용을 가능하게 할 뿐 아니라 원통형 선형기에서 적용하기 힘든 챔퍼링 등을 공극면에 적용할 수 있다는 장점이 있다. 이를 고려하여 적용된 개선된 조립 구조의 형상을 그림 8에 나타내었다.

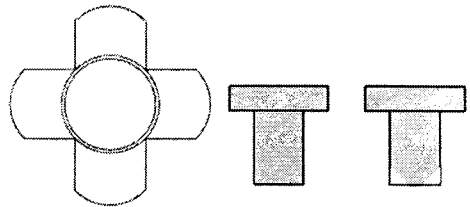


그림 8. 개선된 조립구조와 치 형상(챔퍼링) 설계

기존 발전기의 조립방식을 그대로 적용 하였지만 공극면에 대해 원주를 따라 적층하므로 공극면에 챔퍼링 가공이 용이하다. 공극면에 챔퍼링을 함으로써 디텐트력을 줄일 수 있는데, 시뮬레이션 결과 디텐트력이 약 600N에서 350N까지 저감됨을 확인하였다. 또한 정사각형 모양의 치는 끝부분에서의 자속의 급속한 변화에 의한 자속 슬립 현상으로 극부적인 포화를 일으킬 수 있기 때문에 이 부분에 챔퍼링을 적용, 제거함으로 자기 포화에 따른 철손 저감이 가능해졌다.

2.3 출력

그림 9, 10.은 앞서 설명한 설계 개선안을 모두 적용한 시뮬레이션 결과이다. 발전기의 역기전력을 400V로 제한하여 설계하였고, 반경방향 자석을 적용하여 동손을 변경 전 설계 대비 65%수준으로 줄일 수 있었다. 하지만 공극을 2mm에서 0.5mm로 축소함에 따라 치와 자석간

의 인력의 증가하여 디텐트력의 최대값이 변경 전 설계 사양 대비 약 300% 수준으로 증가되지만 새롭게 챔퍼링 기법을 도입하여 약 150% 수준까지 낮출 수 있었고 철손도 약 62.5% 감소하여 최종적으로 93%의 발전기 효율을 가질 것으로 예상된다. 표 1.에 개선 전/후의 사양 비교 결과를 나타냈다.

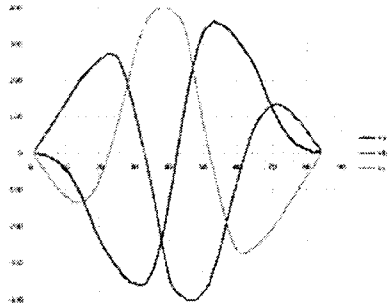


그림 9. 개선 후 시뮬레이션 결과(역기전력)

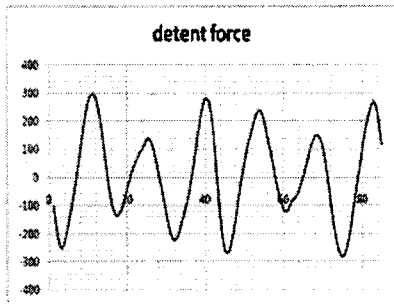


그림 10. 개선 후 시뮬레이션 결과(디텐트력)

표 1. 개선 전/후 설계사양 비교(시뮬레이션)

구분	개선 전	개선 후
출력 [kW]	6.1	5.9
동손 [W]	250	164
철손 [W]	400	250
효율 [%]	89.4	93
디텐트력 최대값 [N]	200	298
권선 [turn]	63	84

3. 결 론

본 연구에서 설계한 발전기는 출력과 효율 개선을 위하여 0.5mm 공극 구조를 기반으로 리니어발전기를 설계하였다. 개선된 발전기의 특징은 작은 공극 구조와 운전 주파수의 증가에 따른 효율 향상을 주로 하였으며, 철손의 증가를 피하기 위해 극/상 구조는 유지하였다. 또한 철심의 제작 경우 부채꼴모양의 적층방식을 변경 적용하여 조립성능을 향상시켰고 치에 챔퍼링을 적용하여 디텐트력을 감소하는 효과를 얻었다. 주요 개선부분에 대해 정리를 하면 다음과 같다.

- 1) 기존 2mm 공극에서 0.5mm로 감소 설계 함에 따라 공극 구조를 개선하였고 작은공극에 의해 반경방향으로 자화된 자석의 사용하여 제한된 영역에서의 자속밀도 확보가 가능하였다. 이는 이동자의 외경감소와 개선 전 대비 60%정도의 질량감소 효과를 얻었다.
- 2) SPM 방식의 이동자 설계를 위해 리니어엔진의 연소 충격을 대비할 수 있는 기계적인 구조가 요구되었으며, 6조각의 부채꼴 형상의 자석을 조립하기 위한 서브코어와 코어에 고정 가능하도록 자석형상을 설계하였다.
- 3) 공극감소에 따른 디텐트력의 급격한 증가는 철심의 조립방식 개선을 통해 감소가 가능했고 부채꼴 모양의 적층 방식과 치에 챔퍼링을 적용하여 약 150% 수준으로의 증가로 제한 가능했다.

결과적으로 작은공극과 자화방향이 변경된 자석을 적용함으로써 이동자의 경우 질량 및 부피가 60% 정도 줄어들었으며 턴수 감소 및 역기전력 향상에 따른 동손은 약 65% 철손은 62% 수준으로 저감하여 3%의 효율 증가 효과를 볼 수 있었다.

감 사 의 글

이 연구(논문)은 과학기술부의 지원으로 수행하는 21세기 프론티어연구개발사업(고효율 수소에너지 제조·저장·이용 기술개발사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] I. Boldea, S.A. Nasar, "Linear Electric Actuators and Generators".IEEE Trans. on Energy conversion, Vol. 14, pp712-717, September 1999
- [2] 노태석, 김강출, 우영민, 이용균, 류정인, 이영재, "수소연소 리니어엔진의 동적특성에 대한 연구", 한국자동차공학회 춘계 학술대회논문집, pp. 1841~1846, 2006
- [3] 최효용, 정현교, "제작성을 고려한 철심형 선형 전동기의 디텐트력 저감", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.30-32, 2002년 11월
- [4] 김경수, 정승기, 최준영, 오시덕, "수소연소 선형 발전기의 초기 기동", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부분회 춘계학술대회논문집, pp. 110~112, 2008