수소연소 선형 발전기의 초기 기동

정승기*, 김경수*, 최준영**, 오시덕**
*광운대학교 전기공학과, **(주)효성 중공업연구소

Starting operation of a linear generator driven by a hydrogen engine

Seung-Gi Jeong*, Kyung-Su Kim*, Jun-Young Choi**, Si-Doek Oh**
*Dept, of Electrical Engineering, Kwangwoon University
**Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung Corporation

Abstract - A linear generator driven by a hydrogen combustion engine has been developed. Unlike rotary engine-generator systems, the linear counterpart is inherently unable to start by itself unless external force is provided for initial compression/ignition cycle. When the generator is connected to utility power lines through a bidirectional power conversion system, however, the self start-up can be done by driving the generator as a motor. This paper introduces a prototype 1kW linear hydrogen engine-generator system being developed and shows the self start-up is possible with proper motoring mode.

1. 서 론

수소에너지는 신재생 에너지의 한 축을 담당하고 있다. 수소는 최근 분산전형 전원 또는 하이브리드 자동차의 동력원으로 부각되어 외국에서 활발히 연구개발이 시도되고 있다. 국내에서도 수소 프론티어 사업으로 수소에너지의 발생, 저장 및 이용기술 개발이 추진되고 있으며 수소에너지 이용기술의 일환으로 수소연소 엔진과 결합된 선형발전기 시스템 개발이 진행되고 있다.[1]

선형발전기는 일반적인 회전형 발전기에 비해 크랭크에 의한 기계적인 손실이 없고, 피스톤의 운동 자유도가 높아 압축 및 팽창효과를 극대화 할 수 있어 엔진 효율을 높일 수 있다.[2]~[3] 나아가 이를 구동하는 엔진에 수소연료를 사용할 경우 초저공해와 고효율의 발전기를 구현하는 것이 가능하여 미래형 고효율 환경 친화적 엔진으로 전망이 기대되고 있다.

선형발전기의 출력 전압은 왕복운동 과정에서 속도의 크기와 방향이 계속 변하기 때문에 회전형 발전기와 달리 맥놀이 형태로 나타난다. 이런 전압을 바로 상용계통에 연결할 수 없으므로 전력변환장치 (이하 PCS : power conversion system)를 이용하여 일정 크기의 직류로 변환한 후 다시 계통 전압과 연계할 수 있도록 60Hz의 교류 형태로 변환해야 한다.

선형발전기의 엔진 운전은 실린더 내부의 연료가 연소될 수 있는 압축 상태가 요구된다. 엔진 실린더 내부의 압력이 일정 수준이상이 되어야 연료가 원활하게 연소되어야 발전기의 이동자가 충분한 속도로 이동하여 반대쪽 실린더의 압력을 높여 원활한 압축과 연소가 가능하게 된다. 하지만 초기 기동 상태에서는 위의 연소 조건을 만족시킬 수 없으므로 별도의 초기기동 운전이 요구된다. 기존의 방법은 별도의 유압시스템을 이용하여 초기기동을 수행하였으나, 기계적인 효율저하 요인으로 새로운 시스템 적용이 필요하게 되었다. 이에 발전기 출력에 이미 적용되어 있는 PCS를 이용하여 선형발전기를 선형전동기처럼 동작시키는 '전동기동 방식' 을 개발하여 적용한다. 이 방법은 PCS가 양방향 전력수수가 가능하여야 하며, 초기기동 에너지를 전원으로부터 받을 수 있어야 한다.

본 논문에서는 현재 개발되고 있는 수소연소 선형발전기 시스템을 소개하고, 초기 전동기동 방식을 적용한 실험 결과를 제시한다.

2. 수소 연소 선형발전기

2.1 시스템의 소개

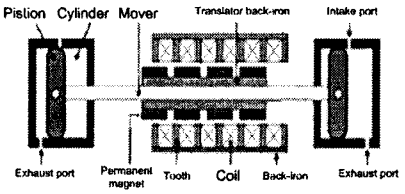

그림 1. 선형발전기 구성도

그림 1은 1kW급 선형발전기의 간략한 구성을 보여준다. 발전기 좌우에 부착된 엔진 실린더에서 수소연료가 압축과 폭발을 반복하고 이때 발생하는 힘이 이동자를 이동시킨다. 이동자에는 고리모양의 영구자석 N, S극이 이동방향에 대해 교대로 착자되어 계자역할을 하게 되고, 고정자 코일은 솔레노이드 형태로 외부 슬롯에 배치되어 있다.

발전기 설계 사양은 다음과 같다:

full stroke: 50mm (이동자 최대 이동거리)
정격운전 주파수: 30Hz
최대 출력 전압: 300V
최대 허용 전류: 15A
고정자 내부 저항: 0.7Ω (상당)
고정자 내부 인덕턴스: 1mH (상당)

허용 전류의 경우 시험 단계임을 감안하여 정격에 비해 높은 레벨로 제작되었다.

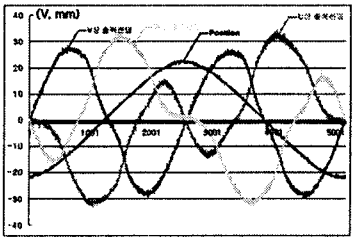

그림 2. 선형발전기 출력파형

그림 2는 발전기 이동자가 10Hz로 운동했을 때 출력단의 유기기전력과 이동자의 위치정보를 나타낸다. 이동자의 위치는 좌우로 23mm 교번 운동하여 한 운동주기 동안 총 92mm 이동하게 된다. 위치정보는 총 이동거리의 중간을 0으로 하고 좌를 음으로 우를 양으로 하여 표현한다. 한 운동주기 동안 속도가 0이 되는 구간이 두 번 발생하게 되며 이 때 각 상의 유기기전력 또한 모두 0이 되게 된다.

2.2 상별 유기기전력 분석

발전기를 전동기로 제어하는 원리는 매우 간단하다. 발전기의 이동자가 움직이면 기전력이 유기되는데 만일 유기기전력과 같은 방향으로 전류가 흐른다면 발전기가 전기에너지를 출력하는 발전 동작상태가 되며 이동자에는 운동방향에 반대 방향으로 힘이 작용한다. 따라서 유기기전력과 반대 방향으로 전류를 흘려준다면 발전기에 전기에너지가 입력되면서 이동자의 운동방향으로 힘이 작용하는 전동기 상태가 된다. 여기서 문제는 유기기전력의 방향을 알아야 한다는 점이다. 유기기전력의 방향은 이동자의 위치와 운동방향에 따라 달라진다. 그림 2에서 이동자가 같은 위치에 있더라도 운동방향에 따라 출력전압의 극성이 달라짐을 볼 수 있다.

상을 이루는 코일을 하나의 등가 코일로 간주하면 코일을 쇄교하는 등가 자속밀도와 속도의 곱으로 표현된다. 즉.

$$e_U(x) = kB_U(x)v$$
$$e_V(x) = kB_V(x)v \qquad (1)$$
$$e_W(x) = kB_W(x)v$$

식(1)에서 속도의 극성이 양으로 고정되어 있으면 기전력의 극성이 곧 등가 자속밀도의 극성과 같아진다. 따라서 이동방향이 일정한 구간의 출력전압을 측정하면 이동자에 쇄교하는 자속밀도의 극성을 이동자 위치 별로 알 수 있게 된다.

	이동자 위치 (mm)			
	-23~-10	-10~0	0~10	23
kB_U	-	-	-	+
kB_V	+	+	-	-
kB_W	-	+	+	+

표 1. kB극성 테이블

표 1는 이동자가 양의 이동방향을 가질 때의 출력전압을 분석하여 얻은 자속밀도 분포를 간단하게 보여준다. 발전기에 자속밀도와 같은 극성의 전류를 투입하게 되면 전동기 상태로 운전할 수 있게 된다. 이 kB극성 테이블은 전동모드 제어 시 상별 전류 지령을 결정할 때 사용된다.

3. 전동모드 제어

3.1 전동모드 시스템의 구성

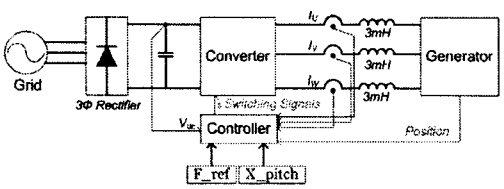

그림 3. 전동모드 시스템의 구성도

그림 3는 전동모드 실험을 위한 실험 시스템의 구성도이다. 발전기 내부 인덕턴스가 1mH이면 스위치를 이용한 전류제어 시 스위치 On-Off에 의한 전류 상승폭은 스위칭주파수가 10kHz 이고 300V전압이 인가되면 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta i = \frac{V}{L} \times \Delta t = \frac{300}{1 \times 10^{-3}} \times 100 \times 10^{-6} = 30[A] \qquad (2)$$

식(2)는 스위칭 주기 동안 발전기 양단에 300V가 인가된 상태에서 스위치가 On상태로 고정되어 있을 때 증가되는 전류의 양이다. 30A의 상승전류는 전류제어가 어렵기 때문에 발전기 앞단에 3mH 리액터를 추가하여 전류 상승폭을 감소하였다.

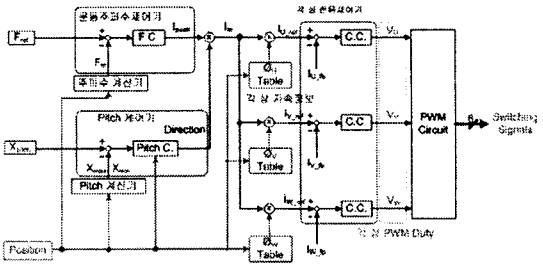

그림 4. 전동모드 제어기

그림 4는 전동모드 제어기 구성도를 나타낸다. 컨트롤러는 고속으로 제어처리 가능한 2811DSP (digital signal processor)를 사용하였다. 사용자가 전동모드 시 이동자의 운동주파수 지령(F_{ref})과 이동자의 최대이동거리(X_{pitch})를 지령을 입력하면 발전기에 부착된 선형엔코더에서 보내는 위치정보로 현재 최대이동거리(pitch)와 운동주파수를 계산하여 상위 전류지령(I_M)을 결정하고, kB극성 테이블에서 각 상당 현재 위치의 kB극성을 파악하여 각 상에 흘려야 할 전류의 지령을 결정한다.

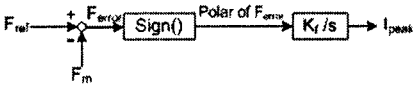

그림 5. 변형된 적분제어기

그림 5는 운동주파수 제어기와 최대이동거리 제어기에 사용된 일종의 적분제어기이다. 이 제어기들은 매 운동주기에 동작하는 상위제어기이며, 지령 값과 실제 값들의 차이인 에러 값을 구하고, 에러의 극성을 고정된 제어기 이득에 곱한 뒤 적분하여 제어기 출력으로 내보낸다.

최대이동거리 제어기는 break point의 위치를 변화시켜 최대이동거리를 제어한다. 여기서 break point는 전류에 의한 힘의 방향을 바꾸는 이동자 위치를 말한다. 이동자에는 관성력과 마찰력이 작용하여 전류에 의한 힘의 방향이 전환되더라도 이동방향은 금방 전환되지 않는다. Break point를 지나 전류에 의한 힘의 방향이 바뀌면 제동현상이 발생하고 이후 관성력보다 전류에 의한 힘이 커지면 이동방향이 바뀌게 된다. 이 최대이동거리 제어기는 운동 주파수 제어기와 동일한 구조이다.

전류제어기는 10kHz 제어주기를 가지는 PI제어를 사용하였다. 전류 제어는 한 상의 전류극성을 원하는 크기로 변화시켜야 하기 때문에 각 상의 전류가 서로 독립적이어야 한다. 하지만 기존의 3상 전류제어의 경우 각 상이 독립적이지 못하여 한 상의 전류의 크기와 극성을 바꿀 때 다른 상의 전류도 영향을 받게 된다. 따라서 전동모드 시스템은 각 상의 독립적인 단상 컨버터를 구성하여 각 상 독립제어를 사용하였다.

3.2 전동모드 실험 결과

그림 6과 그림 7은 실험으로 사용된 선형발전기와 전동모드 제어를 위해 제작된 컨버터의 사진이다.

그림 6. 선형발전기 사진

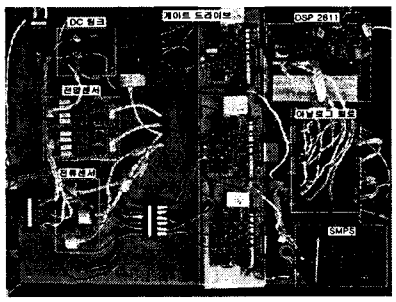

그림 7. 전동모드 컨버터 사진

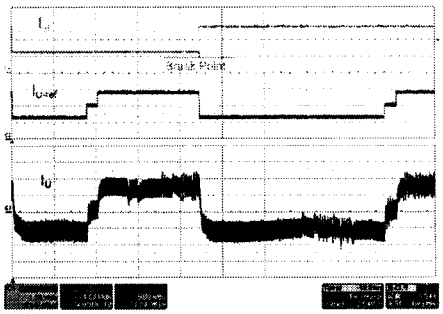

그림 8. 전동모드제어기 실험파형

그림 8은 운동주파수 제어기 지령이 10Hz이고 최대이동거리 제어기 지령이 23mm으로 설정되었을 때 상위제어기 출력인 상위전류지령(I_M)과 kB극성을 적용한 U상 전류지령(I_{U_ref}), 그리고 이에 따라 발전기에 입력된 U상 전류(I_U)를 나타낸다. 전류제어기의 PI제어 이득은 반복적인 실험을 통하여 설정하였다. 실험 결과 이동자의 이동속도가 빠른 구간에서 전류가 흔들리는 현상이 나타났으나 전동모드에 크게 영향을 주지 않아 세밀한 설정은 하지 않았다.

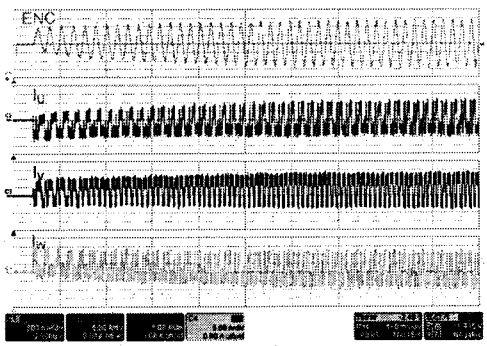

그림 9. 전동모드 시 위치정보와 각 상 투입 전류

그림 9는 전동모드의 구동부터 안정화되는 동안의 위치정보와 상별 전류를 나타낸다. 전동모드 초기 설정은 20mm와 7Hz이며 최종 도달 지령은 23mm와 10Hz이다. 이는 엔진의 연료 폭발이 연속으로 발생할 수 있는 조건의 운전이다.

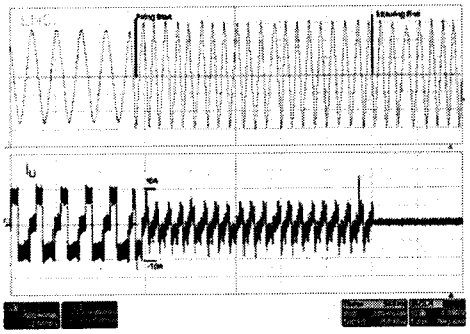

그림 10. 전동모드와 발전모드 전환 실험

그림 10는 전동모드 동작 중 엔진의 수소 연료를 폭발시켜 전동모드에서 발전모드로 전환할 때 이동자의 위치정보와 U상의 전류를 나타낸다. 제어기는 운동주파수가 15Hz이상으로 검출되면 발전모드로 인식하며 발전모드의 안정화된 동작을 위해 1분간 같이 동작하게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 선형발전기의 초기 구동 방법으로 PCS를 사용하는 방법을 연구하여 기존의 초기 운전방식이 필요로 하는 부가적 시스템을 없앴다. 이로 인해 발전기 운전 시 적용되던 기계적인 마찰 손실이나 전체 시스템의 무게 증가, 추가적인 전력 사용 문제를 해결하게 되었다. 이로 인해 전체 시스템의 효율향상 효과를 기대할 수 있게 되었다.

현재 5kW급 수소연소 선형 발전 시스템에도 적용되어 실험이 진행 중이며 이를 더 개선하여 발전모드일 때도 동작하여 선형운전으로 인해 발생하는 진동현상을 줄일 수 있는 방안에 대해 검토 중이다.

본 연구는 고효율 수소에너지 제조·저장·이용 기술개발 사업단의 21세기 프론티어 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

[1] 김종원 · 심규성 · 한상도 저, [특집:신에너지기술] 수소에너지 기술 현황, 전력전자학회, 전력전자학회지 제6권 제2호, 2001. 4, pp. 35~41.

[2] Waqas M. Arshad, Thomas Backstrom, Peter Thelin and Chandur Sadarangani : "Integrate free-piston generators : an overview," Electrical Vehicle Symposium, 2002

[3] William R. Cawthorne : "Optimization of a brushless pe r-manent magnet linear alternator for use with a linear inte r-nal combustion engine," West Virginia University, 1999