

휴대용 발광 장치 충전용 영구자석형 소형 선형 발전기 특성 해석

최호용, 정상용, 정현교
 서울대학교 전기공학부 전기역학연구소

Analysis of Permanent Magnet Linear Generator
 for Charging the Battery of Mobile Lighting Apparatur

Ho-Yong Choi, Sang-Yong Jung, Hyun-Kyo Jung
 School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 본 논문은 휴대용 발광 장치 충전을 위한 영구자석형 선형 발전기의 특성 해석을 담고 있다. 공간고조파법을 이용해 자계 해석 및 설계를 하였다. 발생 전압 및 저항에 따른 특성 비교와 충전 시간 측정을 포함하고 있으며, 전기자 반작용 해석 결과도 포함되어 있다.

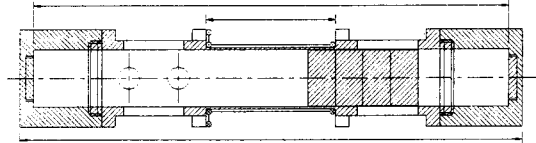


그림 1. 선형 발전기를 갖춘 휴대용 발광 장치

1. 서 론

최근 들어 사회적으로 환경친화적 산업과 기술의 중요성이 점점 강조되고 있다. 특히 휴대용 기기에 사용되는 배터리 소비의 증가에 따라 환경 오염의 위험성이 높아지고 있다. 특히, 사용되는 충전용 배터리는 리튬 등의 오염 물질을 포함하고 있다. 비록, 재충전이 가능한 가역 전지가 있지만 이 역시 수명에 한계가 있어 결국 폐기를 해야만 한다. [1],[2]

본 논문에서는 가역적 충전재료를 이용하는 배터리보다 더 효율적인 새로운 충전 시스템을 제안한다. 영구자석형 선형 발전기는 작은 크기에도 일상 생활 속에서 고출력의 전력을 쉽게 생산할 수 있어 자가발전 랜턴, 휴대 전화, 휴대용 게임기 등 다양한 분야에 응용, 적용될 수 있다. 특히, 이 발전기는 직접 손으로 흔들어 줌으로써 필요한 때 원하는 전력을 생산할 수 있고, 인위적으로 흔들지 않더라도 일상 활동에서 인체의 작은 움직임을 이용해서도 발전이 가능하다.

본 논문에서는 최소 3.3V의 전압을 필요로 하는 LED로 구성된 휴대용 발광장치에 사용되는 선형 발전기의 특성을 나타낸다. 이 발전기는 몇 개의 영구자석이 포함된 원통형 형태의 구조를 가지고 있고, 발생된 전력은 충분한 용량의 커패시터에 저장된다. 이동자 진동시 전기자 반작용이 매우 크므로 이동자의 관성이 매우 커야하며, 또한 자기적 민감도가 큰 외부의 다른 기기에 자기적 영향을 주지 않아야 하므로, 외부 누출 자계가 없어야 한다. 따라서 이동자의 중량, 관성 특성 및 자기장 차폐 역시 설계에 고려되어야 한다.

본 논문에는 공간고조파법을 이용한 해석적인 방법과 유한요소법 및 실험을 통해 해석해의 엄정성을 나타내었다. 전압 평활화, 발생 전압과 권선 저항에 따른 특성 및 충전 시간 측정도 포함되어 있으며, 전기자 반작용 해석 결과도 나타내었다.

2. 본 론

2.1 휴대용 발광 장치

그림 1은 영구 자석형 선형 발전기를 장비한 랜턴의 단면도이다. 이동자는 최대 표면 자속 밀도가 0.55[T]이고 축방향으로 자화된 4개의 영구 자석으로 이루어져 있다. 최대 표면 자속 밀도가 0.21[T]인 자석이 반발력을 주기 위해서 한쪽 끝을 차단하고 있다. 권선은 744[turns]로 감겨 있고 권선경은 예폭시 물딩을 포함하여 0.55[mm]이다. 코일 폭은 적당한 기전력 파형을 얻기 위해 자석과 같은 50[mm]이다.

2.2 공간고조파법을 이용한 자계 해석
 본 논문에서는 제한된 자석 배열 정보를 포함하는 등가 자화 전류 밀도를 적용한 공간고조파법을 이용해 발전기의 자기 특성 해석을 수행하였다. [3],[4]
 영구자석의 등가 자화 전류 밀도는 다음과 같다.

$$J_m(x) = -\frac{n\pi}{\tau_e} H_c h_m \sum_n a_n \cos \frac{n\pi}{\tau_e} x \quad (1)$$

$$a_n = \frac{2}{\tau_e} \int_{-\frac{\tau_e}{2}}^{\frac{\tau_e}{2}} (\pm) H_c h_m \sin \frac{n\pi}{\tau_e} x dx$$

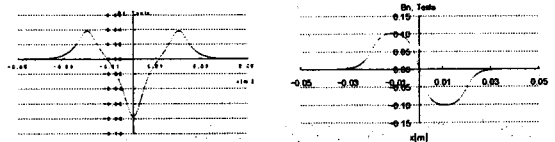
τ_e : 변형된 반파장

따라서 자석에 의한 자계 해석 일반화는 다음과 같이 유도된다.

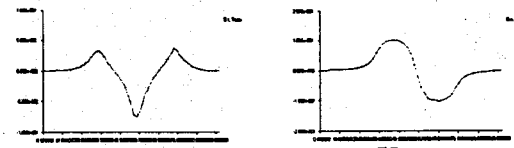
$$A_m(x) = \mu \sum_n (A_n e^{nK_m x} + B_n e^{-nK_m x} + \frac{\tilde{J}_m}{n^2 K_m^2}) \cos nK_m x \quad (2)$$

$$K_m = \frac{n\pi}{\tau_e} \quad \tilde{J}_m \text{은 } J_m(x) \text{의 크기}$$

그림 2의 (a)는 식(2)에서 유도된 두 영구 자석의 자장 밀도이며, (b)는 유한요소법으로 풀이한 결과이다. 이 두 그래프는 거의 일치하며 따라서 선형 발전기에서 공간고조파법에 의한 해석의 엄정성을 증명할 수 있다.



(a) 공간고조파법에 의한 결과



(b) 유한요소법에 의한 결과
 그림 2. 선형 발전기의 자속 밀도

2.3 기전력 해석

움직이는 자석이나 권선에는 이동 속도에 따른 기전력이 발생한다. 이동자가 선형으로 진동함에 따라 권선의 쇠교 자속이 변화하게 되고, 기전력이 발생하여 전력 전달이 이루어지게 된다. 기전력의 최대값은 권선이 자석의 중앙에 위치할 때 발생하게되며 이동자의 속력이 클수록 최대 기전력값은 증가한다. 발전기에 부하가 연결되면 전기자 반작용에 의해 이동자의 움직임을 방해하는 방향으로 힘이 발생한다. 따라서 이동자는 전기자 반작용을 이길 수 있도록 큰 기계적 관성을 가져야만 한다.

기전력 계산은 각각의 권선에 대해 이루어진다. 각각의 권선에 대한 쇠교 자속을 구한 후 모든 권선에 대해서 더한 후에, 이 쇠교 자속을 시간에 대해 미분하면 총 기전력 값을 구할 수 있다. 계산 시간이 오래 걸리기는 하나, 정확한 결과를 유도할 수 있다. 유한요소법에서는 공간고조파법에서 권선에 해당하는 모든 요소들의 중앙 요소들 사이 영역의 등가 쇠교 자속을 식 (3)과 같이 노드의 넓이로 나누어 주어야 한다. [5]

$$\phi = \frac{d}{S} \sum_e a_e \cdot (A_1^e + A_2^e + A_3^e) \cdot \Delta^e \quad (3)$$

S : 권선의 전체 면적, d : 권선의 길이
 $a = \pm 1$ (counterpart), Δ^e : 요소의 면적

2.4 전압 평활화 회로

위에서 제시된 선형 발전기는 정류 회로에서 일반적으로 사용되는 전압 평활화 회로에 연결된다. 그림 3은 이 회로도도를 나타내고 있으며, 충전 커패시터 C1의 용량은 2F이다. 이 회로가 발전기에 연결되면 발광 장치의 부하인 LED가 연결되었을 때의 전력 발생 특성을 알 수 있으며, 전기자 반작용 문제 역시 발생할 수 있다.

그림 4는 병렬 연결된 선형 발전기에 부하를 연결했을 때 전압 평활화의 결과를 나타내고 있다. 부하에 필요한 최소 전압은 3[V]이며 그림 4의 결과는 저항 양단에서 측정된 값들이다. 리플이 없는 평활화 된 전압이 선형 발전기에서 부하로 전력을 전달하는 데 효율적이다. 따라서 선형 발전기에서 시간에 따라 일정하도록 원하는 역기전력 파형을 얻기 위해서는 권선과 자석의 위치 및 정렬에 초점을 맞추어야 한다.

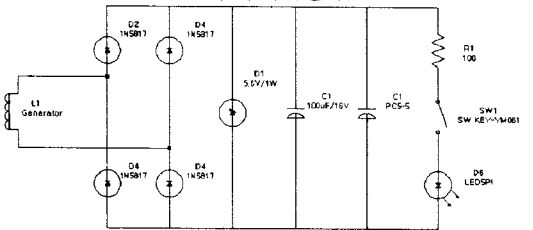
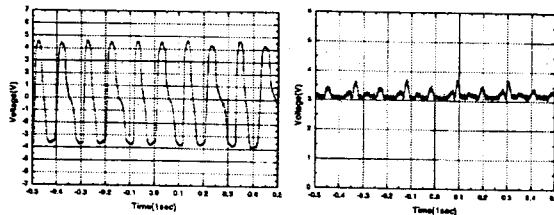


그림 3. 선형 발전기와 연결된 회로도



(a) 평활화 이전의 전압 (b) 평활화 이후의 전압

그림 4. 전압 평활화 결과

2.5 충전 및 방전 시간

휴대용 기기에서의 충전 및 방전 시간은 배터리의 수명과 깊은 관계가 있으므로 매우 중요한 요소이다. 본

논문에서는 휴대용 발광 장치에만 적용되었으나, 만약 충분한 방전 시간이 보장된다면 어떠한 휴대용 기기에도 적용할 수 있다.

그림 5는 충전, 방전 시간 및 재충전 시간을 나타낸 그래프이다. 배터리가 완전히 방전된 상황인 0[V]에서부터 완전 충전 전압인 5[V]까지의 충전 시간은 26 [sec]이다. LED의 최소 동작 전압인 3.3[V]까지의 방전 시간은 충전 시간에 비해 매우 긴 17[min] 정도로 짧은 충전 시간에 비해 긴 동작 시간을 나타내고 있다. 3.3[V]에서부터 5.2[V]까지의 재충전 시간은 겨우 12[sec]이다. 즉, 랜턴을 사용 중에 불빛이 약해졌을 경우, 짧은 시간동안만 흔들어 발전을 하면 다시 충분한 밝기로 복원될 수 있다.

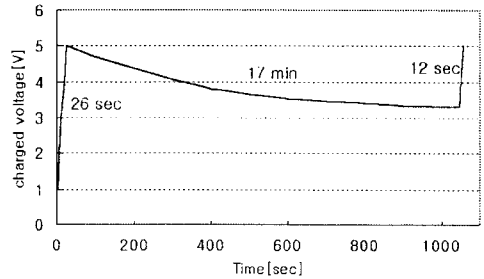


그림 5. 충전 및 방전 시간

휴대용 발전기로서 짧은 충전 시간을 확보하는 것이 중요한데, 본 선형 발전기의 경우 충전 시간은 저항과 무부하시 역기전력의 크기와 관계가 있다. 충전 회로에서 충전 전압과 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_c(t) = E_0(1 - e^{-t/RC}) \quad (4)$$

$$i_c = \frac{E_0}{R} e^{-t/RC} \approx \frac{E_0}{RC} t \quad (5)$$

E_0 : 무부하시 최대 역기전력값

R : 권선 저항

C : 충전 커패시턴스

충전 초기의 전압의 증가량은 E_0/R 값에 비례한다.

즉, E_0/R 값이 크면 초기의 충전 속도가 빠르다. 시간이 지나면 충전 속도는 느려지게 된다. 초기에 커패시터는 단락 상태처럼 동작하고 큰 전류가 흘러 충전 속도가 빠르지만, 시간이 지나 커패시터의 충전 전압이 높아지기 시작하면 발생하는 역기전력과의 차이가 작아져 전류량이 작아지고 충전 속도도 느려진다. 따라서 지속적인 충전 속도의 확보를 위해서는 무부하 역기전력값인 E_0 값이 충분히 커야 한다.

일반적인 경우 E_0/R 값이 큰 경우에 짧은 충전 시간을 보장할 수 있지만, 항상 성립하지는 않는다. 그림 6는 두 가지의 서로 다른 발전기 모델에 대해 충전 시간을 나타낸 그래프이다. 충전 초기에는 4.2Ω 모델이 E_0/R 값이 크므로 충전 속도가 빠르다. 그러나 E_0 값이 작음으로 인해 시간이 지날수록 충전 속도가 느려져 5V까지의 충전 시간을 비교하면 8.4Ω 모델이 E_0/R 값이 더 작음에도 불구하고 충전 시간이 짧다. 이러한 결과들을 기초로 휴대용 선형 발전기의 빠른 충전을 위해서 설계 시 큰 E_0/R 값과 함께 E_0 값 자체도 클 것이 요구됨을 알 수 있다.

E_0 나 R 값은 공극 길이, 자석 폭, 코일경이나 높이 등 설계 변수에 따라 달라지게 된다. 그림 7은 최종적으로 선택한 설계 모델이다.

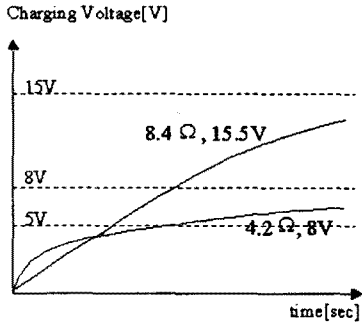


그림 6. 두 가지 모델의 충전 시간 비교

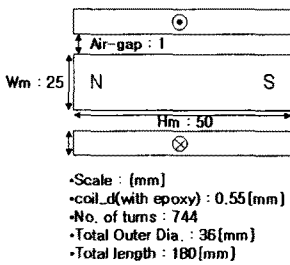


그림 7. 선형 발전기의 최종 설계 모델

Experiments

- R = 7[Ω]
- Weight = 410[g]
- No load voltage = 17[V]
- E/R = 2.43
- Charging time(2F, 5.4V)
 - 1[V] : 3[sec]
 - 2[V] : 7[sec]
 - 3[V] : 12[sec]
 - 4[V] : 19[sec]
 - 5[V] : 26[sec]

2.6 전기자 반작용 해석

충전 시 충전 회로에서 부하가 걸리게 되면 역기전력에 의해 권선에 전류가 흐르게 되고, 발전기의 이동자는 이동하려는 방향과 반대 방향으로 힘을 받게 된다. 발전기에서 전기자 반작용은 피할 수 없는 현상이며, 설계시 반드시 고려되어야 할 사항이다.

선형 발전기에서 전기자 반작용의 영향을 계산하는 과정은 다음과 같다. 우선, 기계 방정식으로부터 이동자의 위치를 계산한다. 두 번째로 공간고조파법이나 유한요소법을 이용해 자계 해석을 한다. 이 결과를 이용해 역기전력을 구할 수 있다. 다음으로 역기전력에 의한 전류를 포함하여 자계 해석을 한 후, 이 결과로부터 전기자반작용에 의한 힘을 응력법을 이용해서 구한다. 이제 다시 기계방정식을 이용해 이동자의 다음 위치를 구하고 위의 과정을 반복한다. 이동자에 작용하는 힘의 관계를 나타내는 기계 방정식은 다음과 같다.

$$ma = F_{ex} + F_{ar} + F_{fr} \quad (6)$$

m : 이동자의 질량, a : 이동자의 가속도
 F_{ex} : 외력, F_{ar} : 전기자반작용 힘
 F_{fr} : 마찰력

$i+1$ 번째 반복시 이동자의 위치와 속도는 다음과 같다.

$$x_{i+1} = x_i + v_i t + a_i t^2 \quad (7)$$

$$v_{i+1} = v_i + a_i t \quad (8)$$

x_i : i 번째 반복시 이동자의 위치
 v_i : i 번째 반복시 이동자의 속도
 a_i : i 번째 반복시 이동자의 가속도

마찰력을 무시하면 이동자의 가속도는 식(6)으로부터 구할 수 있고 이를 식(7),(8)에 대입하면 매 반복시마다 전기자 반작용이 고려된 이동자의 위치를 계산할 수 있다.

그림 8은 이동자가 한쪽 끝에서 힘을 받아 반대방향으로 이동한 경우 전기자 반작용을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 역기전력 해석 결과를 비교한 그래프이다. 전기자 반작용이 고려되지 않은 경우 역기전력 파

형은 정현파로 나타나지만, 전기자 반작용을 고려한 경우 이동자의 움직임과 반대 방향으로 힘이 작용하므로 이동자의 속도도 줄어들고, 역기전력의 최대값 역시 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 전기자 반작용을 이기기 위해서는 이동자의 관성을 키워야 한다.

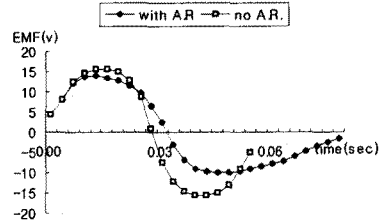


그림 8. 전기자 반작용 해석 결과

3. 결 론

본 논문에서는 휴대용 발광 장치 충전을 위한 영구 자석형 선형 발전기의 특성 해석을 하였다. 제안된 선형 발전기를 이용하여 실생활에 이용 가능한 충전 및 방전 성능을 확보할 수 있었다. 선형 발전기는 휴대용 발광 장치 외에 다른 휴대용 장치 등에도 적용될 수 있다.

공간고조파법과 유한요소법을 이용하여 자계 해석과 역기전력 계산을 수행하였다. 두 방법으로 계산된 자속 밀도와 역기전력 결과는 거의 일치함을 확인할 수 있어, 해석 결과의 엄정성을 증명할 수 있다. 실제 모델인 발광 장치에 적용하여 발생 전압 및 권선 저항에 따른 특성, 전압 평활화 결과, 충전 시간 측정 실험 결과가 포함되어 있으며, 전기자 반작용을 고려한 해석도 수행하였다.

앞으로는 전기자 반작용에 관한 실험 결과와의 비교와 또다른 기기에 적용 가능한 새로운 구조의 영구자석형 선형 발전기의 실용화를 수행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Fedrto Caricchi, Fabio Crescimbi, Onorato Honorati, Giulia Lo Bianco, Ezio Santini, "Performance of coreless-winding axial flux permanent-magnet generator with power output at 400Hz, 3000e/min", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 34, NO. 6, Noember, 1998
- [2] C.B. Williams and R. B. Yates, "Analysis of a micro-electric generator for Microsystems", Proc. of The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors IX, pp369-372, Stockholm, Sweden, June 1995
- [3] Sang-Yong Jung, Jang-Sung Chun, Hyun-Kyo Jung, "Performance evaluation of slotless permanent magnet linear synchronous motor energized by partially excited primary current", Proc. of biennial IEEE conference on Electro magnetic field computation, pp399-402, Milwaukee, USA, June, 2000
- [4] Sang-Yong Jung, Jang-Sung Chun, Hyun-Kyo Jung, "Analysis of end-effect of permanent magnet linear synchronous motor energized by partially excited primary current", Proc. of international conference on electric machines, Vol. 1, pp333-337, Espoo, Finland, August, 2000
- [5] Z. Q. Zhu, David Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part I : open-circuit field", IEEE Tans. On Magnetics, Vol 29, No. 1 January 1993