

최적 전류파형제어를 통한 브러시리스 DC 발전기의 출력밀도 최대화에 관한 연구

論 文

53B-7-4

Power Density Maximization of the Brushless DC Generator by Controlling the Optimal Current Waveform

李 衡 雨*
(Hyung-Woo Lee)

Abstract - This paper presents an advanced control technique for power density maximization of the Brushless DC (BLDC) generator by using the linear tracking method. In a generator of given rating, the weight and size of the system affect the fuel consumption directly. Therefore, power density is one of the most important issues in a stand-alone generator. BLDC generator has high power density in the machine point of view and additional increases of power density by control means can be expected. Conventional rectification methods cannot achieve the maximum power possible because of non-optimal current waveforms. The optimal current waveform to maximize power density and minimize machine size and weight in a nonsinusoidal power supply system has been derived, incorporated in a control system, and verified by simulation and experimental work. A new simple algebraic method has been proposed to accomplish the proposed control without an FFT which is time consuming and complicated.

Key Words : BLDC generator, Linear tracking method, Non-sinusoidal power supply system, Power density maximization, Zero-sequence elimination

1. 서 론

최근, 전기에 대한 수요가 빠르게 급증하고 있다. 정부에서 새로운 발전소를 짓는다고 할지라도, 공급량은 여전히 부족하며 그러한 발전소를 계획하고 건설하는 데에도 상당한 시간과 자본이 요구되어진다. 따라서 요즘에 들어 교외뿐만 아니라, 도심지에서도 독립형 자가 발전기의 이용이 필수 불가결하다. 자가발전기의 주요 관심사는 의심할 여지없이 주어진 발전기의 발전 용량에 있어서의 최대출력밀도이다. 다시 말해서, 동급 용량에서의 초소형화와 초경량화가 가장 중요한 요인이다[1]. 본 논문에서 제안된 발전기의 고효율 밀도를 위한 제어 기술은 소용량 발전소, 배전시설이 없는 교외 시설의 전력공급장치, 그리고 특히 소형화와 경량화가 필요한 일반 자동차, 전기자동차(Electric Vehicle), 하이브리드 전기자동차(Hybrid-Electric Vehicle)와 같은 교통수단 등, 다양한 곳에 적용되어질 수 있다.

여러 가지 발전기 중에서도 브러시리스 DC (BLDC) 발전기가 출력밀도를 증대시키기에 가장 좋은 발전기중 하나라 할 수 있다. 다른 발전기와 비교하여, BLDC 발전기는 기기 내부에 자력원(Magnetic source)을 가지고 있으므로 무게가 가볍고, 구조가 조밀하며 유지보수가 용이하다는 장점을 가지고 있다[2]. 이와 같은 기존의 BLDC 발전기의 구조적 장점과 더불어, 최적제어를 통하여 출력밀도의 추가적인 증대를 기대할 수 있으며 이는 결과적으로 발전기의 무게와 체적의

상당한 감소를 이룰 수 있다.

본 논문은 능동 전력 스위치를 사용하여 전류의 스펙트럼을 제어함으로써, 기기의 설계 변경 없이 주어진 용량의 기기에 대한 BLDC 발전기의 크기와 무게를 최소화하고 출력밀도를 최대화하는 새로운 제어기술을 제시한다. 발전된 전력은 DC 부하사이의 배터리에 저장되어지며, 출력 전압의 조정(PI 제어)은 상전류 제어(히스테레시스 제어)와 더불어 동시에 이루어진다. 본 논문에서 제시된 최적 제어 기술은 일반적인 회전형 발전기뿐만 아니라 현재 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 사용되어지는 선형 왕복운동 발전기에도 적용이 가능하며, 또한 단상뿐만 아니라 다상 발전기에도 폭 넓게 응용되어 질 수 있다.

2. BLDC 발전기의 구조 및 특성

BLDC 발전기는 기기안에 영구자석을 가지고 있는 일종의 영구자석형 발전기이다. 그림 1에서 보여진 바와 같이, 영구자석을 이용함으로써 직류기기에서의 자속 공급을 위해 사용되어지던 브러시와 정류자편이 필요하지 않다. 따라서, 이러한 부품에 대한 추가적인 유지보수가 요구되지 않는다. 또한, 계자권선이 영구자석으로 대체됨으로써, 권선의 동손에 의한 줄열이 존재하지 않으며, 고정자는 와류손을 줄이기 위하여 적층구조를 사용한다.

그림 1은 4극 3상 BLDC 발전기의 단면도를 나타낸다. 회전자가 회전함에 따라, 그림 2에서 보는 바와 같이 고정자 권선에 사다리꼴의 기전력(EMF)이 유기된다. 이러한 비정현파적인 기전력은 기기의 집중권과 공극에서의 구형파 자속 분포에 의한 것이다[3].

* 正 會 員 : 美 코넬大 理論應用力學科 客員研究員 · 工博

接受日字 : 2004年 3月 6日

最終完了 : 2004年 5月 28日

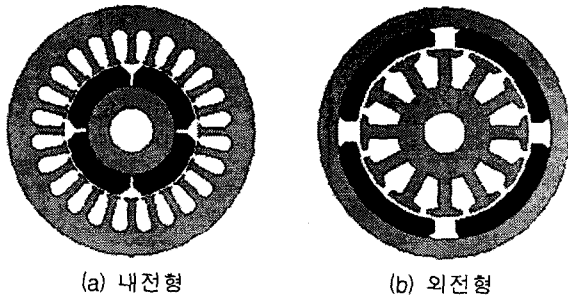


그림 1 BLDC 발전기의 단면도
Fig. 1 Cross sectional view of the BLDC generator

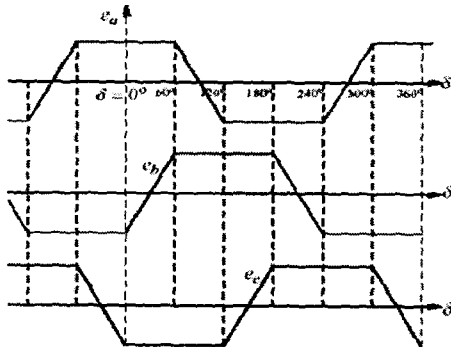


그림 2 BLDC 발전기의 3상 유기 기전력
Fig. 2 Three-phase induced EMF of the BLDC generator

이와 반대로 영구자석형 동기발전기는 정현파 권선구조와 공극에서의 정현파 자속 분포에 의하여 정현파적인 기전력을 가지고 있다. 이러한 비정현파적인 기전력의 파형으로 인하여, BLDC 발전기는 영구자석형 동기발전기와 비교하여 약 15[%] 가량 더 높은 출력밀도를 가지고 있다[4].

3. BLDC 발전기의 고출력밀도를 위한 최적제어기술

3.1 기본 원리

3상 BLDC 발전기의 유기기전력은 기기의 설계와 구조에 의하여 사다리꼴 파형이며 정현파가 아니므로 고조파 성분을 포함하고 있다. 잘 알려진 바와 같이, 전기 출력은 전압과 전류의 각 고조파의 곱이다[5]. 그러므로 출력을 계산함에 있어 모든 고조파 성분이 고려되어야 한다. 3상 BLDC 발전기에

있어서, 유효(평균)전력은 (1)과 같으며, 각 상의 전압과 전류는 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{avg} &= \frac{1}{T} \int_0^T e(t)i(t)dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T \{e_a(t)i_a(t) + e_b(t)i_b(t) + e_c(t)i_c(t)\}dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T e_a(t)i_a(t)dt + \frac{1}{T} \int_0^T e_b(t)i_b(t)dt + \frac{1}{T} \int_0^T e_c(t)i_c(t)dt \\
 &= \frac{3}{T} \int_0^T e_a(t)i_a(t)dt \tag{1}
 \end{aligned}$$

여기서, 대문자 E와 I는 전압과 전류의 각 고조파의 크기를 나타내며, ϕ_n 은 전압과 전류의 각 고조파 사이의 위상각을 나타낸다. (2)에서 보여진 바와 같이, 상 전류는 3의 배수의 고조파 성분을 포함하지 않는다. 이는 전류가 제로 시퀀스를 포함하지 않고 있기 때문이다. 제로 시퀀스는 3상 시스템에 있어서 각 상의 전류가 더해졌을 때 결과적으로 남는 성분이다. 다시 말해서, Kirchhoff의 법칙에 의하여 3상 전류의 합은 성형 결선에서 언제나 영이어야 하며, 모든 상전류에는 3의 배수의 고조파 성분이 존재하지 않는다.

또한, 출력밀도를 최대화하기 위해서는 각 상의 전압과 전류의 고조파 성분은 언제나 위상차가 없는 동상이어야 한다. 그렇지 않으면, 전기적 출력은 매 주기마다 음의 값을 가지게 되며 평균 전력은 기기가 생산할 수 있는 최대값에 도달할 수 없다. 그러므로 ϕ_n 은 언제나 영이어야 하며 평균전력은 (3)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{avg} &= \frac{3}{T} \int_0^T e_a(t)i_a(t)dt \\
 &= \frac{3}{T} \int_0^T \left[\{E_{a1} \sin(\omega t) + E_{a2} \sin 2(\omega t) + E_{a3} \sin 3(\omega t) + \dots\} \cdot \{I_{a1} \sin(\omega t) + I_{a2} \sin 2(\omega t) + I_{a4} \sin 4(\omega t) + \dots\} \right] dt \\
 &= \frac{3}{2} (E_{a1}I_{a1} + E_{a2}I_{a2} + E_{a4}I_{a4} + \dots) \tag{3}
 \end{aligned}$$

최대 출력밀도를 위한 또다른 조건은 전압과 전류의 RMS 값이다. 본 연구의 목적은 “주어진 기기의 정격안에서” 발전기의 출력밀도를 최대화 하는 것이므로, (4)에서와 같이 같이 전류와 전압의 RMS값은 언제나 정격값으로 유지되어야 한다.

$$\begin{aligned}
 e_a(t) &= E_{a1} \sin(\omega t) + E_{a2} \sin 2(\omega t) + E_{a3} \sin 3(\omega t) + E_{a4} \sin 4(\omega t) + \dots \\
 e_b(t) &= E_{b1} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + E_{b2} \sin 2(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + E_{b3} \sin 3(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + E_{b4} \sin 4(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \dots \\
 e_c(t) &= E_{c1} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + E_{c2} \sin 2(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + E_{c3} \sin 3(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + E_{c4} \sin 4(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + \dots \\
 i_a(t) &= I_{a1} \sin(\omega t - \phi_1) + I_{a2} \sin 2(\omega t - \phi_2) + I_{a4} \sin 4(\omega t - \phi_4) + \dots \\
 i_b(t) &= I_{b1} \sin(\omega t - \phi_1 - \frac{2\pi}{3}) + I_{b2} \sin 2(\omega t - \phi_2 - \frac{2\pi}{3}) + I_{b4} \sin 4(\omega t - \phi_4 - \frac{2\pi}{3}) + \dots \\
 i_c(t) &= I_{c1} \sin(\omega t - \phi_1 - \frac{4\pi}{3}) + I_{c2} \sin 2(\omega t - \phi_2 - \frac{4\pi}{3}) + I_{c4} \sin 4(\omega t - \phi_4 - \frac{4\pi}{3}) + \dots \tag{2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_{a,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_a^2(t) dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_{a1}^2 + I_{a2}^2 + I_{a4}^2 + \dots} \\
 &= \sqrt{i_{a1,rms}^2 + i_{a2,rms}^2 + i_{a4,rms}^2 + \dots} = \text{rated value} \\
 I_{a1} &= \sqrt{2i_{a,rms}^2 - I_{a2}^2 - I_{a4}^2 - \dots} \\
 e_{a,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e_a^2(t) dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{E_{a1}^2 + E_{a2}^2 + E_{a3}^2 + \dots} \\
 &= \sqrt{e_{a1,rms}^2 + e_{a2,rms}^2 + e_{a3,rms}^2 + \dots} \\
 E_{a1} &= \sqrt{2e_{a,rms}^2 - E_{a2}^2 - E_{a3}^2 - E_{a4}^2 - \dots}
 \end{aligned} \tag{4}$$

(3) 과 (4)로부터, 평균 전력은 (5)와 같다.

$$P_{avg} = \frac{3}{2} \left(E_{a1} \cdot \sqrt{2i_{a,rms}^2 - I_{a2}^2 - I_{a4}^2 - \dots} \right) + E_{a2} I_{a2} + E_{a4} I_{a4} + \dots \tag{5}$$

최적 제어 이론에 의하여, 제어대상함수의 최대치는 대상함수의 각 제어인자에 의한 편미분값이 영이 되도록 하는 조건을 만족시키는 경우 구하여진다. 따라서, 최대 출력밀도를 위해서는 각 상 전류의 고조파 크기에 의한 평균 전력의 편미분 값이 (6)에 보여진 바와 같이 영이 되어야 하며, 그 결과를 (7)에 나타내었다. 즉, 각 상 전류 고조파 크기는 각 상 전압 고조파 크기와 동일한 비를 가지고 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial P_{avg}}{\partial I_{an}} &\approx 0 \quad I_{an} : I_{a1}, I_{a2}, I_{a4}, I_{a5}, \dots \\
 \frac{\partial P_{avg}}{\partial I_{a1}} = 0, \quad \frac{\partial P_{avg}}{\partial I_{a2}} = 0, \quad \frac{\partial P_{avg}}{\partial I_{a4}} = 0, \quad \frac{\partial P_{avg}}{\partial I_{a5}} = 0, \dots &\tag{6} \\
 \Rightarrow I_{a2} = \frac{I_{a1}}{E_{a1}} E_{a2}, \quad I_{a4} = \frac{I_{a1}}{E_{a1}} E_{a4}, \quad I_{a5} = \frac{I_{a1}}{E_{a1}} E_{a5}, \dots &\tag{7}
 \end{aligned}$$

(7)을 (4)에 대입하면,

$$\begin{aligned}
 I_{a1} &= \sqrt{2i_{a,rms}^2 - I_{a2}^2 - I_{a4}^2 - \dots} \\
 &= \sqrt{2i_{a,rms}^2 - \left(\frac{I_{a1}}{E_{a1}} \right)^2 (E_{a2}^2 + E_{a4}^2 + \dots)} \\
 &= \sqrt{2i_{a,rms}^2 - \left(\frac{I_{a1}}{E_{a1}} \right)^2 (2e_{a,rms}^2 - E_{a1}^2 - E_{a3}^2 - E_{a6}^2 - \dots)} \\
 2i_{a,rms}^2 &= \left(\frac{I_{a1}}{E_{a1}} \right)^2 (2e_{a,rms}^2 - E_{a3}^2 - E_{a6}^2 - \dots) \tag{8}
 \end{aligned}$$

여기서, 함수 $e_{am}(t)$ 를 (9)와 같이 정의한다. $e_{am}(t)$ 는 유기된 상 전압으로부터 3의 배수의 고조파를 제외한 성분으로 이루어진 함수이다.

$$\begin{aligned}
 e_{am}(t) &= e_a(t) - \text{multiple of triple harmonic} \\
 &= E_{a1} \sin(\omega t) + E_{a2} \sin(2\omega t) + E_{a4} \sin(4\omega t) + \dots \tag{9}
 \end{aligned}$$

(4)와 (9)로부터, (10)을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 2e_{a,rms}^2 &= \underbrace{E_{a1}^2 + E_{a2}^2 + E_{a4}^2 + \dots + E_{a3}^2 + E_{a6}^2 + \dots}_{2e_{a,rms}^2} \\
 2e_{a,rms}^2 &= 2e_{a,rms}^2 - E_{a3}^2 - E_{a6}^2 - \dots \tag{10}
 \end{aligned}$$

(10)을 (8)에 대입하면, 기본파를 포함한 각 상전류의 고조파 크기를 (11)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \therefore \frac{I_{a1}}{E_{a1}} &= \frac{i_{a,rms}}{e_{am,rms}} \\
 \Rightarrow I_{a1} &= \frac{i_{a,rms}}{e_{am,rms}} E_{a1}, \quad I_{a2} = \frac{i_{a,rms}}{e_{am,rms}} E_{a2}, \quad I_{a4} = \frac{i_{a,rms}}{e_{am,rms}} E_{a4}, \dots \\
 \Rightarrow I_{an} &= \frac{i_{a,rms}}{e_{am,rms}} E_{an} \tag{11}
 \end{aligned}$$

따라서, 동급 정격의 3상 발전기에 있어서 고출력밀도를 위한 최적의 전류파형에 관한 식은 다음과 같다.

$$i_{abc}(t) = g \cdot e_{abc}(t) \tag{12}$$

여기서 g 는 전류 지령치의 게인값이며, 출력 전압(DC-link 전압)의 조정(PI 제어)에 사용되어진다.

(12)에 제시된 바와 같이 비정현파 시스템의 최대 출력밀도는 각 상 전류의 모든 고조파 성분과 제로 시퀀스를 제외한 유기기전력의 고조파 성분을 일치시킴으로써 이루어지며, 이 때의 전류파형이 최적임을 본 논문에서 최초로 유도하였다. 하지만, 제로 시퀀스 성분을 제외한 유기기전력의 각 고조파 성분을 알아내는 것은 매우 어려운 일이며, 일반적으로 이와 같은 스펙트럼 분석을 위해서는 FFT(Fast Fourier Transform)가 사용되어진다. 그러나 FFT는 시간이 많이 소모되며 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 FFT 없이 이 작업을 수행할 수 있는 선형 추적법(Linear Tracking Method)을 사용하였다. 이 방법은 다음에 제안된 대수적 방법에 의해 구해진, 제로 시퀀스 성분이 제거된 기전력의 파형을 전류파형이 추적제어 하는 방법이다.

3.2 제로 시퀀스의 제거

3상 BLDC 발전기의 고출력밀도를 위한 최적 전류파형을 만들기 위해서는 앞절에서 유도하였듯이 상 기전력 파형으로부터 제로 시퀀스 성분을 제거해야만 한다. 전기 출력은 각 전압과 전류의 고조파 성분의 곱에 의해 생산되어지므로 이 제로 시퀀스 성분은 전체 전기 출력에 기여하지 못한다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 Kirchhoff의 법칙에 의하여 전류의 제로 시퀀스 성분이 언제나 영이기 때문이다. 따라서 제로 시퀀스 성분을 제거한 만큼 정해진 정격 전류안에서 다른 고조파 성분을 증가 시켜야 한다.

특별한 고조파 즉, 제로 시퀀스 성분을 제거하기 위하여 (13)과 같이 간단한 대수적 방법을 제안하였다. 각 상의 기전력은 기본파를 포함한 제 1, 3, 5, ...등의 (2N-1)고조파를 가지며, 3상 기전력의 합은 (13)에서와 같이 합이 영이 되는 제로 성분과 영이 되지않고 남는 제로 시퀀스 성분으로 나뉘어진다. 또한, 제로 시퀀스 성분은 제 3 고조파의 배수이기 때문에 3상이 동일하므로 (14)와 같이 나타낼 수 있다. (14)를 (13)에 대입 하면, 제로 시퀀스 성분을 포함하지 않는 성분들이 (15)처럼 유도되어진다. 즉, 각 상의 유기기전력을 계산하거나 측정하여, 제안된 대수적 방법에 의하여 간단히 제로 시퀀스 성분이 제거된 각 상의 기전력 파형을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 e_a &= e_{a1} + e_{a3} + e_{a5} + \dots = e_{am} + e_{az} \\
 e_b &= e_{b1} + e_{b3} + e_{b5} + \dots = e_{bm} + e_{bz} \quad m=1, 5, 7, 11, \dots \\
 e_c &= e_{c1} + e_{c3} + e_{c5} + \dots = e_{cm} + e_{cz} \quad z=3, 9, 15, 21, \dots \\
 e_a + e_b + e_c &= \underbrace{e_{am} + e_{bm} + e_{cm}}_0 + \underbrace{e_{az} + e_{bz} + e_{cz}}_{\text{zero sequence}}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 e_{az} &= e_{bz} = e_{cz} = e_z \\
 \Rightarrow e_z &= \frac{1}{3}(e_a + e_b + e_c)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 e_{am} &= e_a - e_z = e_a - \frac{1}{3}(e_a + e_b + e_c) \\
 e_{bm} &= e_b - e_z = e_b - \frac{1}{3}(e_a + e_b + e_c) \\
 e_{cm} &= e_c - e_z = e_c - \frac{1}{3}(e_a + e_b + e_c)
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

그러나, 실제적으로 많은 기기 제조업자들이 발전기의 중성점을 제공하지 않기 때문에, 각 상의 기전력을 알아내기 어렵지 않으므로 선간 전압을 이용할 경우의 대수적 방법을 (16)에 제시하였다. 선간 전압은 간단히 스위치의 ON/OFF 상태, DC 링크의 전압값과 상 전류값만으로도 전압방정식을 이용하여 계산이 가능하므로, 복잡한 FFT의 사용 없이 다음식을 이용하여, 계산된 선간 전압으로부터 3상 BLDC 발전기의 고출력밀도를 위한 최적의 전류 지령치 파형을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = g \cdot \begin{bmatrix} e_{am} \\ e_{bm} \\ e_{cm} \end{bmatrix} = g \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} e_a - e_b + e_c - e_c \\ e_b - e_a + e_c - e_c \\ e_c - e_a + e_c - e_b \end{bmatrix} = \frac{g}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \\ e_{ca} \end{bmatrix}
 \tag{16}$$

4. 제안된 최적제어의 시뮬레이션 결과

고출력밀도를 위해 제안된 최적제어는 시뮬레이션을 통하여 검증되어졌다. 그림 3은 시스템 구성을 나타낸다. 기기와 회로의 모델링을 위하여 Powersim사에서 제공한 PSIM 프로그램을 사용하였으며, 컨트롤 알고리즘은 C language를 이용하였다. 일반적으로, 본 논문에서 제시한 BLDC 발전기와 같이 소용량의 발전기는 저항 부하를 사용하므로, 시뮬레이션과 실험에 있어서의 부하는 가변 저항을 사용하였다. 선간 기전력의 계산과 전류 제어를 위하여 각 상의 전류와 배터리 전압은 홀 센서를 이용하여 측정하였으며, 스위치는 IGBT를 사용하였다. 본 연구에서는 전류제어를 위하여 히스테리시스 제어를 사용하였다[6][7]. 그림 4는 각 상과 3상의 최적제어의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 유기된 기전력은 그림 4의 첫 번째 열에 보이는 바와 같이 이상적인 사다리꼴 파형으로 가정하였다. 두 번째 열은 본 논문에서 제안된 대수적 방법을 사용하여 얻어진 제로 시퀀스를 포함하지 않는 기전력을 나타낸다. 세 번째 열은 고출력밀도를 위한 최적의 전류 지령치 파형과 제어된 전류파형을 보여주고 있다. 그림 4에서 보여진 바와 같이, 고출력밀도를 위한 최적의 전류파형은 정현파와 유사하다. 하지만, 제안된 전류파형은 제로 시퀀스, 즉 제 3고조파의 배수 성분을 제외한 모든 고조파를 포함하고 있음을 주목하기 바란다.

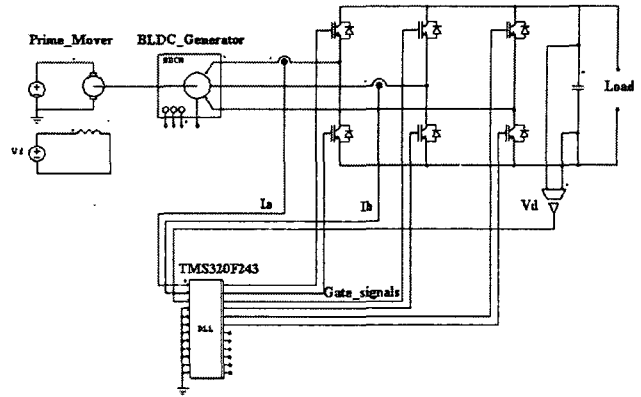
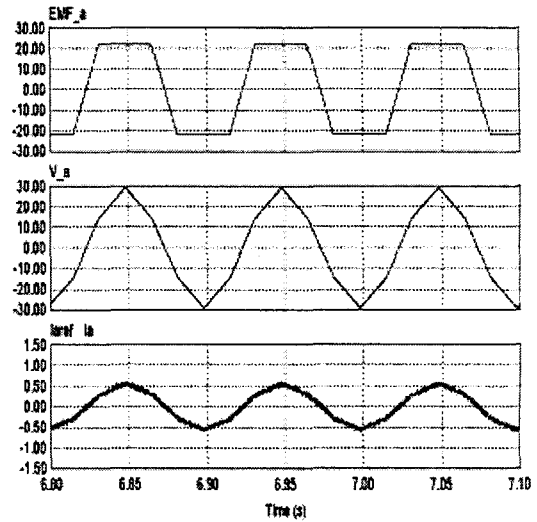
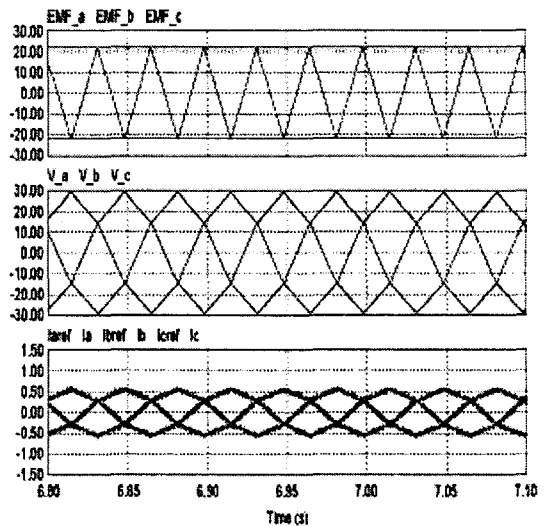


그림 3 시스템 구성
Fig. 3 System configuration of the BLDC generator



(a) 각 상의 경우



(b) 3상의 경우

그림 4 제안된 최적제어의 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation results of the proposed control (EMF :유기 기전력, V :제로 시퀀스가 제거된 유기 기전력, Iref :전류 지령치 파형, I :제어전류 파형)

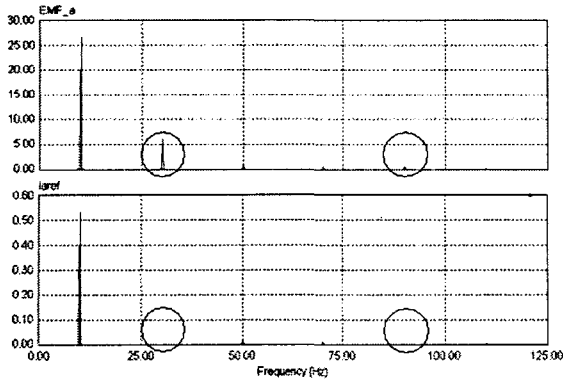


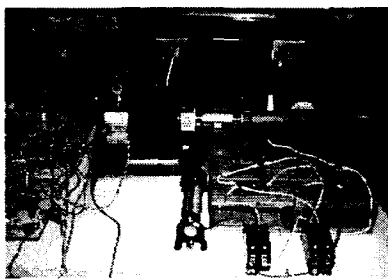
그림 5 제안된 대수적 방법을 이용한 제로 시퀀스 제거확인을 위한 주파수 해석결과

Fig. 5 Zero-sequence elimination by using the proposed algebraic method

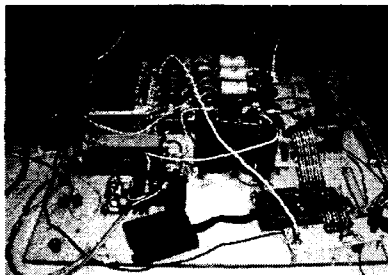
제 3고조파의 배수, 즉 제로 시퀀스의 제거여부를 확인하기 위하여, 제안된 대수적 방법에 의해 유도된 전류 지령치 파형과 유기 기전력의 주파수 분석 결과를 그림 5에 도시하였다. 기본 주파수는 10[Hz] 이고, 그림상의 원은 각각 3고조파와 9고조파 성분을 나타낸다. 그림에서 보여진 바와 같이, 제안된 대수방법에 의하여 기전력 파형에서의 특별한 고조파성분이 전류 지령치 파형에서는 제거되었음을 알 수 있다. 이는 복잡한 FFT를 사용하지 않고도, 본 논문에서 제안된 간단한 대수적 방법이 사다리꼴 유기 기전력으로부터 제로 시퀀스 성분을 완벽히 제거함을 명백히 보여준다.

5. 제안된 최적제어의 실험 결과

그림 6은 전체적인 실험 시스템이다. 그림 6.(a)의 오른쪽에 보이는 바와 같이 발전 시스템의 구동원으로서 직류 전동기를 사용하였다.



(a) BLDC 발전기와 구동원



(b) 드라이브 시스템

그림 6 실험 장치
Fig. 6 Experimental test-bed

컨버터와 컨트롤러는 그림 6.(b)와 같으며, 전체 시스템의 제어를 위하여 TMS320F243 DSP가 사용되어졌다. 그림 7은 시뮬레이션과 실험에 사용되어진 제어 알고리즘을 나타내고 있다. 주기적인 샘플링과 계산을 위하여 타이머 인터럽트 함수가 사용되어졌으며, 최적 전류파형의 구현 또한 본 인터럽트 루틴에서 수행되어진다. 실험에 쓰인 BLDC 발전기의 사양은 표 1에 제시하였으며, 3상 유기 기전력은 그림 8과 같다. 각 상은 전기각 120도 만큼 위상차가 있으며, 기전력의 파형은 기기의 구조, 권선시행, 영구자석 표면의 불균일 등으로 인하여 시뮬레이션과 달리 이상적인 사다리꼴 형태는 아니다.

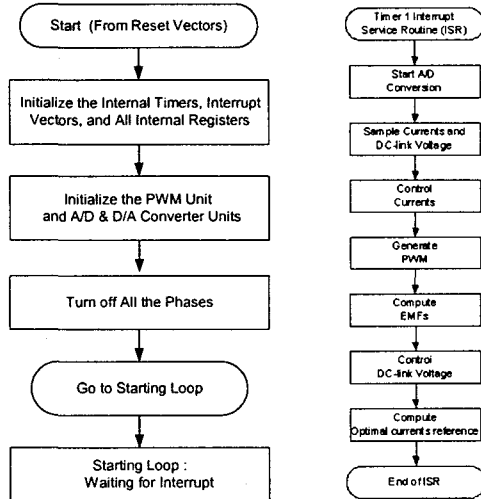


그림 7 제어 알고리즘
Fig. 7 Flowchart of the control algorithm

표 1 BLDC 발전기의 사양
Table 1 BLDC generator specification

극 수	4	상 저항	4.3 [Ohm]
상 수	3	인덕턴스	43 [mH]
출력	0.75 [kW]	결선	WYE
정격 전류	5.0 [A]	K_e	1.29 [V/rps]
정격 속도	1350 [RPM]	E_{LL}	182 [V]

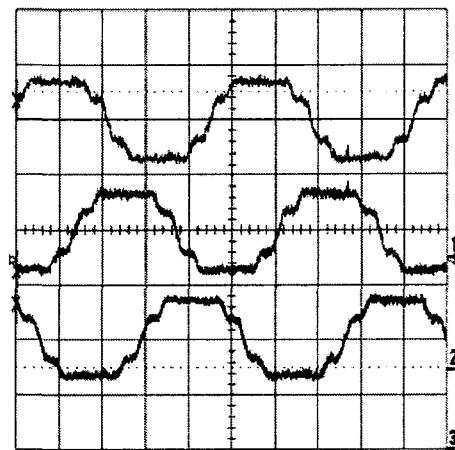


그림 8 실험 시스템의 BLDC 발전기의 3상 유기기전력
Fig. 8 Induced EMF of the test-bed BLDC generator [25V/div.][50ms/div.]

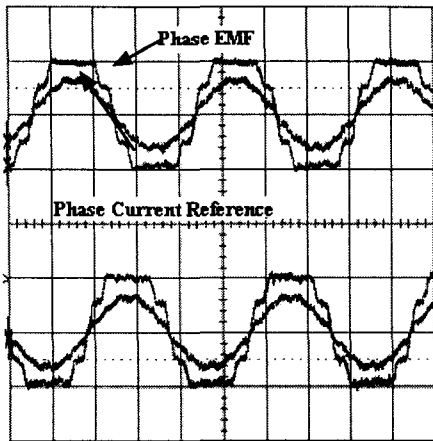


그림 9 발전기의 고출력밀도를 위한 A와 B상의 유기 기전력과 최적 전류파형[25V/div., 1A/div.][25ms/div.]

Fig. 9 Induced EMF and optimal current reference waveforms of phase A and B

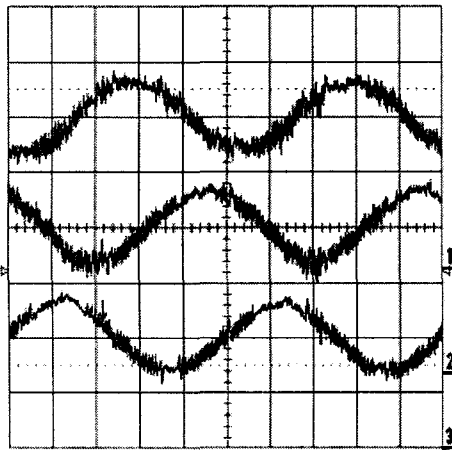


그림 10 저전력 모드에서의 제안된 방법을 이용한 각 상의 제어전류 파형[1A/div.][20ms/div.]

Fig. 10 Each phase controlled current waveform by using the proposed control in the low-power mode

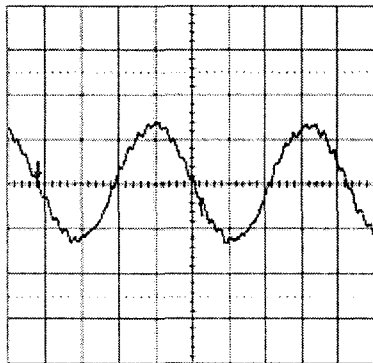


그림 11 고전력 모드에서의 제안된 방법을 이용한 제어전류 파형[5A/div.][5ms/div.]

Fig. 11 One phase controlled current waveform by using the proposed control in the high-power mode

그림 9는 오직 두 상(A상, B상)의 유기 기전력과 전류 지령치 파형을 도시하였다. 전류 지령치 파형은 시뮬레이션 결과처럼 부드럽지 않으며, 이는 실험 시스템의 BLDC 발전기의 유기 기전력 파형이 이상적인 사다리꼴 파형이 아니기 때문이다. 그러나, 제시된 전류 지령치 파형은 본 실험에 사용되어진 BLDC 발전기에 있어서의 고출력밀도를 위한 최적 전류 파형이다. 그림 10과 11은 제안된 제어방법을 적용하였을 경우의 저전력 모드와 고전력 모드시의 각 상의 전류 파형이다. 본 연구에서는 전류제어를 위하여 히스테레시스 제어를 사용하였으며, 히스테레시스 밴드는 $\pm 0.05[A]$ 이다.

표 2는 저전력 모드에서의 기존의 방법과 제안된 방법사이의 전기 출력을 비교하였다. 여기서, 전기 출력 비교시 가장 중요한 점은 RMS 전류의 값과 회전속도를 두 경우 모두 동일하게 유지하여야 하는 것이다. 유지되는 전압은 회전속도에 비례하므로, 전류와 전압의 값을 정격으로 동일시 한 후, 전기 출력을 비교하여야 한다. 다시 말해서, 출력비교시 기기의 정격은 두 경우 모두 동일하여야 한다. 동일 회전속도(300[RPM])와 동일 RMS 전류값(0.386[A])에 있어서, 본 논문에서 제안된 방법은 전기출력을 각각 시뮬레이션의 경우 8.1[%]와 실험의 경우 7.5[%] 증가시킴을 알 수 있다. 전기 기기의 무게와 체적은 일반적으로 전기출력과 비례하므로, 이는 곧 제안된 최적전류 제어기술이 발전기의 무게와 부피를 각각 8.1[%]와 7.5[%] 감소시키는 효과를 나타낼 수 있다고 말할 수 있다.

표 3은 고전력 모드에서의 전기 출력의 비교를 나타낸다. 저속, 저전류가 아닌 고속, 정격전류에서의 값을 비교하였다. RMS 전류값은 기기의 정격인 5.0[A]이고, 회전속도는 1350[RPM]이다. 이 속도는 제어하지 않는 전류파형을 가지는 기존방법을 적용하는 경우에 있어서, RMS 전류값이 정격전류값인 5.0[A]되는 회전속도로 정하여졌다. 회전속도가 높아짐에 따라 일반적인 다이오드 정류기를 사용하는 경우, 유기된 상전압과 전류사이에는 커다란 위상차가 존재하므로 평균 전력이 급격히 저하된다. 따라서, 최적 제어를 사용할 경우, 고전력 모드에서의 전기적 출력의 증가가 저전력 모드에서의 출력증가보다 훨씬 더 크다.

표 2 저전력 모드에서의 출력비교

Table 2 Electrical output power comparison in the low-power mode

	시뮬레이션		실험	
	기존방법	제안방법	기존방법	제안방법
회전속도[rpm]	300~	300	300	300
RMS 전류[A]	0.386	0.386	0.386	0.386
출력[W]	18.32	19.80	18.442	19.823
증가[%]	-	8.1	-	7.5

표 3 고전력 모드에서의 출력비교

Table 3 Electrical output power comparison in the high-power mode

	시뮬레이션		실험	
	기존방법	제안방법	기존방법	제안방법
회전속도[rpm]	1350	1350	1350	1350
RMS 전류[A]	5.0	5.0	5.0	5.0
출력[W]	251.1	464.5	242.3	346.8
증가[%]	-	85	-	43

고전력모드에 있어서 제안된 방법은 각각 시뮬레이션의 경우 85[%], 실험의 경우 43[%]의 전기출력을 증가시킨다. 이는 곧, 기기의 설계 변경 없이 그리고, 동손 및 철손의 증가 없이, 능동 스위치를 이용한 제안된 최적제어만으로, 예를 들어, 1[kW]가 정격인 발전기를 1.43[kW] 정격의 발전기처럼 사용할 수 있다는 것이다.

시뮬레이션 결과가 실험결과 보다 더 높은 출력밀도를 보이는 것은 시뮬레이션에 있어서는 손실을 고려하지 않았으며, 또한 유기 기전력과 제어전류가 실험과 달리 완벽한 동상을 이루기 때문이다. 실험적으로는, 컨트롤러상의 유기기전력의 계산, A/D 변환, 필터링 동작 등으로 인한 시간 지연 때문에 유기 기전력과 제어전류는 현실적으로 완벽한 동상을 이룰 수가 없으며 이러한 실제적인 위상차가 이론적으로 가능한 최대 출력을 감소시킨다.

6. 결 론

본 논문에서는 BLDC 발전기의 고출력밀도를 위한 최적 전류 제어 기술을 제안하였다. BLDC 발전기와 같이 유기 기전력의 파형이 비정현파인 기기에 있어서, 최대 출력밀도는 각 전류의 고조파 성분비를 유기 기전력의 고조파 성분비와 동일하게 제어해야 하며, 3상 기기의 경우 제 3 고조파의 배수 성분을 제거한 파형으로 제어해야 한다. 특정의 고조파 성분 제거를 위해서는 시간이 많이 소요되고 복잡한 FFT를 대신하여 간단한 대수적 방법을 제안하였다. 제안된 대수적 방법은 전압방정식에 의해 구해진 선간 유기기전력으로부터 손쉽게 제로 시퀀스 성분을 제거 할 수 있었다. 비 정현파 기기의 최대 출력 밀도를 위한 최적의 전류 파형을 이론적으로 도출하였으며, 시뮬레이션과 실험 결과로부터, 제안된 제어기술을 검증하고 출력 밀도의 증대를 입증하였다. 실험결과는 각각 저전력 모드에서 7.5[%], 고전력 모드에서 43[%]의 출력 증대를 보여준다. 이는 곧, 기기의 설계 변경없이 그리고, 동손 및 철손의 증가 없이 제어를 이용하여 발전기의 정격을 극대화 할 수 있다는 것이며, 또한 전기기기의 무게와 체적은 일반적으로 전기출력과 비례하므로, 제안된 최적전류 제어기술이 발전기의 무게와 부피를 7.5[%], 43[%] 감소시키는 효과를 나타낸다고 볼 수 있다. 특히, 소형화와 경량화가 가장 중요한 고려대상중 하나인 교통수단(차량)의 응용에 있어서 본 연구는 중요한 대안이 될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Hyung-Woo Lee, Tae-Hyung Kim and M. Ehsani, "Power Density Maximization of the Brushless DC Generator," IECON03 conference, pp.2162-2166, November 2003.
- [2] T. Kenjo and S. Nagamori, Permanent Magnet and Brushless DC Motors. Sogo Electronics Publishing Company, 1994.
- [3] J. R. Hendershot Jr. and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-magnet Motors. Oxford Magna Physics Publications, ISBN 1-881855-03-1, 1994.
- [4] R. Krishnan and G. H. Rim, "Modeling, simulation, and analysis of variable-speed constant frequency power conversion scheme with a permanent magnet brushless dc generator," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 37, no. 4, pp. 291-296, Aug., 1990.
- [5] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power electronics: converters, applications and design. 2nd ed. John Wiley & Sons, 1995.
- [6] A. W. Green and J. T. Boys, "Hysteresis current-forced three phase voltage-sourced reversible rectifier," IEE Proceedings, vol. 136, Pt. B, No. 3, pp. 113-120, May, 1989.
- [7] B. K. Bose, "Power Electronics A Technology Review," Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 8, pp. 1303-1334, August, 1992.

저 자 소 개



이 형 우 (李 衡 雨)

1998년 한양대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(공학). 현재 미국 코넬대학 이론응용역학과 객원 연구원.

Tel : 1-607-257-6784

Fax : 1-607-255-2011

E-mail : hl333@cornell.edu