

축전지 전원을 사용한 소형선박 추진용 BLDC모터의 전력변환방식에 따른 효율 비교 및 성능 추정

Efficiency Comparison according to Power Conversion Method and Performance Estimation for Battery Source BLDC Motor Propulsion System of Small Ships

정태영 · 정석권

T. Y. Jeong and S. K. Jeong

(접수일 : 2009년 5월 6일, 수정일 : 2009년 8월 6일, 채택확정 : 2010년 1월 5일)

Key Words : Motor Driven Propulsion System(모터 구동 추진시스템), BLDC Motor(브러시 없는 직류모터), Power Conversion Method(전력변환방식), Discharge Voltage Characteristic(방전전압 특성), Total Running Distance(총 항해 거리), Performance Estimation(성능 추정), Battery Source(축전지 전원)

Abstract : We investigate some operation characteristics and energy efficiency of the BLDC motor system driven by different two types power conversion method depends on same battery source for applying to electrical motor propulsion system of a small ship. Also, we suggest an estimation manner of operating performances such as total running distance and operating speed of ships from basic discharge voltage characteristics of batteries. Through some experiments, direct power conversion was better than indirect method on the view point of energy efficiency and the voltage discharge characteristics could be used as important design factor for estimating operating performances of small ships driven by electrical motors.

1. 서 론

최근 에너지의 효율적 이용과 메인テナンス 프리(maintenance free), 그리고 고성능 제어를 위해 BLDC(Brushless DC)모터의 사용이 보편화되고 있다. BLDC모터는 유도모터에 비해 순간 기동성이 뛰어나며, 로터가 강자성체의 영구자석이므로 체적과 중량 대비 출력이 크다. 뿐만 아니라 자속 생성을 위한 별도의 여자전류가 필요 없어 에너지 효율이 좋고 이로 인해 로터에는 원천적으로 열이 발생하지 않아 강제 냉각장치를 장착할 필요가 없다는 점도 큰 장점에 속한다. 이러한 BLDC모터의 뛰어난 특성으로 인해 산업용 각종 서보제어시스템에는 이 모터가 주류를 이루고 있다¹⁻³⁾. 다만, BLDC모터는 유도모터에 비해 고가이며 제어장치 설계가 어려운 까닭에 정밀 제어 분야를 중심으로 수백에서

수 kW급의 중, 소형 모터들이 널리 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 BLDC모터 생산기술의 발달로 성능 대비 가격이 저하하고 있고 다양한 형태의 드라이브들이 출시되면서⁴⁾ 기존 DC모터나 유도모터가 차지하던 범용 분야에도 이 모터를 적용하는 사례가 점차 늘어나고 있는 추세이다.

선박 추진 분야에서도 레저 용도의 소형 특수 선박을 중심으로 BLDC모터를 장착하는 전기 추진선이 증가하고 있다. 과거에도 저속에서의 뛰어난 조종성과 저소음, 저진동, 쾌적성이 요구되는 조사선과 탐사선 그리고 여객선 등에서는 디젤기관 대신 발전기 구동 전기 추진시스템이 이용되어져 왔다. 그러나 축전지 전원(battery source)만을 이용한 형태의 전동기 구동 전기 추진선은 거의 찾아보기 어려웠다. 그 이유는 기존의 DC모터와 축전지가 갖는 한계성 때문으로 추정된다. 즉, DC모터의 대부분이 정격사용시간이 극히 제한되어 있으며 대용량의 모터를 구동할 축전지 제작 또한 한계를 갖고 있기 때문이다. 그러나 에너지 효율이 좋은 BLDC모

정석권(교신저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel. 051-629-6181
정태영 : 부경대학교 대학원 메카트로닉스학과

터의 경우⁵⁾ 한정된 축전지 용량만으로도 상당 시간 운전이 가능하므로 비교적 짧은 항해시간을 갖는 특수 용도의 선박에서는 그 사용이 적극 검토되고 있다.

BLDC모터 구동용 전기 추진선 설계 시, 한정된 축전지 전원과 모터의 용량으로 항해 가능한 총 거리와 항해 속력 등의 추정은 필수 설계 항목에 속한다. 그러나 이들을 BLDC모터의 운전 특성으로부터 추정할 수 있는 방법에 관한 자료는 찾아보기 어렵다. 뿐만 아니라 에너지 이용 효율은 모터 단독 성능뿐만 아니라 모터 구동용 드라이브 구성에도 의존하므로 드라이브 구성 방식에 따른 에너지 효율에 관한 정량적 분석이 필수적이다. 그러나 이 부분에 대한 검토도 충분히 이루어져 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 축전지 전원 BLDC모터 전기 추진선 설계를 상정하여, 그 운전 특성을 파악하고 드라이브 구성 방식에 따른 에너지 효율을 검토한다. 이를 위해 각기 다른 두 가지 타입의 전력변환장치를^{7,8)} 사용한 실험시스템을 구축하고 실험을 통해 이들의 성능을 상호 비교 분석한다.

특히, 전기 추진선 설계 시 필요한 항해 가능 거리, 항해 속력을 축전지의 방전전압 곡선으로부터 구하는 방법을 제시한다. 이 방법은 방전전압 곡선이 실험실 수준에서 모터 시스템의 성능시험을 통해 용이하게 얻을 수 있으므로 향후 선박 설계 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 선박 추진용 전기모터 구동 시스템

2.1 BLDC모터 구동 전기 추진 방식

기존의 선체 추진을 위한 디젤엔진 구동은 고압 축비에 의한 폭발음과 과급기(turbocharger) 등의 보조기기 작동에 의한 통풍 소음으로 인해 극심한 소음을 유발한다. 뿐만 아니라 장대형(長大形) 엔진의 불규칙 회전력에 기인한 선체 진동을 수반하며, 공간 활용도도 낮다. 또한 저속에서 추력이 미약할 경우, 선체 조종 성능이 현저히 저하하는 단점도 갖고 있다. 이러한 연유로 저속에서 장시간 작업을 해야 하는 해양탐사선과 같은 조사선이나 거주 환경의 쾌적성을 중시해 선체 운전의 정숙성을 요하는 여객선 등에서는 이미 오래 전부터 전기 추진 방식을 채용해 오고 있는 실정이다.

Fig. 1은 발전기 장착 전기모터 구동 방식의 선박

추진시스템의 모식도이다. 본 논문에서는 디젤엔진 구동 방식의 발전기 대신 상용의 축전지만을 전원으로 하고 이 전원에 전력변환기를 연결하여 모터를 구동하는 소형선박용 순수 전기 추진 방식에 대해 집중적으로 검토하고자 한다.

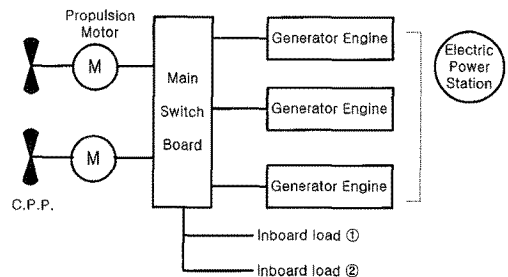


Fig. 1 Schematic diagram of electrical motor driven propulsion system by generators

종래 소형 전기 추진선의 구동 모터는 제어가 쉽고 기동 토크가 큰 DC모터가 주류를 이루었다. 그러나 DC모터의 문제점, 예컨대 주기적 정비 점검의 필요성, 사용 환경의 제약성, 출력 대비 대응적, 고중량 등으로 인해 최근 AC모터로 거의 대체되었다.

AC모터 가운데서도 BLDC모터는 성능과 에너지 효율이 뛰어나며, 용적과 중량 대비 출력이 크다⁶⁾. 이러한 장점으로 인해 소형, 저출력 전기 추진선에서는 이 모터의 장착이 점차 늘어나고 있어 향후 BLDC모터 전기 추진 방식이 주류를 이룰 것으로 예상된다.

2.2 전력변환기의 구성

축전지 전원 BLDC모터 구동용 드라이브 시스템은 간접변환방식(A타입)과 직접변환방식(B타입)의 두 가지로 크게 분류된다.

간접변환방식은 축전지로부터 일정전압·일정주파수인 CVCF(Constant Voltage Constant Frequency)를 우선 만들고 이로부터 필요한 가변전압·가변주파수인 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)를 출력하는 방식이다. 직접변환방식은 CVCF의 중간 단계를 거치지 않고 축전지로부터 직접 VVVF를 출력한다. 즉, Fig. 2에서 Inverter(* 표시)부가 생략된 구동 시스템이다.

우선 Fig. 2의 실험장치를 이용하여 두 전력변환 방식에 대한 운전 특성을 파악하고 이를 통해 에너지 효율을 분석한다.

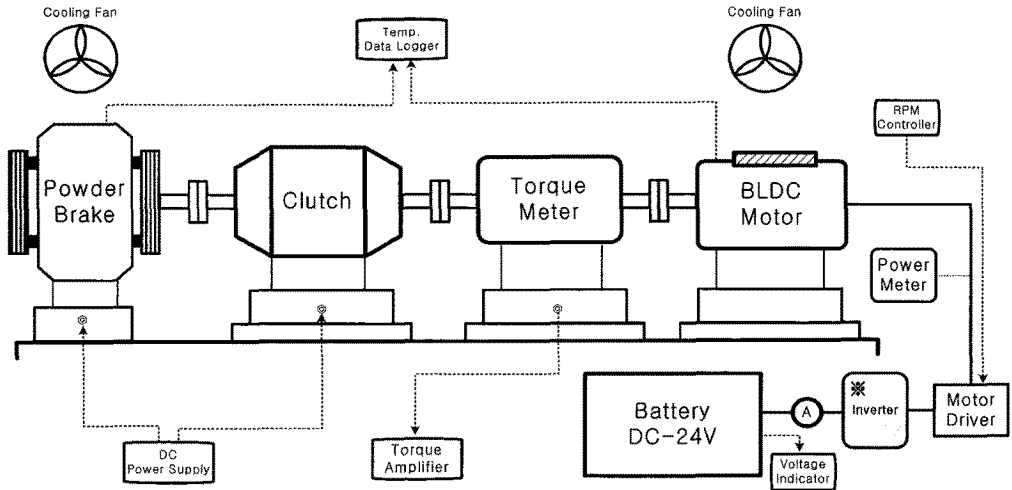


Fig. 2 Experimental system for testing motors' operating performances

3. 실험장치 구성 및 실험방법

3.1 실험장치 구성

실험장치의 구성을 Fig. 2에, 데이터 계측 장비 및 모터 드라이브와 축전지의 실제 외관을 Photo. 1에 각각 나타내었다.

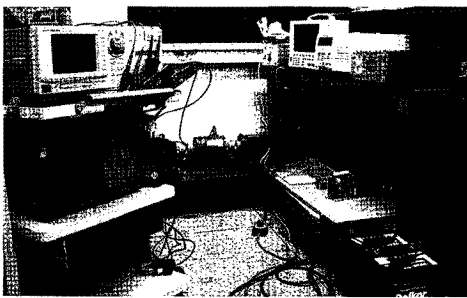


Photo. 1 Appearance of data measuring apparatus

실험장치는 BLDC모터(두 가지 타입)와 토크미터, 전기 작동식 마그네틱 클러치/브레이크 유닛, 그리고 부하 조절용 파우더 브레이크(powder brake)를 실험베드 상에 일직선으로 연결하였다. 모터 구동용 전원은 12V의 축전지 2개를 직렬로 연결하여 24V의 전압을 출력하도록 하였다.

데이터 검출시스템은 축전지의 방전전압과 전류 측정용 전압계와 전류계, 그리고 모터의 소비전력 측정용 3상전력계, 속도 측정용 rpm 게이지, 토크 측정용 증폭기, 온도 측정용 센서와 데이터 로거(MV-200)로 구성하였다. 특히 모터 및 파우더 브레이크

이크 본체의 발열 상태는 열전대(T-type)를 부착하여 데이터 로거로 실시간 관측, 감시하였다. 장시간의 실험으로 인한 파우더 브레이크와 모터의 온도 상승이 모터의 토크 및 속도 성능 저하를 야기하지 않도록 전기 구동 냉각팬을 설치하였다.

Table 1~5는 실험에 사용한 장비들의 상세 사양을 각각 나타낸다.

Table 1 Specification of BLDC motors

	A-type	B-type
Maker	TM Tech Industrial Co. Ltd.	
Type	TM10-A0723	TM10-D07
Perf.	Rated power, rpm: 750W×2000rpm	Rated power, rpm: 750W×2000rpm
	Rated volt, current: AC 220V×3A	Rated volt, current: DC 24V×37A
	Rated Torque : 3.58 N·m, 36.49 Kgf·cm	Rated Torque : 3.58 N·m, 36.49 Kgf·cm
Spec.	Peak Torque : 7.16 N·m, 72.99 Kgf·cm	Peak Torque : 7.16 N·m, 72.99 Kgf·cm
etc.	Insulation : B, Weight : 5.2 Kg Working cond. : 0 ~ 40°C, 20-80 RH	

Table 2 Specification of motor drivers

	A-type	B-type	
Maker	TM Tech Industrial Co. Ltd.		
Type	TMC-750W	TMC-D750W	
Perf. Spec	Input : AC 220V Rated curren : 4A Peak current: 8A	Input : DC 24V Rated current: 32A Peak current: 64A	
	Ser. No.	BLDC-08G012	BLDC-08G013

Table 3 Specification of the torque meter

	Description	Remarks
Maker	KYOWA Co. Ltd.	Japan
Type	TP-5KMC8	
Spec.	Capacity : 5 kgf-m	
Ser. No.	830190007	

Table 4 Specification of the powder brake

	Description	Remarks
Maker	Namkwang Electric Co.	Korea
Type	NKPB-2.5	
Spec.	Input power : DC 24V	

Table 5 Specification of the battery bank

	Description
Maker	Delkor Corp.
Type	DC12 (Deep Cycle)
Spec.	Amper Drow : H.U.P Rated current : 5.0A - 14.0 hrs 15.0A - 3.8 hrs 25.0A - 2.0 hrs Capacity : 70AH × 2 Sets

Table 1에서 알 수 있듯이 실험에 사용된 BLDC 모터는 출력은 동일하지만, 정격전압과 전류가 전혀 다르다. 또한 A타입의 모터는 A타입의 드라이브로 구동되도록 장치를 구성하였다. 실험베드는 각각 다른 치수의 모터가 장착될 수 있도록 제작하였다.

실제로 선박은 항해 시 자중과 선형에 따른 조파 저항 등의 다양한 형태의 부하를 파(wave)로부터 받게 된다. 그러나 본 실험에서는 이들 부하가 궁극적으로는 선박에 장착된 모터의 출력 토크를 저감시키는 외란으로 가정하여 모터 축 상에 연결된 파워더 브레이크에 역방향 토크를 가함으로써 이를 구현하였다. 파워더 브레이크의 출력 토크는 파워더 브레이크에 인가하는 전압을 조절함으로써 크기를 가변하였다.

3.2 실험방법

먼저, BLDC모터의 전력변환방식에 따른 운전 특성을 파악하기 위하여 완전히 충전된 축전지를 이용하여 부하별 축전지 방전 특성을 조사하였다.

성능 비교 실험에서 부하는 모터 정격출력의 60%, 80%, 100%에 해당하는 크기가 되도록 파워더

브레이크를 이용하여 인가하였다. 실험 순서는 작은 부하에서 큰 부하의 순으로 인가하였고, 1회 실험 종료 후 축전지는 재충전하였다. 또한, 파워더 브레이크의 온도 특성을 고려하여 실험 및 데이터 계측은 브레이크의 정상 운전 온도 상태에서 시작하였다. 축전지의 방전 중지전압은 전력변환기의 특성을 고려하여 21V까지로 제한하였다.

모든 데이터의 샘플링 주기는 10분으로 설정하였고, 모터의 회전수는 드라이브로부터 별도의 속도 피드백 루프를 구성하지 않고 축전지의 전압 변동에 따라 변하도록 오픈 루프로 구성하였다.

실험결과를 분석하여 에너지 효율을 상호 비교하고 그 결과 양호한 전력변환방식을 선정 한 후, 이에 대해 추가적인 실험을 수행하였다. 추가 실험에서는 상세한 성능 분석이 가능하도록 모터 정격 출력의 60% 부하부터 10%씩 증가시켜 5단계의 부하에 대해 각각 실험을 행하고 각종 데이터를 취득하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 전력변환방식에 의한 축전지 방전 특성 비교

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 다른 두 가지 타입의 모터 구동 시스템에 대한 부하별 사용시간에 따른 축전지의 방전전압과 방전전류 변화를 각각 나타낸다.

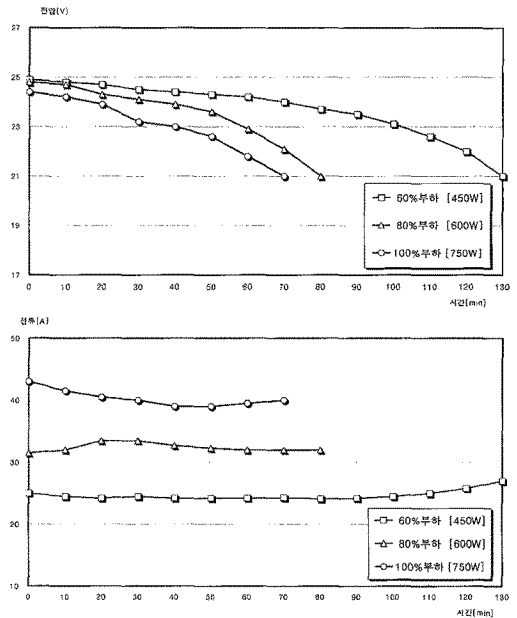


Fig. 3 Discharge characteristics of voltage and current of A-type BLDC motor versus load variation

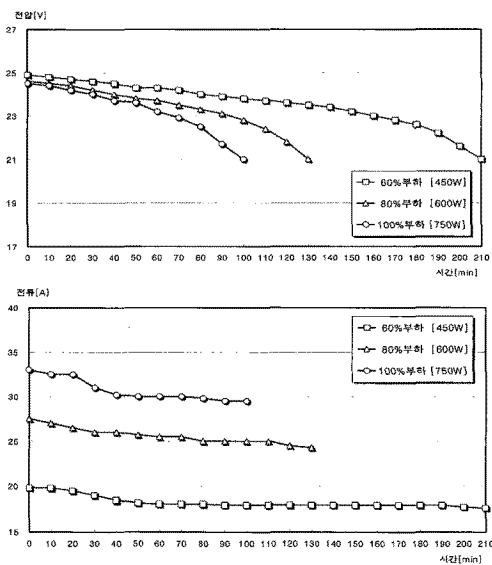


Fig. 4 Discharge characteristics of voltage and current of B-type BLDC motor versus loads

Fig. 3과 Fig. 4를 비교해 보면, 같은 부하조건일 경우, B타입이 A타입에 비해 종지전압까지의 방전 시간이 약 30~38% 정도 더 길다. 방전전류도 B타입이 같은 부하 조건에서 A타입에 비해 평균 5A 이상 더 낮게 나타났다. 이는 동일 부하에서 B타입의 소비전력이 더 적음을 의미한다. 이들 결과로부터 B타입의 모터 구동 시스템이 A타입보다 더 효율적이고 경제적임을 알 수 있다. 한편, Fig. 3과 Fig. 4에서 전압의 초기치가 각기 다른 이유는 축전지의 재충전 과정에서 발생한 축전지 특성에 기인한다.

이하에서는 에너지 효율 면에서 비교우위의 B타입에 대한 상세한 성능 분석 결과를 서술하고자 한다.

4.2 B타입의 부하별 방전전압 특성 및 회전수 변화

Fig. 5는 B타입의 모터 구동 시스템에 대한 부하별 시간에 따른 축전지의 방전전압 및 회전수 변화를 각각 나타낸 것이다.

여기서, Fig. 5의 회전수 특성이 Fig. 4의 방전전압 특성과 유사한 패턴임에 주목한다. 이는 모터의 출력 P 가 일반적으로 토크 T 와 각속도 ω 의 곱인 $P = T\omega$ 로 주어지며, P 는 전력변환기의 소비전력을 무시할 경우, 모터의 입력 전력과 동일하므로 축전지 측에서 측정한 전압 V 와 전류 I 의 곱에 해당한다.

한편 모터의 토크 T 는 모터의 토크상수 k_T 와 전류 I 의 곱, 즉 $k_T \times I$ 로 구해지므로 양변의 전류항을 제거하면 모터의 속도 ω [rad/sec]는 전압 V 에 비례

함을 알 수 있다. 이는 각 부하별 방전전압 특성곡선이 주어진다면 이로부터 각 부하별 모터의 회전수 추정이 가능함을 의미한다.

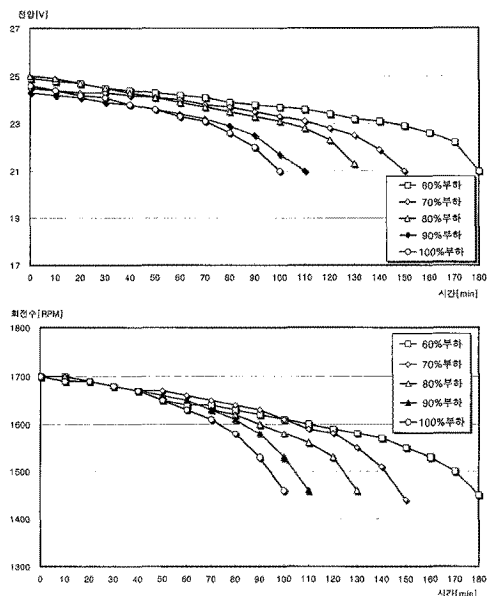


Fig. 5 Motor speed and discharge characteristic of voltage with respect to load variation

Fig. 6은 모터의 토크를 나타낸 그래프로써 Fig. 3과 Fig. 4의 전류에 k_T 를 곱해 구해질 수 있음을 알 수 있다. 또한, 토크는 저부하 영역(60~80%부하)에서는 종지전압까지 대체로 일정 토크 특성을 보인 반면에, 고부하 영역(90~100%부하)에서는 운전 시간 증가에 따라 그 값이 소폭 감소하는 경향을 보였다.

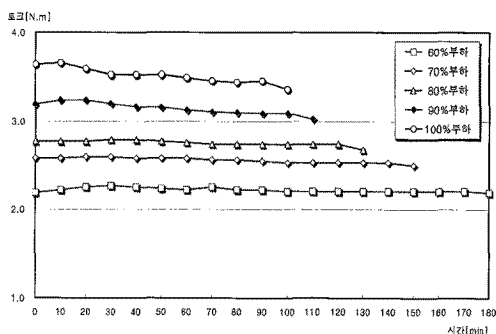


Fig. 6 Motor torque characteristics

4.3 방전전압 특성으로부터 모터 회전수의 추정

Fig. 5의 방전전압과 회전수의 상관관계를 구하기

위하여 시간 $t[\text{min}]$ 를 독립변수로 하여 이들을 우선 1차식으로 선형 근사화 하면 식 (1), (2)와 같다.

$$\left. \begin{aligned} V_{100} &= -0.0237t + 24.69 \\ V_{90} &= -0.0191t + 24.44 \\ V_{80} &= -0.02t + 25.028 \\ V_{70} &= -0.0146t + 24.69 \\ V_{60} &= -0.013t + 25.06 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{N}_{100} &= -1.45t + 1713 \\ \overline{N}_{90} &= -1.236t + 1711 \\ \overline{N}_{80} &= -1.287t + 1715.7 \\ \overline{N}_{70} &= -1.0901t + 1715 \\ \overline{N}_{60} &= -0.9882t + 1706.6 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서, V_{load} 는 방전전압[V], \overline{N} 는 모터의 회전수[rpm]를 각각 의미하고 아래 첨자로 표시된 숫자는 인가된 부하로서 60은 60% 부하임을 나타낸다. 식 (1)과 (2)의 우변 제2항은 각 부하별 전압과 회전수의 초기값이며 1차항의 계수가 근사식의 기울기에 해당한다.

선형 근사화한 전 구간에서 각 부하별 전압과 회전수의 상관관계를 구한 결과 회전수는 방전전압 값의 상수 K 배(평균 68.9)로 나타났다. 이 값은 모터의 특성값인 토크상수 k_T 와 모터 각속도 ω 로부터 rpm으로 변환 시 단위 환산 계수에 대응하는 값이다. 선형 근사화 이전의 실제 곡선으로부터 구한 전압과 회전수 및 근사화 이후의 1차식으로 구한 이 값들을 비교해 본 결과, 그 차가 대략 0.34~1.65%의 범위 내에 있음을 확인하였다. 이는 방전전압으로부터 식 (3)과 같이 추정한 모터의 회전속도가 설계 기초 자료로서 충분히 신뢰할 수 있음을 나타낸다.

$$\overline{N}_{load} = KV_{load} \quad (3)$$

Table 6은 각 부하별로 근사화된 1차식과 실제 곡선인 2차식의 적분값 차를 구하여 이 오차를 2차식의 적분값을 기준으로 나타낸 백분율 값이다.

Table 6 Comparison between real trend curve and 1st approximation line

	60%	70%	80%	90%	100%
Voltage	1.65	1.32	0.36	0.59	0.51
rpm	0.45	0.45	0.34	1.40	0.64

4.4 총 항해 거리 추정

선박 추진기의 항해 속력은 모터의 회전수 \overline{N}_{load} [rpm]로부터 추진기의 피치를 고려, 식 (4)와 같이 구해진다.

$$v(t) = \frac{P_p \times \overline{N}_{load} \times 60}{1852[m]} \quad [\text{mile/h}] \quad (4)$$

여기서 $v(t)$ 는 추진기의 항해 속력(knot), P_p 는 추진기의 피치[m]를 각각 나타낸다.

총 항해 거리 $D[\text{mile}]$ 는 식 (4)를 적분함으로써 식 (5)와 같이 추정할 수 있다.

$$D = \int_{t_0}^{t_f} v(t) dt \quad (5)$$

여기서 t_0 는 모터 구동 시작 시간, t_f 는 구동 종료 시간을 각각 나타낸다.

전기 추진선의 설계 단계에서는 부하별 선박의 항해 가능 거리의 추정이 매우 중요하다. 결국, 축전지를 전원으로 한 부하별 모터 구동 시스템의 방전전압 특성만 구한다면 이로부터 모터의 속력 \overline{N}_{load} , 선박 추진기의 항해 속력 $v(t)$, 그리고 항해 가능 거리 D 까지를 일관되게 구할 수 있음을 알 수 있다.

방전전압 특성곡선은 실험실 수준에서 용이하게 구할 수 있으므로 이를 통해 소형 선박 설계의 중요한 기초자료인 항해 속력, 항해 가능 거리를 쉽게 추정할 수 있게 된다.

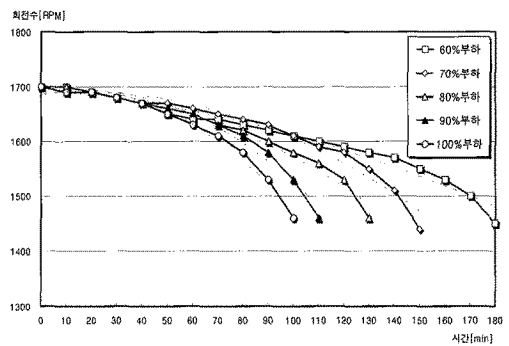


Fig. 7 Analysis chart about total running distance at each load

Fig. 7은 모터 속도를 2차식으로 근사화 하여 나타낸 것이다. 식 (6)은 Fig. 7의 결과 가운데 3 종류의 부하에 대한 2차 근사식을 나타낸다. 식 말미의

()안의 값은 각 부하별 기동에서부터 방전 종료 시 각까지 N_{load} 를 적분한 값이다. 이 값들을 1차 근사 식인 식 (2)의 적분값과 비교한 결과 오차의 크기는 60% 부하 시 0.6%, 80% 부하에서 1.1%, 100% 부하 시 1.3%로 각각 나타났다. 초기치의 상이함을 고려할 경우, 오차는 1% 내외이므로 본 논문에서 제안한 1차 근사식만으로도 항해 거리를 충분히 엄밀하게 추정할 수 있음을 알 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} N_{100} &= -0.029t^2 + 0.7657t + 1689 \quad (2872) \\ N_{80} &= -0.0129t^2 + 0.0632t + 1695 \quad (3661) \\ N_{60} &= -0.0045t^2 + 0.3881t + 1694 \quad (5083) \end{aligned} \right\} (6)$$

한편, 추진기를 고정피치로 가정할 경우 총 항해 가능 거리는 60% 부하의 경우가 100% 부하 시 보다 약 1.8배 크게 나타났다.

본 연구에서는 선박이 항해 중 받게 되는 각종 부하를 모터에 인가되는 토크 부하로 단순화 시켜 해석하였다. 소형선박용 축전지 전원 BLDC모터 구동 시스템의 경우라면 본 논문에서 제안한 추정 이론은 충분히 일반성을 갖는 것으로 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 소형선박용 전기모터 구동 추진방식을 가정하여 각기 다른 두 타입의 전력변환방식에 의해 구동되는 축전지 전원 BLDC모터의 제반 운전 특성 파악 및 에너지 효율을 비교 분석하였다.

특히 전기에너지 사용면에서 우월한 것으로 확인된 직접전력변환방식에 대해서는 모터의 각 부하별 축전지의 방전전압과 전류의 시간별 변화 추이를 면밀히 분석하였다. 또한, 모터의 출력과 토크, rpm 특성 등도 분석하였다.

이 특성곡선으로부터 모터의 회전 속력과 선박의 항해 속력, 그리고 총 항해 가능거리를 모두 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 연구에서 얻은 주요 내용들을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- (1) 축전지의 사용 시간은 B타입이 A타입보다 전반적으로 30~80분 길게 나타났다.
- (2) 각 부하별 모터의 회전수는 축전지 방전전압에 근사적으로 비례한다.
- (3) 부하별 방전전압 특성곡선으로부터 부하별 모터의 회전수, 선박의 항해 속력, 그리고 총 항해 가능거리를 모두 추정할 수 있다.

이상의 자료들은 향후 축전지 전원 BLDC모터를 이용한 선박 추진시스템의 설계 시 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대가 된다.

사 사

본 연구는 반도마린 회사의 지원에 의하여 이루어졌으므로 지면을 빌어 사의를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1. J. Ko, S. H. Ko, and Y. C. Kim, 2006, "Robust Adaptive Precision Position Control of PMSM", Journal of Power Electronics, Vol. 6, No. 4, 31, No. 3, pp. 347~355.
2. 윤용호 외 5인, 2004, "Single Sensor를 이용한 3상 슬롯리스 PM BLDC 전동기의 속도제어", 전력전자학회, 제9권, 제6호, pp. 536~543.
3. 김태성, 유지수, 현동석, 2006, "미지입력 관측기를 이용한 BLDC 전동기 센서리스 드라이브에 대한 연구", 전력전자학회, 제11권, 제1호, pp. 65~71.
4. 이영주 외 5인, 2003, "마이크로프로세서로 손쉽게 구현 가능한 브러쉬리스 직류 전동기 제어 알고리즘", 전자공학회, 제40권, 제1호, pp. 66~72.
5. 강병희, 목형수, 최규하, 2003, "최소 토크 맥동을 갖는 BLDC 전동기의 최적제어", 전력전자학회, 제8권, 제1호, pp. 56~63.
6. 고종선, 윤성구, 1999, "적응제어형 외란 관측기를 이용한 BLDC 전동기의 정밀위치제어에 대한 연구", 전력전자학회논문집(하계), pp. 4~9.
7. 박기홍, 김태성, 현동석, 2004, "전항보상을 이용한 BLDC 전동기의 속도제어에 관한 연구", 전력전자학회, 제9권, 제3호, pp. 253~259.
8. 정태영, 김종백, 정석권, 2009, "축전지전원 BLDC 모터의 직접전력변환방식에 의한 성능분석", 동력기계공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 219~224.