

전기추진선박의 효율향상을 위한 이중 추진전동기 제어 방법

김수철*, 김신형**, 김재국†
 인하대학교*, 한화오션**

Control Method of Dual Electric Propulsion Motor for Improving Efficiency of Electric Propulsion Ships

Soocheol Kim*, Shin-Hyung Kim**, Jae-Kuk Kim†
 Inha University*, Hanwha Ocean**

ABSTRACT

사용자의 운행거리 향상을 위하여, 전기추진용 전동기 및 인버터는 전체 운전영역에서의 효율 향상이 요구된다. 특히 저속 고 토크 영역에서 주로 운행하는 대형 트럭이나 대형 선박에서 사용되는 추진전동기는 저속 영역에서의 효율향상이 모빌리티의 향상거리를 증가 시킬 수 있는 핵심 요소라 할 수 있다. 본 연구에서는 주로 저속, 항속 운항을 하는 전기추진 모빌리티에서 사용가능한 전동기 시스템에 대해 제안한다. 이를 통해 전기추진선박에 적용 가능하고, 저속 순항모드에서도 효율적으로 운전할 수 있는 전동화 시스템 구조와 제어 방법을 제시한다. 전동기는 이중 직렬연결로 구성되며, 전동기의 동작점에 따라 운전 전동기를 선택하여 저속 영역의 효율을 향상할 수 있음을 확인한다.

1. 서 론

친환경 트렌드에 따른 각종 규제가 분야별 모빌리티에 확대 적용되고, 소음, 진동, 승차감 등의 다양한 장점이 부각됨에 따라 개인용 차량을 넘어 대형 트럭, 선박, PAV(Personal Air Vehicle)등에 기존에 널리 사용되던 내연기관 구동장치 대신 전동화 구동장치가 도입되고 있다. 전동화 모빌리티는 최근 5년간 매년 6~8%의 성장을 거듭하고 있으며, 2025년에 이르면 상용차 약 30조원, 선박 약 11조원, PAV 약 3조원의 규모에 달할 것으로 예상된다. 모빌리티에 전동화가 광범위하게 적용됨에 따라, 전기추진용 전동기 및 인버터는 운행거리 향상을 위하여 전체 운전영역에서의 효율 향상이 요구된다. 이에 따라, 보다 넓고 다양한 범위에서 고효율 및 고토크 밀도를 달성할 수 있는 추진전동기와 이를 적절히 제어하기 위한 방안에 대한 세부 연구가 활발히 진행되고 있다.

전통적인 기계구동 시스템이 넓은 범위에서 최적의 특성을 얻으면서 동시에 시스템의 요구 성능을 만족하기 위해서는, 외부에 설치된 기어나 풀리 같은 기계장치를 속도에 따라 클러치를 이용하여 연결함으로써 달성할 수 있었다. 하지만 최근에는 신뢰성 향상, 원가 경쟁력 확보, 구동 소음 및 진동 감소 등을 위하여 전동기를 직접 구동부에 연결하여 기계장치 없이 운전하는 방식이 전반적으로 적용되고 있다.

일반적으로 모빌리티 어플리케이션에 적용되는 전동기는 인버터를 통해 가변속 제어가 가능하므로 시스템의 속력을 변경하기 위하여 별도의 기어가 필요하지 않다. 그러나 인버터에

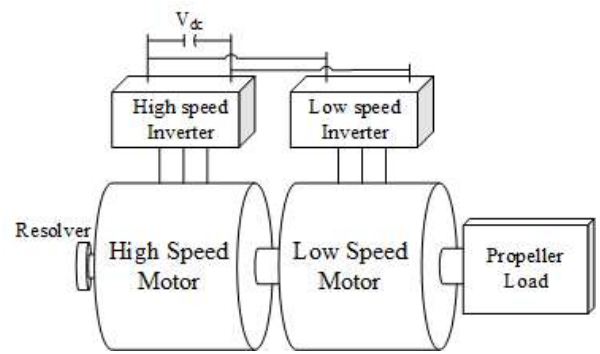


그림 1. 이중추진전동기 구성

의한 가변속 운전을 정격영역 보다 아주 낮은 영역에서 운전하는 경우, 추진시스템의 효율은 상당히 낮아질 수 있다. 예를 들면 선박의 경우 최대 선속을 위한 정격속도운항보다도 훨씬 낮은 속도로 순항운전 하는 경우가 많다. 따라서 기계식 구동장치 없이 동시 효율과 동특성이 좋은 가변속 특성의 요구사항을 만족하기 위해서는 새로운 구조의 전기추진시스템이 필요하다.

기계식 장치 없이 운전영역을 확대하기 위한 방안으로 전동기 제어법을 통한 방법과 설계파라미터를 변경하는 방법이 연구되어 왔다. 전동기 제어법을 통한 동작영역 확대 방안 중 하나인 약자속 제어법은 영구자석 전동기에서 사용하는 방식으로, d축 전기자 전류를 음으로 흐르게 하면 전기자 반작용에 따라 감자효과 발생하고 이에 따라 운전범위가 증가되는 방법이다.^[1] 하지만 이 방법은 전동기의 고속영역을 확대하는 방법으로 약자속 영역을 정격영역으로 설계할 경우 제어가 복잡하고 무효전력에 의한 손실이 커지는 단점이 있다.

다른 방법으로는 전동기 내에 다수의 권선 그룹을 갖도록 고정자 권선을 갖춘 전동기에 대하여 각 결선 사이에 스위치를 적용하여 권선 결선 조건을 변경하는 방법이 제안되었다.^{[2][3]} 즉, 인버터 외부에 별도의 전력 반도체 스위치 소자를 이용하여 전동기의 결선을 바꾸는 방법이다. 전동기의 결선조건을 변경하는 방법은 전동기의 동작영역의 범위를 늘리기 위하여 전기기어 형태로 대체하는 방법이라 설명할 수 있으며, 기계장치 적용에 따른 단점을 개선할 수 있고 이는 곧 제품 경쟁력을 향상할 수 있는 방법이라 할 수 있다. 하지만, 이러한 전기기어 형태의 전동기에 대한 상세한 속도 및 전류제어 방법에 대한 새로운 연구는 진행되지 않았다.

본 논문에서는 앞서 살펴본 전동화 모빌리티의 특성에 맞춰 이중추진전동기 적용을 제안하고, 저속영역에서 효율을 향상시킬 수 있는 이중추진전동기의 제어방안을 제안한다. 제안된 방법을 통해 저속영역과 정격영역 전 범위에서 효율적인 운전을 달성할 수 있다. 저속-고토크 모빌리티인 대형 선박 등에 적용 가능한 시스템의 효율향상 가능성을 검증하고 제어특성을 검증한다.

2. 제안하는 시스템 구성

전체 시스템의 효율을 향상하기 위해 제안하는 시스템 구성은 그림 1.과 같이 전동기를 이중으로 직결 연결한 형태이다. 전동기는 정격운전 시 효율이 가장 좋으며, 이를 위해 보조전동기는 저속에서 최적의 효율을 가질 수 있도록 설계된다. 이때 주 전동기와 보조전동기는 각각의 인버터를 통해 운전된다. 주 전동기는 목표 정격속도의 사양을 가지며 보조전동기 정격속도는 주 전동기의 1/4~1/10까지 설계될 수 있다. 본 연구에서는 1/5로 설계하였다. 저속에서 운전되는 보조전동기는 30rpm 부근에서 가장 높은 효율을 가질 수 있으며, 정격속도 150rpm을 가지는 주 전동기를 30rpm에서 구동하는 것과 비교하여 약 3%이상 효율이 향상되는 효과가 있다. 전동기는 표면부착형 PMSM으로, 저속-고토크 영역에서 운전할 수 있도록 설계하였다.

2.1 전류제어기

표면부착형 영구자석 전동기의 속도나 위치를 제어하기 위해서는 전동기의 토크를 제어할 필요가 있으며, 이를 위해서는 Q축 전류를 제어할 필요가 있다. 속도와 전류를 동시에 제어하기 위해서 전류제어기를 내부 루프에 배치하고 그 바깥 루프에 속도제어기를 구성한다. 전류제어기는 속도제어기에 비해 대역폭이 충분히 커야 전류제어가 속도 제어에 미치는 영향이 없고 응답성이나 안정성이 향상된다.^[4]

전류제어를 위해서 널리 사용되는 비례적분 전류제어기를 사용하였으며, 극점-영점상쇄 기법을 사용하여 이득을 결정하였다. 또한, 주로 사용되는 전향보상 기법과 안티와인드업 기법도 함께 사용하였다. 제어기의 이득을 선정하기 위하여 시스템 파라미터를 사용하였다.

2.2 속도제어기

한 개의 축에 연결된 두 개의 전동기의 속도제어기를 동시에 운전할 경우 그 오차에 따라 전류 제한이 작은 전동기가 동력을 전달하거나 흡수한다. 따라서 효율 향상을 위해 불필요한 에너지 전달을 줄이고자 하나의 속도제어기만을 선택하여 운전해야 하는데, 속도에 따라 효율이 좋은 전동기의 속도제어기를 선택해야 한다. 이때 전동기가 저속에서 고속으로 전환되거나 저속에서 고속으로 전환되는 경우, 부하단절 없이 속도제어기를 전환하기 위해서는 연속적인 동력전달이 필요하다. 이를 위해서는 속도제어기의 이득을 적절하게 설정할 필요가 있다.^[4]

전동기 속도제어기의 경우, 일반적으로 PI제어기와 IP제어기를 주로 사용한다. 이때, 이중 추진전동기를 적용할 경우 지령 속도에 따라 동력을 빠르게 전달하여야 하므로 속응성이 제어기의 중요한 특성이라고 할 수 있다. IP제어기는 PI제어기와 비교하여 부하토크에 대한 응답이 좋지만, 속응성이 느린 특성을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 제안하는 이중 추진전동기의 제어 속응성을 만족하기 위해 PI제어기를 적용하였다.

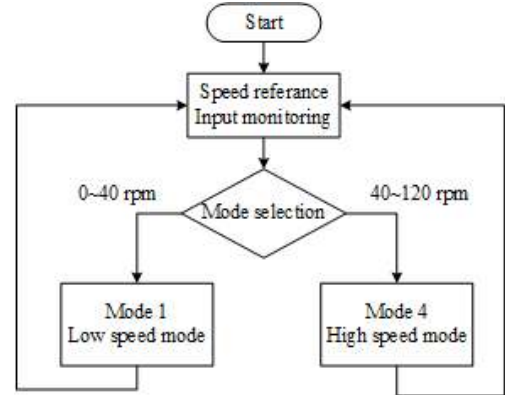


그림 2 Flow chart for mode selection

2.2 제안하는 속도제어기의 동작

Mode 1: 저속 속도영역 운전모드로써, 전동기의 속도범위는 0~40 rpm으로 설정하였다. 저속 영역 내에서 운전하는 경우 보조전동기가 속도를 제어하며 주 전동기는 대기 상태로 운전된다.

Mode 2: 고속 속도영역의 운전모드로써, 전동기의 속도범위는 40~150rpm 으로 설정하였다. 고속운전영역에서는 주 전동기가 속도제어를 담당하며, 고속영역에 진입 후 보조전동기의 최대속도에 도달하면 보조전동기의 입력 측 릴레이를 통해 전력이 차단되어야 한다.

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 시스템의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 전동기의 구동범위는 -150~150rpm이며, 용량은 100kW 주 전동기와 10kW 보조 전동기를 통해 검증하였다. 인버터를 구동하기 위한 입력전압으로는 DC 750V급 리튬이온 배터리를 가정하였고, 인버터의 스위칭 주파수는 10kHz이다. 저속에서 고속으로 변경되는 지점의 부하 용량은 선박 추진부하를 토대로 선정하였으며, 최대 선속부하의 약 1/20로 선정하였다. 본 논문에서는 부하토크 1000Nm, 속도 40rpm영역에서 전환된다. 연구에서 검증된 전동기는 선박추진전동기에 사용 가능한 저속-고토크 모터의 파라미터를 토대로 하였으며, 상세 파라미터는 표1로 나타내었다.

그림 3은 전동기의 속도를 30rpm에서 50rpm으로 상승하는 경우이다. 속도제어기의 지령 변동에 맞춰 각 전동기의 Q축 전류변화와 토크 변화, 그리고 합성토크의 변화를 그림으로 나타내었다. 40rpm이상으로 지령이 생성되는 경우, 제어 권한이 보조전동기에서 주 전동기로 넘어가게 되고, 보조전동기는 더 이상 Q축 전류를 생성하지 않는다. 동시에 주 전동기는 속도제어기를 통해 Q축 전류지령을 생성하고, 시스템의 부하토크를 모두 전달받아 시스템을 운전하게 된다.

그림 4는 전동기의 속도를 50rpm에서 30rpm으로 하강하는 경우이다. 이는 속도가 상승하는 경우와 마찬가지로, 속도 지령이 40rpm보다 낮아지게 되면 주 전동기에서 가지고 있던 제어 권한이 보조전동기로 넘어가게 되고, Q축 전류를 모두 보조전동기가 생성하여 시스템에 동력을 전달하게 된다.

시뮬레이션에서 살펴본 바와 같이 속도제어기의 이득을 적절히 선정할 경우, 시스템은 별도의 제어기법을 적용하지 않아도 동력 손실 없이 자연스럽게 동력을 전달 할 수 있었다.

하지만 실제 실험에서는 노이즈, 제어기의 민감도, 통신 및 지연요소 등의 여러 가지 변수가 존재할 수 있으므로, 안정적인 동력전달을 위해 추가적인 기법이 필요할 수도 있다.

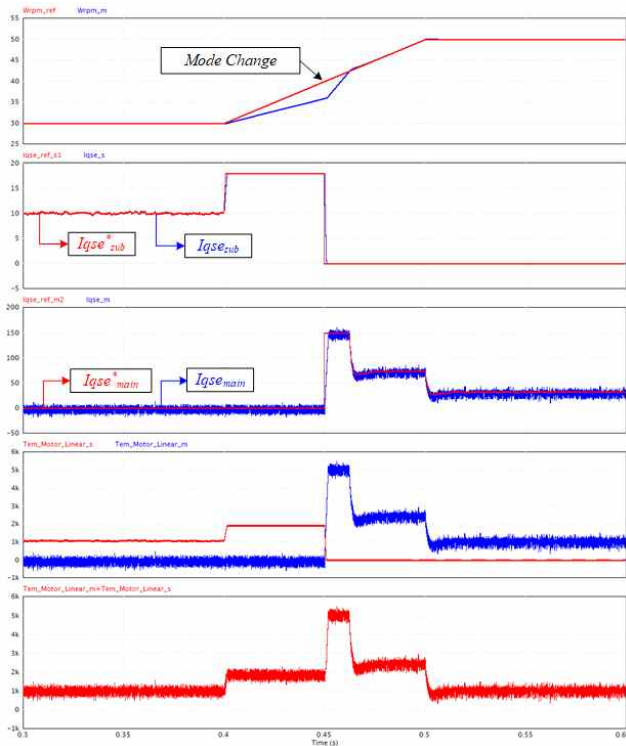


그림 3 전동기 동력전달 30rpm to 50rpm

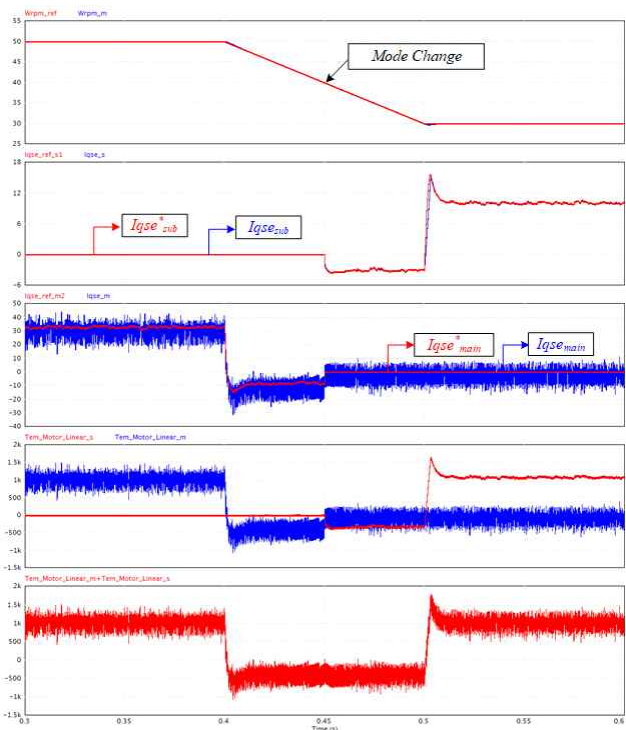


그림 4 전동기 동력전달 50rpm to 30rpm

표 2 전동기 파라미터

	주 전동기	보조 전동기
Type	SPMSM	SPMSM
Power	100kW	10kW
토크	6,400 Nm	1,910 Nm
정격 전류	139 A	13 A
속도	150 rpm	50 rpm
상	3상	3상
극수	32	32
Rs	67.4 mΩ	1,003 mΩ
Ld	2.5 mH	33.5 mH
Lq	2.4 mH	33.3 mH

3. 결론

본 논문에서는 대형 선박 등에 적용 가능한 진동화 추진시스템의 전체 효율을 향상시키기 위한 전동기 구성을 제안하였다. 이를 운전하기 위한 속도제어기와 전류제어방안을 제안하였으며, 이중 추진전동기인 보조전동기를 통하여 저속영역에서 시스템 효율을 향상시킬 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 시스템은 특별한 제어기법 없이도 안정적인 운전이 가능함을 확인하였으며, 이를 통해 저속 순항영역에서 주로 운전하는 시스템인 선박 등의 대형 모빌리티의 운항거리 향상에 효과적임을 확인하였다. 향후 실험을 통해 안정적인 구현이 가능함을 검증할 계획이다.

이 논문은 한화오션의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Seung-Ki Sul, Control of Electric Machine Drive Systems, 2011.
- [2] 손병욱, "권선변경을 통한 영구자석형 동기전동기의 정출력 영역 확대 연구." 국내박사학위논문 한양대학교 대학원, 2011. 서울
- [3] S. -H. Im and B. -G. Gu, "A Snubberless Solid-State Tap Changer for Permanent Magnet Synchronous Motors," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 11, pp. 12143-12152, Nov. 2020.
- [4] 김상훈, DC, AC, BLDC motors 모터제어 4판, books, 2021.