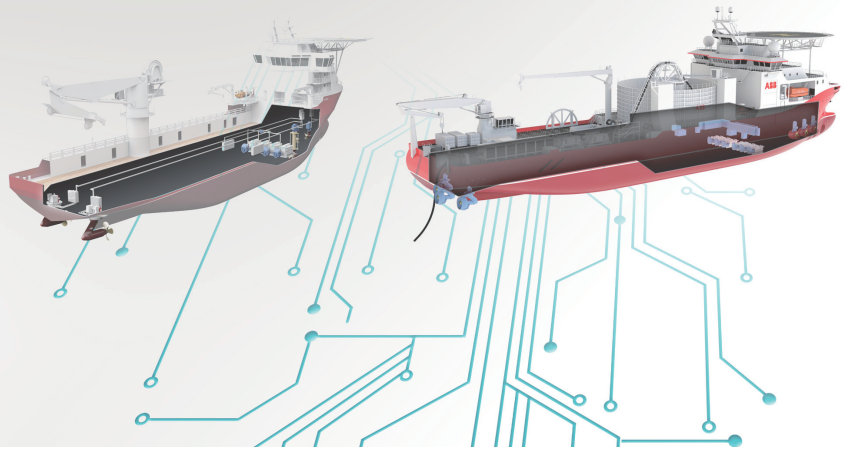


# DC 전기추진선 기술동향

김수남 | 현대일렉트릭 책임연구원  
박영호 | 현대일렉트릭 책임연구원



## 1. 서 론

### 선박은

통상적인 운항 과정에서 해양으로 오염물질을 배출하며, 이로 인한 해양 오염을

방지하기 위해 IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)는 해양오염 방지협약(MARPOL)을 제정하였으며, 협약의 부속서 VI에서는 선박에 의해 발생하는 대기오염을 규제하고 있다.

현재 시행 중인 환경규제는 MEPC(Marine Environment Protection Committee, 해양환경보호위원회) 회의를 통해 꾸준히 강화된 것으로, 전 세계 해역 내 모든 운항 선박연료의 황산화물(SOx) 함유량 제한은 기존의 3.5%에서 '20년 이후에는

0.5% 이하로 의무화 된다. 또한 북미·카리브해 ECA(Emission Control Area, 배출가스 통제구역) 지역의 선박 배기가스 중 질소산화물(NOx) 배출량은 '21년부터 Tier III가 적용되어 1kWh 당 3.4g을 넘을 수 없다.

온실가스 배출 감축조치도 '13년부터 의무적으로 이행하도록 규제하고 있다. 이에 따라, 400톤급 이상 신규건조 선박은 EEDI(Energy Efficiency Design Index, 에너지효율설계지수)에 기초한 이산화탄소 배출량을 '15년 10% 감축을 시작으로 '20년 20% 감축, '25년 30% 감축 등 5년마다 10%씩 감축해야 한다.

조선·해운업계는 강화된 환경규제에 대응하기 위해 기존 디젤연료 대신 LNG 또는 LPG 가스연료 등 친환경 연료를 사용하거나, 탈황 장치인 SOx Scrubber 및 NOx를 저감시킬 수 있는 SCR(Selective Catalytic Reduction, 선택적 촉매환원법) 설

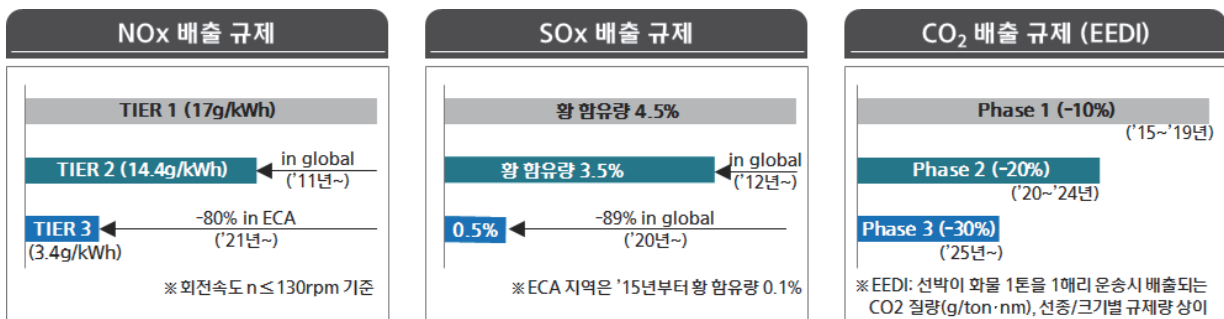
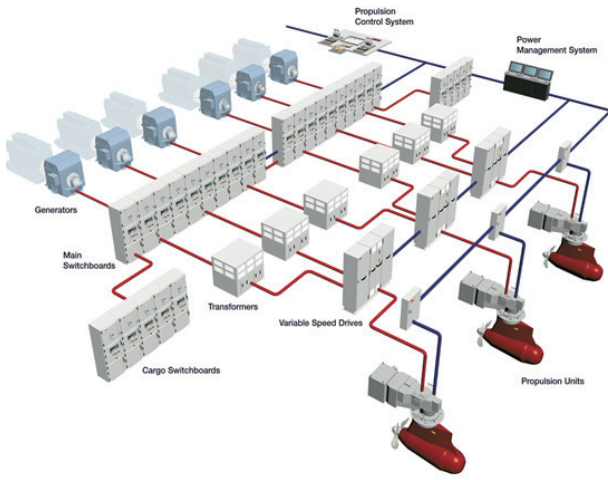
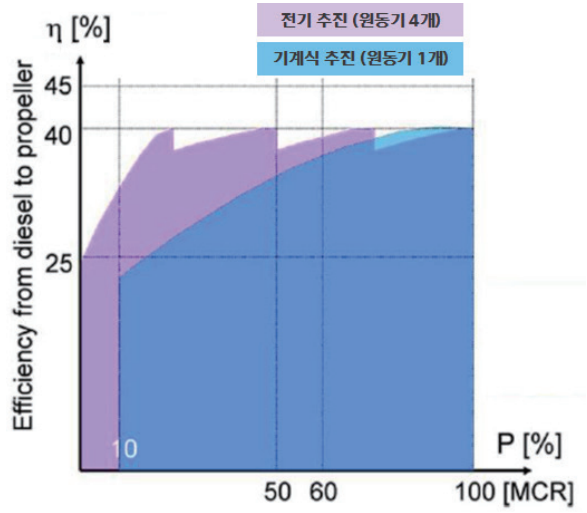


그림 1. IMO의 선박 배출가스 규제 강화



(a) 전기추진선 전장품 구성도(출처: ABB)



(b) 전기추진과 기계식 추진 효율 비교[1]

그림 2. 전기추진선 개념도 및 추진 효율

치 등 배출가스 저감 설비를 추가하는 방안을 일부 적용하고 있다. 그러나 가장 근원적인 해결책은 전체 추진시스템의 효율을 개선시켜 연료 소모량 자체를 절감하는 친환경 고효율 추진 솔루션을 확보하는 것이다.

이에 따라 선박 추진 체계의 주류였던 엔진의 기계식 추진 (Mechanical Propulsion)이 아닌 모터로 추진하는 전기추진(Electric Propulsion) 방식을 채용한 선박 발주량이 급증하고 있다. 최근에는 선박 내 전력망을 교류(AC)가 아닌 직류(DC) 기반으로 운용하여 엔진 가변속을 통해 연료소비량을 더욱 절감할 수 있는 차세대 DC 전기추진선이 새롭게 등장하여 점차 적용이 확대되고 있다. 본 기고는 선박 연비향상을 위한 추진시스템의 기술동향과 최근 확대 적용되고 있는 DC 전기추진시스템의 개념과 특징을 살펴보고, DC 보호시스템에 대한 기술이슈를 정리하였다.

## 2. 선박 추진시스템 기술동향

현재 대다수의 상선에 적용된 기계식 추진은 대형 메인엔진이 축(Shaft)으로 프로펠러와 직접 연결된 구조를 갖고 있으며, 메인엔진이 선박의 추진을 담당하고, 별도의 보조엔진이 발전기를 구동시켜 선박 내 각종 펌프, 환풍기, 조명장치 및 냉난방장

치 등의 일반 부하에 전력을 공급하는 시스템이다. 기계식 추진 선박은 대형 메인엔진을 위한 기관실의 용적이 커서 선박 구획 배치 및 선형 설계에 제한이 있으며, 메인엔진이 고장 나면 추진 자체가 불가능하고 회전축에서 소음과 진동이 크게 발생하는 문제점이 있으나, 가장 큰 단점은 추진 출력은 선속의 세제곱에 비례하기 때문에 50% 속도로 운전 시, 엔진 부하율은 12.5%밖에 되지 않아 상당한 연비 저하가 발생된다는 점이다.

전기추진선(Electric Propulsion System)은 주로 디젤 원동기로 구동되는 2~6대의 발전기에서 생산된 전기에너지로 추진모터를 회전시켜 프로펠러를 구동하는 선박으로 기계식 추진에 비해 많은 장점을 갖고 있다. 우선, 전기추진은 단일 메인엔진을 통해 추진하지 않고 여러 개의 엔진을 운용하므로 추진부하와 일반 전기 부하 조건에 따라 최적의 조건으로 발전기 동작 대수를 조절할 수 있기 때문에 중부하 이하 구간에서 추진 효율이 증가한다.

또한, 기관실의 용적이 대폭 줄어들어 공간이 확보되며, 엔진과 발전기는 임의로 배치할 수 있어 선형 설계의 유연성이 증가한다. 일부 발전기에서 고장이 발생해도 잔여 발전기의 운전을 통해 선박 내 추진 시스템을 계속해서 운용할 수 있다. 그리고 엔진은 저속 구역에서 토크가 적으나 모터는 추진 드라이브 제

전기추진은 단일  
메인엔진을 통해 추진하지 않고  
여러 개의 엔진을 운용

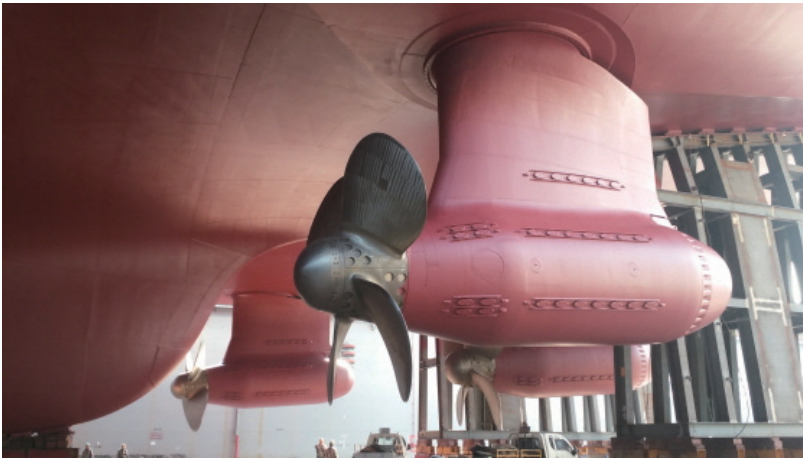
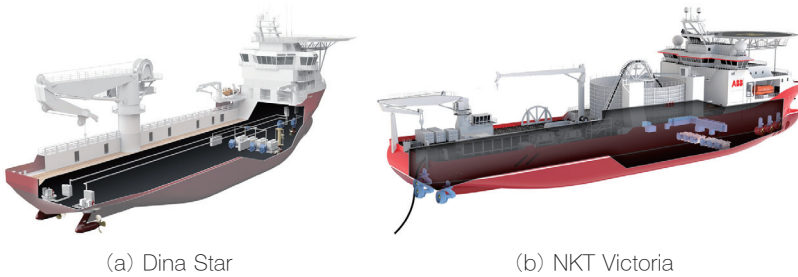


그림 3. 쇠빙LNG선에 장착된 Azipod



(a) Dina Star

(b) NKT Victoria

그림 4. ABB의 Onboard DC Grid 적용 선박 (출처: ABB)

표 1. Dina Star와 NKT Victoria의 주요 전장품 사양

구분	Dina Star	NKT Victoria
발전	2,350kWx4EA, 969kWx1EA 총10,369kW	2,240kWx6EA 총13,440kW
추진	2.2MWx2EA (Azipull120)	1.9MWx3EA (Azipod)
Thruster	Tunnel 925kW x 2EA, Azimuth 880kW x 1EA	Tunnel 925kW x 2EA, Azimuth 880kW x 1EA

어를 통해 정격 토크를 낼 수 있으며, 역방향 추진 및 회생운전이 가능하므로 동특성이 빠르고 선박 조향특성이 크게 향상되며, 소음과 진동도 줄어든다.

추진 장치는 전동기와 프로펠러가 일체화 되어 선체(Hull)의 부에 설치되는 Pod형 선회 장치 적용이 증가하고 있다. 이와 같은 선회 장치는 선체 바깥에 설치되므로 선형을 더욱 최적화할 수 있고 선적량도 증가시킬 수 있다. 또한, 추진 장치가 360도 자유롭게 회전방향을 바꿀 수 있어 선박의 회전반경을 기계식에 비해 절반 수준으로 줄일 수 있다.

이에 따라 선박의 추진시스템은 기계식 추진에서 전기식 추진으로 변경되는 추세이며, 위치 제어(Dynamic Positioning)가

필요한 해양작업선, 좁은 공간에서의 선회 능력과 저속에서 높은 토크를 필요로 하는 쇠빙선, 생존성이 요구되는 군함, 그리고 정속성이 요구되는 크루즈선 등을 중심으로 적용이 확대되고 있으며, LNG선과 같은 대형 상선에도 점진적으로 적용이 증가하고 있다. 원격제어가 용이하며, 시스템의 이중화 안정성을 높인 전기추진시스템은 자율운항 및 무인선 등 미래 스마트쉽 구현에도 필수적인 플랫폼이다.

최근, 해외 선진사를 중심으로 선박의 고연비를 실현하는 혁신적인 기술인 DC 배전을 전기추진에 적용한 DC 전기추진선 사례가 소개되고 있다. 기존 AC 배전을 채용한 전기추진시스템은 중부하 이하 운전 시 엔진의 효율이 저하되는 문제가 있으나, 이를 1,000Vdc급 LVDC 배전을 적용하여 엔진을 가변속 운전함으로써 효율을 더욱 향상시킬 수 있다.

특히, ABB와 SIEMENS는 자사 DC Grid 솔루션 브랜드를 출시하여 기술 개발과 사업화를 활발하게 진행하고 있다. ABB는 '12년 10MW급 5,000톤 규모의 PSV(Platform Supply Vessel, 해양작업지원선) Dina Star에 자사

Onboard DC Grid 솔루션 적용을 시작으로 총 13척의 DC 전기추진선을 건조했으며, SIEMENS도 BlueDrive PlusC 솔루션을 적용한 DC 전기추진선 실적을 20척 이상 보유하고 있다. 그림 4는 ABB사의 최초의 전기추진선 "Dina Star"와 '17년 Ship of the year에 선정된 케이블 부설선 "NKT Victoria"를 나타낸다.

근래에 ESS(Energy Storage System, 에너지저장시스템)와 연료전지(Fuel Cell)와 같은 대체 발전원의 가격이 지속적으로 하락하고 있어, 선박의 추진 및 발전용 동력원으로 동기발전기 외에 ESS와 연료전지를 하이브리드로 운영하는 복합 발전이 활용되는 사례가 증가하고 있다. 특히, 연료전지는 연소반응이 아닌 화학반응에 의한 전기 생산으로 배출가스 발생을 최소

	AC 전기추진선			DC 전기추진선	
추진 (배전)	기계식 추진 (AC 기반)	전기 추진 (AC 기반)	전기 추진 (AC 기반)	전기 추진 (DC 기반)	전기 추진 (DC 기반)
발전	ONLY 발전기 • 디젤발전기/이중연료 발전기 • LNG 연료 발전기	ONLY 발전기 • 디젤발전기/이중연료 발전기 • LNG 연료 발전기	복합 발전 • 발전기 + ESS (or FC) • 발전기 + ESS and FC	복합 발전 • 발전기 + ESS (or FC) • 발전기 + ESS and FC	Full Electric • ESS + FC • 육상에서 ESS/FC 연료 충전
배출가스	NOT Zero	NOT Zero	Close to Zero	Close to Zero	100% Zero
추진효율	低	中	中	高	高
계통설비	重	中	中	輕	輕

그림 5. 선박 추진시스템의 변화 추이

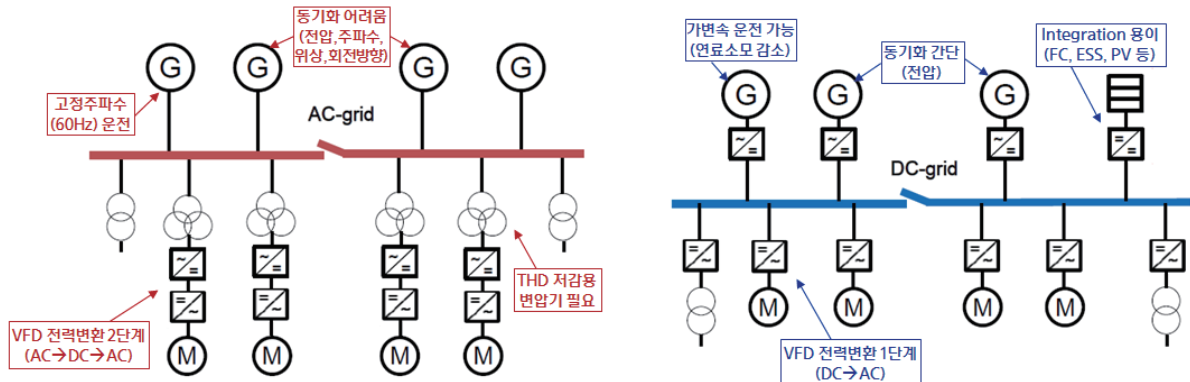


그림 6. AC 전기추진선과 DC 전기추진선 비교

화할 수 있으며, 정박 중에 배터리를 육상 전력(Shore Power)을 공급하는 장치인AMP(Alternative Maritime Power)를 이용해 급속 충전하면, 항만 지역에서 ESS 만을 이용해 디젤엔진 발전을 Off시킨 상태로 운항할 수 있어 연안의 근거리를 운항하는 중소형 선박은 현재의 기술 수준으로 Zero Emission을 달성할 수 있다.

DC 전기추진은 발전기와 함께 ESS와 연료전지 등의 분산전원을 연계하기 매우 용이하므로 하이브리드 복합 발전에 가장 적합한 시스템으로 볼 수 있다. 대표적인 사례로 SIEMENS의 DC 전기추진 솔루션과 1MWh 용량의 ESS를 탑재하여 노르웨이의 Lavik과 Oppedal 포트 사이 약 5.6km를 1일 편도 34회 운항하는 “Ampere”를 들 수 있다. 각 포트에는 AMP가 구축되어 육상 전기로 충전되어 운전하며 승객이 하차할 때나 선박을 운항하지 않는 야간에 배터리를 충전한다.

엔진 장치 없이 배터리 시스템이나 연료전지 발전만으로 구

성된 Full Electric 시스템으로 운전하는 선박도 상업 운전을 준비하고 있다. 세계 최초 100% Full Electric 선박인 “Future of the Fjords”는 비상용 엔진-발전기도 설치되지 않았으며, 노르웨이 피오르 해안에서 '18년에 운항될 예정이다.

### 3. DC 전기추진선 개념과 특징

기존 AC 기반으로 운용되는 전기추진선은 엔진-발전기가 정격 주파수를 유지하기 위해 출력 크기와 관계없이 고정 속도로 운전해야 하므로 저부하 운전 시, 엔진의 FOC(Fuel Oil Consumption) 효율이 저하되는 단점이 있다. 특히, 위치 제어(Dynamic Positioning)와 같은 20% 이하의 저부하 운전 시에는 연비가 급격하게 악화되며, 매연 등이 침전되어 엔진 수명이 감소하는 문제가 발생한다.

이 외에도 모터 추진용 VFD(Variable Frequency Drive)의 전



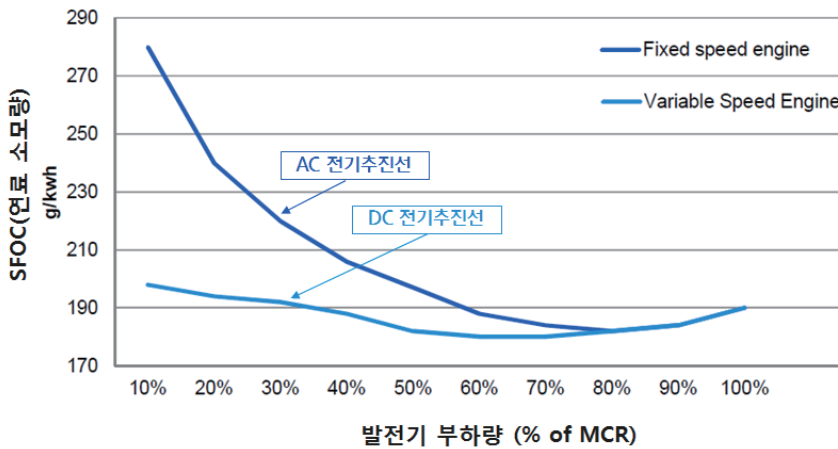


그림 7. 엔진 가변속 운전에 의한 연료 소모량 절감[2]

력변환이 2단계로 이뤄지므로 손실이 추가되며 AC 발전기 투입 시 전압, 주파수, 위상을 모두 고려해서 연계해야 하므로 동기화 과정이 복잡하다. 또한, VFD를 12펄스/24펄스 등의 DFE(Diode Front End) 방식을 사용 시 THD를 저감하기 위한 변압기를 추가로 설치해야 한다.

반면, 선박 내 전력망을 DC 기반으로 운용할 경우, AC 발전기와 DC 계통은 AC/DC 컨버터로 연계되므로 발전기의 주파수를 변동시켜 운전할 수 있으며, 정격 속도로 고정하여 운전할 필요가 없다. 엔진의 연비 특성 사양을 기준으로 최적 운전점에서 동작시키는 것이 가능하므로 낮은 부하율에서 엔진의 속도를 낮추는 엔진 가변속 운전으로 추진 효율을 향상하여 연료 소비 및 배기량을 감소시킬 수 있다.

가변속 운전을 통한 연료 절감은 경부하에서 더 크게 나타나므로 선박은 운항 프로파일에 따라 연료소모량 절감 패턴은 상이한 측면이 있으나 경부하 운전이 많은 선박의 경우 DC 배전을 적용했을 때 연료 절감 효과가 크다. ABB는 엔진 가변속 운전 및 ESS 연계를 통해 SFOC(Specific Fuel Oil Consumption)를 20% 이상 절감하였다고 발표하였다[2].

발전기 효율 향상 및 연료비 절감을 제외한 장점으로 전장품 무게 및 공간 절감, 발전기의 빠른 동기화, 분산전원 연계 시 변환손실 저감 등의 추가적인 장점이 있다. THD 저감을 위한 VFD 용 변압기가 불필요하므로 소용공간을 확보하고 전력설비의 무게를 줄일 수 있고, 메인 전압을 690Vac에서 1,000Vdc를 사용하면 선박 설치 현장에서의 큰 이슈사항인 케이블 무게를 20% 이상 줄일 수 있다.

선박에 DC 배전을 적용할 경우, 발전기 동기화가 필요하지 않아 10초 이내에 발전기 투입이 가능하며 ESS 연계 시 엔진 Ramp 제약을 완하시켜 전체 시스템의 동적 응답특성을 향상시킬 수 있다. 또한 배터리와 같은 ESS를 쉽게 Integration 가능하여 에너지 효율 향상과 친환경 효과를 개선시킬 수 있다. 그리고, 엔진이 최적 운전점에서 지속적으로 동작하기 때문에 고장 발생 빈도가 낮아져 유지보수 비용을 약 30% 절감할 수 있다.

한편, 엔진이 저속도에서 운전 중에 부하가 급격하게 증가하면, 엔진이 불안정해져서 Off될 위험이 있다. 이는 저속에서 엔진의 순시 최대 출력이 줄어든 상태에서 동특성이 부하 급변을 따라 잡지 못하기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 엔진의 가변속 운전 범위를 정속의 80~100% 수준에서만 유지하는 방법도 있으나, 이는 DC 배전의 최대 장점을 포기해야 하므로 바람직하지 않다. 이에 대응하여 ESS를 활용하는 방안이 많이 적용되고 있다. ESS가 부하 변동 분에 해당하는 전력 크기를 순시적으로 엔진 출력에 보상하는 동안 엔진은 서서히 새로운 운전 포인트로 가속하는 방식이다.

#### 4. DC 전기추진선 보호시스템 요구사항

DC 전기추진선은 이와 같은 다수의 장점에도 불구하고, LVDC 배전시스템의 보호 및 차단장치 분야의 기술적 어려움이 있다. 주요 기술 난제는 고장이 발생한 부분을 선택 차단하여 고장의 영향을 최소화하고, 고장이 없는 건전한 전력계통을 안정하게 운영하는 것이다. DC 차단기와 같은 기자재가 DC 보호를 위해 필요하나, 큰 차단전류와 빠른 차단속도에 대한 요구조건을 직면한다.

DC 보호시스템은 차단기 기반 보호방식과 컨버터 기반 보호방식으로 나뉠 수 있다. 그러나 컨버터 기반 보호방식의 경우, 컨버터와 시스템 내에 기생 경로가 존재하기 때문 컨버터 제어를 통해 모든 DC 고장전류를 억제할 수는 없다. 아래 그림은 IGBT

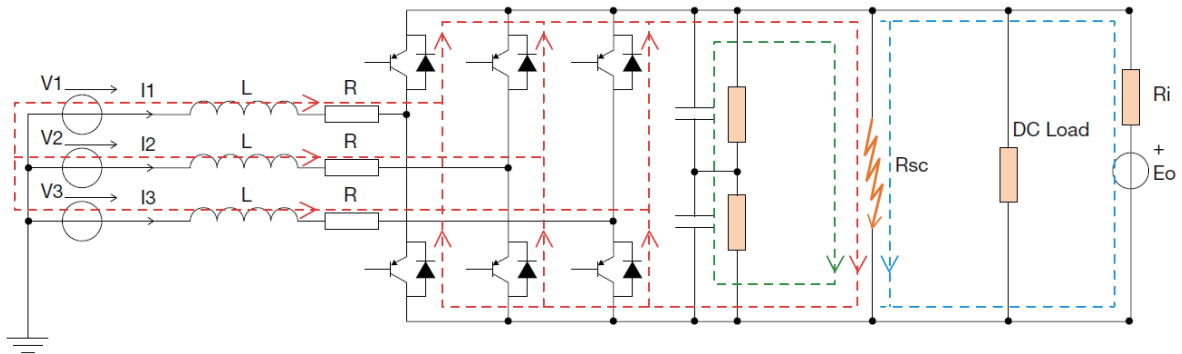


그림 8. DC 측에서 사고 발생 시 AFE 컨버터의 환류 Diode를 통한 고장 경로[4]

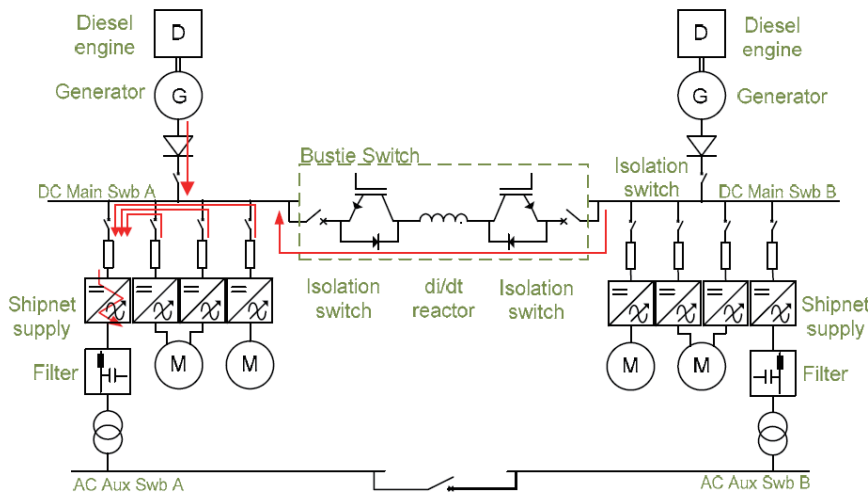


그림 9. DC Grid 내 VFD Feeder에서 고장 발생 시 고장전류 Path[5]

모듈을 스위칭 소자로 사용한 AFE(Active Front End) 컨버터의 DC 측 회로에서 단락이 발생했을 때의 고장전류 경로를 나타낸다. 고장이 발생하여 신속하게 스위칭 소자를 Off 시켜도 Freewheeling Diode를 통해 AC 측에서 DC 측으로 고장전류가 지속적으로 공급이 되므로 반드시 고장전류를 차단할 수 있는 전력기기가 필요하다.

이와 함께, DC 전류는 AC에서 나타나는 전류 영점 교차점이 존재하지 않기 때문에 전류가 흐르고 있는 상황에서 차단을 해야 하고 아크가 자연스럽게 소호되지 않으므로 차단 장치의 아크 소호 능력이 필요하고, DC 네트워크에 연결된 전력변환기의 전력용 반도체의 열적 내량이 매우 낮기 때문에 매우 빠른 고장전류의 차단이 요구된다.

이에 대한 솔루션으로 SIEMENS는 ILC(Intelligent Load Controller)라고 지칭하는 Bus-tie 차단기를 반도체 기반의

DC 차단기인 SSCB(Solid State Circuit Breaker)로 적용한 보호 시스템 Architecture를 제안하였다[3]. Bus tie에 적용된 SSCB는 고장 발생 시 10~50[us] 이내에 즉각적으로 고장전류를 차단하여 고장이 발생하지 않은 Zone에서는 사고의 영향이 거의 전달되지 않아 연속적인 운전이 가능토록 한다.

SSCB의 기본 동작 원리는 과전류 및 전류 변화율을 감지하고 1차측과 2차측의 전압을 감지하여 시스템 내에 고장 발생

을 매우 빠른 속도로 판단한다. 단락 시 SSCB 내 인덕턴스 성분에 의해 DC 전압은 제로가 되지 않으며, 차단 시간은 전체 시스템 임피던스에 영향을 받는다. SSCB가 고장을 차단한 이후에는 VFD Feeder에 설치된 반도체 퓨즈가 DC Link에 연결된 커패시터의 방전 고장전류와 퓨즈의 용단 특성에 따라 고장이 발생한 Feeder만 선택적으로 트립되도록 한다.

SSCB는 DC 전기추진선 보호시스템의 핵심 요소기기로서, 국내 SSCB 연구개발은 비교적 최근 시작되어 세계 수준과 비교하면 아직 경쟁력이 부족한 실정이다. 시스템의 고 신뢰도와, 가격 경쟁력, 효율 향상을 종합적으로 달성하기 위해선 시스템 설계 단계부터 적절한 보호시스템 설계를 고려해야 하며, 이를 위해 선박 DC 보호시스템에 대한 독자적인 솔루션 확보가 필요하다. 이를 위해 시스템 설계 및 전장품 사양 선정 단계에서 시스템 모델링을 통한 DC 단락전류 특성이 해석되어야 하며, 각각의 보

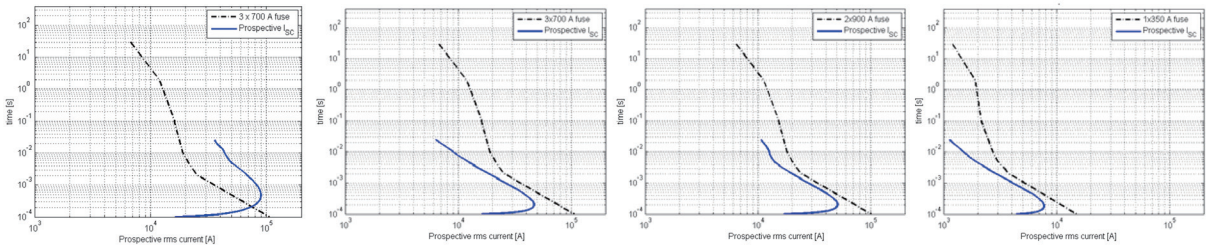


그림 10. 퓨즈의 Pre 아크 커브와 각각의 VFD에 흐르는 단락전류의 커브[3]


호시스템 동작 특성과 단락전류 에너지를 비교하여 문제가 없는지 평가하는 기술이 필요하다.

참고문헌

5. 결 론

선박 추진시스템은 지난 한 세기동안 기계식 추진이 주류를 이루어 왔으나, 환경규제 대응에 강점을 갖고 있는 전기추진 방식으로 점차 변화하고 있다. 최근에는 직류 배전을 적용하여 AC 대비 추가적인 연료 절감과 계통 설비의 무게 및 부피를 감소시킬 수 있는 DC 전기추진선의 효용성이 이미 입증되어 시장 급성장 예상된다. 현재 DC 전기추진선 시장은 10~15MW급 중형급 선박에 LVDC 배전 기술을 적용하는 수준이나, 향후 30MW급 이상의 LNGc, FSRU 등의 대형 상선이나 군함에 MVDC 기술이 적용될 것으로 예상된다.

그러나, 지속적인 환경규제 강화는 조선 산업의 판도를 좌우하는 핵심 위협요소이며, 장기적으로 배기가스 배출량, 연비, 운항 효용성 등을 최적화하는 친환경 고효율 선박의 보편화를 유도할 것이다. 따라서, 국내 조선사와 전력 기자재 납품업체는 기술력 확보와 요소 핵심부품 국산화 개발을 통해 차세대 친환경 선박의 기술 경쟁력을 확보해야 한다.

현재 DC 전기추진선에 대한 설계, 운용기술 및 핵심 부품의 요소 기술은 선진사에서 독점적으로 확보한 상태이며, 전장품 패키지 단가를 지속적으로 낮추고 있어 기술 격차가 벌어지고 있다. 차세대 글로벌 조선시장을 주도하기 위해선 LVDC 및 MVDC 기술의 제품 국산화 확보가 매우 시급하며, 국내에서도 DC 전기추진선 사업화를 위한 선박 DC 전력계통 설계 및 보호 등의 엔지니어링 기술과 전장품 패키지 Integration 분야의 연구개발이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 

[1] J. F. Hansen, F. Wendt, "History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends," Proceeding of the IEEE, vol. 103, No. 12, Dec. 2015.

[2] ABB, "Onboard DC Grid, The step forward in Power Generation and Propulsion", 2012

[3] S. Settemsdal, E. Haugan, K. Aagesen, B. Zahedi, "New Enhanced Safety Power Plant Solution for DP Vessels Operated in Closed Ring configuration", Dynamic positioning conference, 2014.10

[4] ABB, "Fault in LVDC Microgrids With Front-End Converters", Technical Application Paper No.14, 2015

[5] E. Haugan, H. Rygg, A. Skjellnes, L. Barstad, "Discrimination in Offshore and Marine DC Distribution Systems", IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, 2016.10

[6] L. Qi, A. Antoniazzi, L. Raciti, D. Leoni, "Design of Solid-State Circuit Breaker-Based Protection for DC Shipboard Power Systems", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, no. 1, pp. 260-268, 2017.03

[7] S. Kim, D. Dujic, Y. Park, and S. N. Kim, "Review of Protection Coordination Technologies in DC Distribution Systems", ICEE 2018

[8] 천강우, "전기추진선박의 개념 및 기술현황 소개", 한국선급, 2018.02

[9] 한국에너지공단, "노르웨이, 100% 전기추진선박 개발", 2017년도 에너지이슈 브리핑, 2017.06