

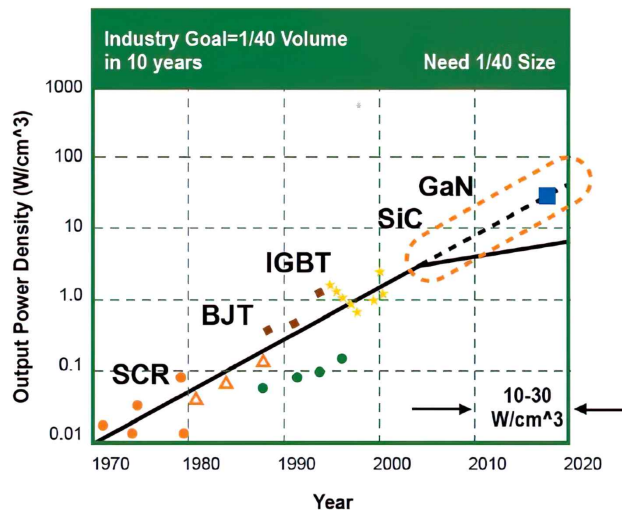
Global Report

전기 구동장치에서의 전력밀도, 효율 및 신뢰성 향상

1. 개요
2. 광대역 밴드 갭 기반 전력 소자의 부가가치
3. 최첨단에서 그 이상의 발전으로
4. 고전압 구배를 줄이기 위한 혁신적인 방법론
5. 결론

1. 개요

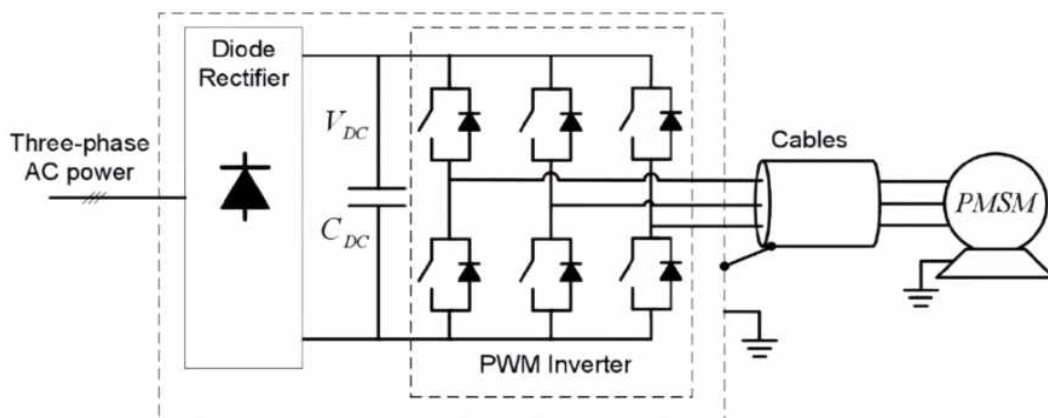
최근 몇 년 동안 점점 더 강력하고 가볍고 효율적인 전기 및 전자 장치를 구현해야 하는 필요성이 모든 산업 부문에서 최우선 목표가 되었습니다. 이러한 이유로 실리콘 카바이드(SiC) 및 질화 갈륨(GaN) 반도체 재료로 만든 새로운 광대역 밴드 갭 기반의 전력 소자의 출시는 과학 및 산업계에서 활발한 관심을 불러 일으켰습니다. 자동차 및 항공 우주 산업은 이러한 소자를 가장 많이 활용할 수 있는 산업 중 하나입니다. 이러한 맥락에서 “More Electric Vehicle”(MEV) 및 “More Electric Aircraft”(MEA)에 초점을 맞춘 최근 개발 동향에 따르면 유압/기계식 액추에이터를 전기 구동장치로 교체하면 효율과 전력 밀도가 대폭 향상됩니다. 이는 무게 감소, 적은 연료 소비, 소음 및 오염 물질 배출 감소를 의미합니다.



<그림 1. 전력 소자의 전력밀도 추세>

(Electric drives improved in density, efficiency and reliability, www.electricmotorengineering.com.p1.)

2. 광대역 밴드 갭 기반 전력 소자의 부가가치



< 그림 2. 전기 변환기-케이블-모터 시스템의 단순화 된 체계 >

(Electric drives improved in density, efficiency and reliability, www.electricmotorengineering.com.p2.)

광대역 밴드 갭 전력 소자를 기반으로 하는 컨버터는 실리콘(Si) 기반의 기존 장치보다 우수한 특성을 가지고 있습니다. 이러한 소자는 더 빠른 스위칭 전환, 작은 전력 손실을 제공하며 실리콘 기반의 소자보다 더 높은 전압과 온도에서 작동 할 수 있으므로 컨버터의 냉각 시스템에서 부피와 무게를 더욱 줄일 수 있습니다.

«Modena and Reggio Emilia 대학의 연구팀의 일원인 Stefano Nuzzo 박사가 Davide Barater 교수, Giovanni Franceschini 교수, Marco Pastura 교수와 함께 설명하는 SiC 및 GaN 반도체 재료를 기반으

로 하는 새로운 "전기 변환기, 기계 및 구동장치"는 위에서 언급 한 목표와 완벽하게 일치합니다».

그러나 다른 환경적 스트레스(온도, 압력, 습도 등)의 결합 된 작용 외에도, 도달 할 수 있는 고전압 구배와 결합 된 전기적 스트레스는 SiC 및 GaN 반도체를 사용하는 컨버터로 구동되는 전기 모터의 절연 시스템의 수명을 단축시킬 수 있습니다.

따라서 이러한 유형의 전기 구동장치에서 신뢰성 문제가 발생할 수 있습니다. 또한 전력 변환기를 모터에 연결하는 전원 공급 케이블의 물리적 길이는 이른바 "임계 길이"와 비슷하거나 초과 할 수 있습니다. «이 경우 - Nuzzo 박사는 강조합니다. 높은 상승 및 하강 전압 펄스는 케이블이 반사 현상으로 인해 케이블 자체를 따라 앞뒤로 이동하는 전송선처럼 동작하도록 만듭니다. 이러한 고주파 현상은 모터 단자에서 위험한 과전압을 유발할 수 있으며, 이는 최대 2 배의 직류 버스 전압, 최악의 경우 모터 권선의 전기 절연을 심각하게 손상시킬 수 있습니다».

특히 전기 모터 단자의 전압 수준으로 인해 절연체의 유전 강성 값을 초과하면, 절연 물질의 일부를 통한 전도 현상이 발생하여 이른바 부분 방전 현상이 발생합니다. 부분 방전은 전기 절연체 표면에서 발생하여 완전한 고장까지 점진적인 침식을 유발합니다. 임계 길이는 전환 시간에 비례하므로 SiC 및 GaN 소자의 매우 짧은 스위칭 시간으로 인해 케이블을 몇 미터 연장해도 문제가 발생했습니다. 또한, 현재 항공기용으로 제안 된 전력 전송 네트워크는 전도 손실을 최소화하기 위해 직류에서 버스에 더 높은 전압 레벨의 사용이 강조되고 있습니다.



< 그림 3. 권선 사이의 전압 분포에 대한 고전압 구배의 영향을 연구하기 위해 구현 된 "Motorettes" >
(Electric drives improved in density, efficiency and reliability, www.electricmotorengineering.com.p3.)

그러나 직류에서 버스의 전압 상승은 고정자 권선 절연에 추가 스트레스를 유발하여 넓은 밴드 갭 기반 소자 사용과 관련된 문제를 악화시킵니다.

3. 최첨단에서 그 이상의 발전으로

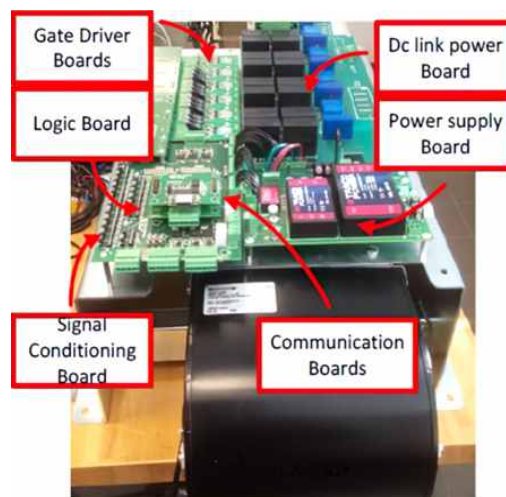
RAISE - “신뢰할 수 있는 항공기 전기 절연 선택” 프로젝트는 이러한 맥락에서 구성됩니다. 2018년 3월에 시작된 이 프로젝트는 유럽 규모의 주요 연구 프로그램인 Clean Sky 컨소시엄이 자금을 지원하며, Horizon 2020 자금 시스템에 포함되어 있습니다. 이 프로젝트는 CO₂, 온실 가스 및 음향 오염의 감소를 위해 혁신적인 해결책을 개발하는 목표를 가집니다.

Giovanni Franceschini 교수가 이끄는 Modena and Reggio Emilia 대학의 MeltingLab은 RAISE 프로젝트의 코디네이터이며 Davide Barater 교수는 주요 연구자입니다. MeltingLab의 다른 두 멤버인 Stefano Nuzzo 박사와 Marco Pastura는 프로젝트 작업을 지원합니다.

MeltingLab은 "Enzo Ferrari"의 엔지니어링 부서의 주요 그룹과 협력하고 있으며, 자동차, 전기 구동 장치, 산업용 전자 및 전기 기계 분야를 운영하는 가장 유명한 지역 기업과 협력합니다.

지난 몇 년 동안이 그룹의 연구는 전기를 이용하는 이동성에 중점을 두었습니다. 주로 SiC 모듈을 사용하는 전력 변환기의 진보된 프로토타입을 통해 고성능 전기 모터 제어를 위한 전기 구동장치 설계와 고효율 및 고신뢰성을 갖춘 전기 기계 설계에 중점을 두었습니다.

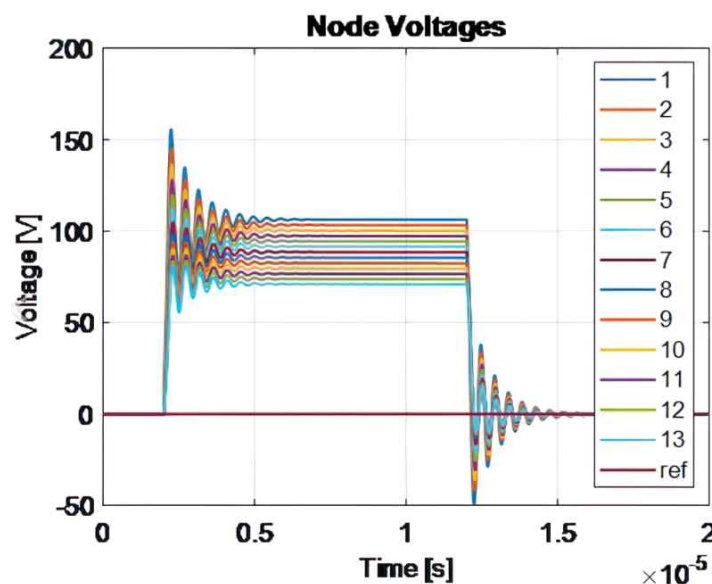
이전에 강조된 모든 중요 사항을 고려할 때 앞서 언급 한 광대역 밴드 갭 기반 반도체 소자의 경우, 전기 기계 및 전자 전력 장치에 현재 사용 중인 절연 재료가 더 높은 전력 공급 전압 및 스위칭 기율을 이용하는 application에 적합한 지 여부를 먼저 평가하는 것이 좋습니다. 따라서 RAISE 프로젝트의 첫 번째 단계는 최첨단의 분석과 현재의 항공 우주 분야에서 사용되는 절연 재료 및 시스템의 실험적 평가에 전념했습니다. 이후 고전압 구배의 영향을 더 잘 이해하기 위해 항공 우주 환경의 일반적인 작동 조건과 교류 전압(115Vrms의 3상, 230Vrms의 3상)의 의존성을 고려하여 전력 변환기, 케이블 및 전기 기계로 구성된 일반적인 시스템에서 관찰 된 값을 정량적으로 평가하는 몇 가지 모델을 개발했습니다.



< 그림 4. 다양한 수준의 전압 기율을 설정할 수 있는 SiC 기반 컨버터의 시제품 >

(Electric drives improved in density, efficiency and reliability, www.electricmotorengineering.com.p2.)

직류 버스 전압에 대한 한계는 1kV로 고정되었으며 고려되는 최대 전압 기율은 20kV/μs입니다. 그럼에도 불구하고 이러한 연구를 위해 그들은 다음 미래에 도달 할 수 있는 더 높은 전압 및 기율 레벨도 고려했습니다. «누조 박사가 지정한 이 모델은 전기 기계 권선 내부의 전압 분포와 기계의 주요 매개 변수에 대한 의존성을 평가할 수 있습니다».



< 그림 5. 전기 기계 권선의 일반적인 전압 분포 >

(Electric drives improved in density, efficiency and reliability, www.electricmotorengineering.com.p4.)

이러한 모델의 유효성과 정확성을 입증하고 시뮬레이션 매개 변수를 사용자가 정의하기 위해서, 적절하게 감긴 일반적인 고정자 슬롯을 보내는 것을 나타내는 "motorettes"를 만들었습니다. 그 후, 그들은 또한 전기 모터의 몇 가지 샘플을 만들어 몇 가지 특정 실험 테스트를 수행했습니다. 실험 벤치는 일반적인 컨버터 케이블 모터 시스템을 나타내며, 이를 사용하여 다양한 수준의 직류 버스 전압 및 전압 구배를 설정할 수 있으며, 필요한 경우 사전 설정된 최대값인 20kV/μs를 초과합니다.

※ RAISE 프로젝트(RELIABLE AIRCRAFT ELECTRICAL INSULATION SYSTEM SELECTION)

RAISE(Reliable aircraft electrical insulation system selection)는 유럽 연합의 Horizon 2020 연구 및 혁신 프로그램에 따라 Clean Sky 2 공동 사업으로부터 자금을 받는 30개월 프로젝트입니다. 이 컨소시엄은 이탈리아에서 가장 유명한 대학 인 Modena and Reggio 대학(UniMoRe)과 Bologna 대학(UniBo)을 하나로 모았습니다.

UniMore는 프로젝트 코디네이터로서 컨소시엄을 이끌고, 항공 우주 부문에서 다국적 기업인 LiebherrAerospace는 프로젝트의 주제 관리자 역할을 합니다. RAISE는 실리콘 카바이드(SiC) 및 질화 갈륨(GaN)의 넓은 밴드 갭 소자로 구성된 컨버터에 의해 구동되는 전기 기계 권선의 부분 방전 및 전기 절연 파괴를 조사하고 평가하는 것을 목표로 합니다. 이 프로젝트의 목표는 성능과 효율성을 손상시키지 않으면서 전력 변환기, 기계 및 전체 전기 구동장치의 신뢰성을 개선하는 솔루션을 제공하는 것입니다. 따라서, 미래의 항공기는, "더 전기화"되는 것 외에, 더 작고 가볍고, 더 신뢰할 수 있는 것이며, 연료 소비 및 환경에 미치는 영향은 주로 CO₂ 배출량을 크게 줄일 것입니다. 프로젝트의 결과를 개념적으로나 실질적으로 동일한 전기화 추세가 일어나고 있는 자동차 산업으로 이전하는 것이 가능할 것입니다.

4. 고전압 구배를 줄이기 위한 혁신적인 방법론

심층 연구 대상 프로젝트는 절연 시스템의 부분 방전 현상이 언제 시작되는지 확인하는 데 목적이 있습니다. «이 두 번째 단계에서 - Nuzzo 박사는 강조합니다. - 우리는 부품의 수명 추정을 기반으로 몇 가지 모델을 개발했으며 전압 변화 속도가 부분 방전에 미치는 영향을 연구하기 위한 몇 가지 실험 테스트를 수행했습니다. 조사는 온도, 습도 및 압력 측면에서 환경 조건의 변화도 고려하여 실행되었습니다».

최종 목표는 개발된 모델이 절연 시스템의 서비스 수명 추정을 통해 부분 방전이 "없는" 부품의 세부 설계를 위한 몇 가지 지침을 나타내도록 하는 것입니다. 부분 방전이 없는 절연 시스템을 설계할 수 있는 능력은 전기 시스템의 모든 구성 요소와 결과적으로 전체 항공기의 신뢰성을 부여합니다.

이것은 MEA 맥락에서 항상 제한 요소 중 하나였던 전기 구동 및 전체 항공기의 신뢰성을 향상시킬 것입니다. «Nuzzo 박사는 이러한 개선은 장·단기적으로 긍정적인 영향을 미칠 것이며 유럽 전기 구동장치 제조업체가 아시아 시장에 맞서고 세계적으로 경쟁력을 높일 수 있다고 결론을 내립니다».

※ AUTO-MEA 프로젝트(AUTOMated Manufacturing of wound components for next generation Electrical Machines)

2020년에 중에 활동이 수행되어 2020년 10월까지 계획된 프로젝트가 끝날 때까지 계속되는 최종 프로젝트 단계는 요구되는 효율성 및 전력 밀도 요구 사항을 손상시키지 않고 기계 입력 단자에서 고전압 구배를 줄이기 위한 혁신적인 방법론의 연구 및 개발로 구성됩니다. Nuzzo 박사가 지정한 이 프로젝트의 결과는 항공기 기내에서 광대역 밴드 갭의 SiC 및 GaN 반도체 재료를 기반으로 하는 전력 변환기를 사용할 수 있게 할 것입니다. 이러한 컨버터는 높은 전력 밀도를 특징으로 하며, 직접적인 결과로 항공기 자체의 중량, 연료 소비 및 환경 영향을 크게 줄일 수 있습니다. 프로젝트 자체의 결과는 모터와 전

기 구동장치의 설계자가 솔루션을 테스트하고 시제품의 구현 전에 예방 조치를 채택하는 데 사용할 것이다. 2019년 11월부터 UniMoRe는 유럽 프로젝트 AUTO-MEA의 코디네이터로도 활동하고 있다. Clean Sky 2 유럽 연구 프로그램에 포함된 이니셔티브의 목표는 항공우주 분야에서 사용될 전기 모터의 권선 부품을 제조하기 위한 새로운 방법론을 개발하는 것입니다.

AUTO-MEA 컨소시엄은 UniMoRe와 함께 자동차 분야의 전동기의 고정자 제조 라인을 생산하는 기준 기업(reference company)인 CopperING srl과 프로젝트 주제 관리자 역할을 하는 Nottingham 대학으로 구성됩니다. 공압 및 유압 액추에이터를 소형 및 신뢰성으로 돋보이는 전기 구동장치로 교체하는 것은 오늘날 가장 유망한 트렌드 중 하나이지만 전기 기계 설계를 위한 혁신적인 솔루션이 필요합니다. AUTO-MEA는 저주파에서 "random" 권선에 비해 많은 이점을 제공하면서 고주파에서 전기 기계의 효율성을 떨어뜨리는 사전 형성된 "hairpin" 권선의 유형화에 초점을 맞출 것입니다. 이 프로젝트는 hairpin 권선의 작동 주파수 경계를 넓히는 것을 목표로 합니다. AUTO-MEA의 결과는 다른 부문, 특히 Emilia(Reggio Emilia사-자동차 통신장비의 세계적 회사) 영토가 세계적 규모의 주인공인 자동차 산업에서도 관련 있는 영향을 미칠 것입니다.

6. 결론

광대역 밴드 갭 전력 소자를 기반으로 하는 컨버터는 실리콘(Si) 기반의 기존 장치보다 우수한 특성을 가지고 있다. 이러한 소자는 더 빠른 스위칭 전환, 작은 전력 손실을 제공하며 실리콘 기반의 소자보다 더 높은 전압과 온도에서 작동 할 수 있으므로, 높은 효율을 가지며 컨버터의 부피와 무게를 더욱 줄일 수 있다.

광대역 밴드 갭 전력 소자 기반의 전력변환장치에서, 더 빠른 스위칭 전환으로 인해 발생하는 고주파 현상은 모터 단자에서 위험한 과전압을 유발할 수 있으며, 이는 최대 2 배의 직류 버스 전압, 최악의 경우 모터 권선의 전기 절연을 심각하게 손상시킬 수 있다. 특히 전기 모터 단자의 전압 수준으로 인해 절연체의 유전 강성 값을 초과하면, 절연 물질의 일부를 통한 전도 현상이 발생하여 이른바 부분 방전 현상이 발생한다.

또한 전도 손실을 최소화하기 위해 직류에서 버스에 더 높은 전압 레벨의 사용이 강조되고 있으며, 직류에서 버스의 전압 상승은 고정자 권선 절연에 추가 스트레스를 유발하여 넓은 밴드 갭 기반 소자 사용과 관련된 문제를 악화시킨다.

따라서 전기 기계 및 전자 전력 장치(광대역 밴드 갭 기반 반도체 소자 적용)에 현재 사용 중인 절연 재료가 더 높은 전력 공급 전압 및 스위칭 기울기를 가질 때 고전압 구배의 영향(신뢰성)을 평가한다. 결론적으로 광대역 밴드 갭 전력 소자를 기반으로 하는 컨버터는 빠른 스위칭 전환으로 인해 전기 절연 손상 및 부분 방전 현상이 발생하며, 이를 해결하기 위해 고전압 구배의 영향(신뢰성)을 평가하고 설계에 반영함으로써 항공기 및 자동차와 같은 신뢰성을 중시하는 산업분야에 부분 방전이 없는 절연시스템을 개발할 수 있다.

<원문제목> Electric drives improved in density, efficiency and reliability

<원문출처> Electric Motor Engineering,

<https://www.electricmotorengineering.com/electric-drives-improved-in-density-efficiency-and-reliability/>