

# 함정용 다기능 AESA 레이더 시스템을 위한 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈 개발

정민길<sup>\*1)</sup> · 이원영<sup>1)</sup> · 김상근<sup>1)</sup> · 김수태<sup>2)</sup> · 권영수<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> LIG넥스원(주) C41STAR연구개발본부 레이더연구소

<sup>2)</sup> (주)에너벤

<sup>3)</sup> (주)제이앤에스

## Development of High Voltage, High Efficiency DC-DC Power Module for Modern Shipboard Multi-Function AESA Radar Systems

Min-Kil Chong<sup>\*1)</sup> · Won-Young Lee<sup>1)</sup> · Sang-Keun Kim<sup>1)</sup> · Su-Tae Kim<sup>2)</sup> · Simon Kwon<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> R&D(C41STAR), Radar R&D Lab., LIGNEX1 Co., Ltd., Korea

<sup>2)</sup> Enerven Co., Ltd., Korea

<sup>3)</sup> JNS Co., Ltd., Korea

(Received 15 September 2020 / Revised 13 January 2021 / Accepted 15 January 2021)

### Abstract

For conventional AESA radars, DC-DC power modules using 300 Vdc have low efficiency, high volume, heavy weight, and high price, which have problems in modularity with T/R module groups. In this paper, to improve these problems, we propose a distributed DC-DC power module with high-voltage 800 Vdc and high-efficiency Step-down Converter. In particular, power requirements for modern and future marine weapons systems and sensors are rapidly evolving into high-energy and high-voltage power systems. The power distribution of the next generation Navy AESA radar antenna is under development with 1000 Vdc. In this paper, the proposed high-voltage, high-efficiency DC-DC power modules increase space(size), weight, power and cooling(SWaP-C) margins, reduce integration costs/risk, and reduce maintenance costs. Reduced system weight and higher reliability are achieved in navy and ground AESA systems. In addition, the proposed architecture will be easier to scale with larger shipboard radars and applicable to other platforms.

Key Words : Multi-function(다기능), Active Phased Array(능동위상배열), AESA(Active Electronically Scanned Array, 능동 전자주사 배열), Distributed Power Distribution Architecture(분산형 전원분배 구조)

### 1. 서론

최근 함정용 레이더는 향상된 감도와 함께 해상이

\* Corresponding author, E-mail: [minkil.chong@lignex1.com](mailto:minkil.chong@lignex1.com)  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

나 육상 클러스터 환경 하에서 저공 순항미사일과 탄도탄 등을 탐지할 수 있도록 안정성과 성능 개선이 요구되고 있다. 레이더 수요가 증가하는 것과 동시에, 획득·운용유지 비용을 절감하고, 신뢰성을 향상시키며, 정비요소를 줄일 필요가 있다. 이러한 진화하는 합정용 레이더 시스템 요구를 해결하기 위한 기본 기술로 능동위상배열 안테나가 떠오르고 있으며, 국내업체, 해외 선진업체와 관련 연구기관들이 개발 노력에 큰 역할을 하고 있다<sup>[1]</sup>.

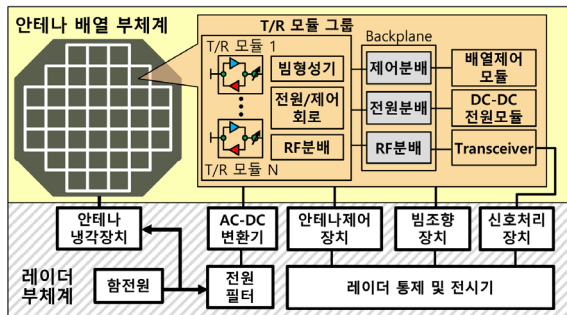


Fig. 1. Block diagram of an phased array radar systems

Fig. 1은 능동위상배열 레이더 시스템의 일반적인 블록도이다. 능동위상배열은 송신/수신 안테나의 개구면 구성품인 복사소자, 레이더, 안테나 구조물; 다수의 T/R 모듈, 제어회로, DC-DC회로; RF 빔 형성기, DC 분배기, 신호/제어 분배기와; 빔 조향 제어장치들을 포함한다. AC-DC 변환기는 합정의 AC전원을 레이더 안테나 배열에 공급되는 DC전원으로 변환한다<sup>[2]</sup>.

AESA(Active Electronically Scanned Array) 레이더용 능동위상배열 안테나의 원리는 간단하지만, 설계를 결정하는 요소는 광범위하고 심지어 다소 복잡하다. 개구면 크기(Aperture size) 조정, 빔 패턴 합성, 빔 스위칭 속도 등의 설계 변수는 거의 변경되지 않았다. 반면 반도체소자 부품기술 개발은 최근 동안 크게 발전하여 능동위상배열 안테나의 설계와 성능에 지속적이고 중요한 영향을 주고 있다. 능동위상배열 안테나의 핵심은 T/R(Transmit/Receive) 모듈이다. 특히 질화갈륨(GaN, Gallium Nitride) 마이크로파 전력소자 기술의 등장으로 양산에 필요한 성능, 우수한 신뢰성, 허용 가능한 비용을 갖춘 T/R 모듈 개발이 가능해졌다.

능동위상배열 안테나 설계에 있어 방사 개구면, RF 빔 형성/제어, DC 분배 회로와 전기적/기계적 인터페이스

설계들이 주요 고려사항이다. 합정, 항공, 육상 장비의 AESA(Active Electronically Scanned Array) 레이더 플랫폼들은 공간(크기), 무게 및 전력 등이 제한된다. 이는 SWaP-C(Space(Size) : 공간(크기), Weight : 무게, and Power : 전력 - Cooling : 냉각)로 각 플랫폼마다 설계변수로 작용하는 중요한 요구조건이다. 특히 합정용 4면 운용 AESA 레이더 경우, 수 MW 이상의 소모전력이 필요하다.

AESA 레이더 안테나의 DC 전원 분배 시스템은 분산형 또는 중앙집중형 구조를 사용하여 안테나 배열로 분배된다. 분산형 구조에서 단일 DC-DC 전원모듈은 작은 T/R 모듈 그룹(2 ~ 16개)과 분리 또는 일체된 모듈로 구성되어 배열 전체에 분산 배치된다. 분산형 구조의 DC 전원분배 시스템은 전원 인터페이스가 간소해진다. 반면 중앙집중형 경우 T/R 모듈과 DC-DC 전원모듈이 분리되어 T/R 모듈에 필요한 모든 전원들을 생성하여 각각의 모듈에 필요한 전원을 공급하기 때문에 인터페이스가 복잡하게 된다<sup>[2]</sup>.

해상 합정용 레이더는 유지보수가 용이하도록 배열 설계를 최적화하기 위해 대부분의 능동 전자소자 모듈은 LRU(Line Replaceable Unit, 현장교환 품목)로 구성되며, 여기에는 T/R 모듈, DC-DC 전원모듈 및 다양한 제어/프로세서 구성품들이 포함된다. 고장 발생 시 신뢰성과 시스템 영향은 시스템이 어느 수준까지 LRU로 설계되었는지 여부에 따라 결정된다. 최소 LRU 레벨까지 고장 격리 기능을 제공하여 유지보수 작업 중에 필요한 정비시간을 최소화해야 하며, 기계 구조물, 냉각 분배시스템, RF 빔 형성기, DC 전력분배 및 케이블류들은 일반적으로 해상에서 수리가 필요 없도록 충분한 신뢰성을 보장해야 한다<sup>[3,4]</sup>.

유지보수(Operate and Support, O&S) 비용절감의 핵심은 개별 LRU의 신뢰성과 중복성이다. LRU는 고장 발생 시 비용, 부품 수 및 성능에 미치는 영향이 최소화되도록 크기가 최적화되고, 배열 모듈화와 유지보수 접근성이 고려된 최적화된 크기여야 한다<sup>[2]</sup>.

능동위상배열 안테나의 획득비용은 주로 T/R 모듈에 의해 결정되지만, DC-DC 전원모듈 비용도 상당한 부분을 차지한다. 제안하는 분산형 병렬구조의 신뢰성이 높은 T/R 모듈과 DC-DC 전원모듈 설계는 기존 능동위상배열 레이더 시스템보다 향상된 신뢰성과 O&S 비용을 절감할 것으로 예상된다.

먼저 2장에서는 합정 AESA 레이더용 고전압·고효율 DC 전원 분배시스템을 소개하고, 3장에서는 크기,

중량, 전력 및 발열량 마진 확보와 신뢰성을 향상시킨 분산형 고전압·고효율 DC 배전 시스템과 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈 설계 및 시뮬레이션 결과를 소개한다. 4장에서는 구현된 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈의 성능시험 결과를 소개하고 5장에서는 결론을 맺는다.

## 2. 함정 AESA 레이더용 고전압·고효율 DC 전원 분배 시스템

본 장에서는 함정 AESA 레이더 안테나의 DC 전원 분배 시스템 개발동향과 상용 DC-DC 컨버터 기술 조사를 통해 미래형 AESA 레이더 DC 전원 분배 시스템에 적합한 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈을 제시하고자 한다.

### 2.1 국외 고전압 DC 분배 시스템 개발동향

현재 및 미래형 함정용 무기체계와 센서류의 전력 요구사항은 고에너지와 고전압 전력시스템으로 빠르게 발전하고 있다. 이는 미래 함정에 탑재 예상되는 고출력 부하(레이진, AMDR 레이더, 레이저와 광학 탐지기, EW 장비 등)를 수용할 수 있어야 한다. Fig. 2는 미 해군의 미래형 DC 전원 분배 시스템이다<sup>[5,6]</sup>.

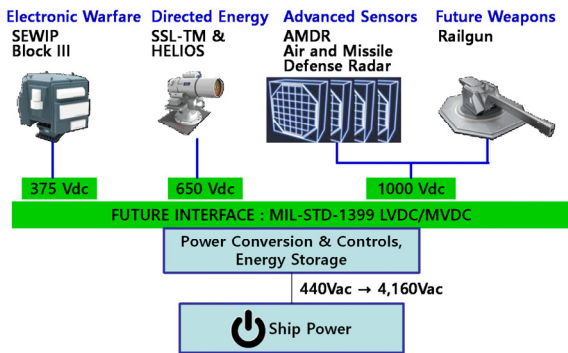


Fig. 2. Uses current and future naval interfaces(USA)

미 해군의 구축함에서는 미래형 고전압 DC 분배시스템인 LVDC(Low Voltage Direct Current, 1.5 kV 이하)/MVDC(Medium Voltage Direct Current, 1.5 kV ~ 100 kV)를 개발하여 구축함에 적용하고 있다<sup>[5,6]</sup>. Zumwalt급(DDG-1000) 초기 개발 시에는 교류 3상 440 Vac를 DC 300 V로 변환하여 안테나 어레이에 공급했지

만, 향후 LVDC/MVDC 분배시스템을 통해서 AN/SPY-3 안테나 어레이에 전원을 공급할 계획이다<sup>[7]</sup>.

미 해군의 알레이 버크(Areigh Burke) 구축함(DDG 51) Flight-III의 AMDR-S 레이더(AN/SPY-6)에서는 교류 4160 Vac를 LVDC인 1000 V로 변환하여 안테나 어레이에 전원을 공급한다<sup>[8,9]</sup>. 이와 같이 미 해군의 미래형 함정용 레이더의 DC 전원 분배 시스템은 기존 300 V에서 1000 V로 고전압으로 발전하고 있다.

### 2.2 상용 DC-DC 컨버터 기술 및 시장 조사

Table 1은 최근 상용화된 DC-DC 컨버터들에 대한 시장조사이다. 일반 표준 Regulated DC-DC 컨버터 군<sup>[10,11]</sup>, 일반 DC BUS 컨버터 군<sup>[10,12]</sup>, 고밀도 DC BUS 컨버터 군으로 분류된다<sup>[13]</sup>.

Fig. 3은 입력전압 대비 단위면적당 출력 전력밀도를 분석하였다. ①-1 ~ ①-3들의 일반 표준 Regulated DC-DC 컨버터 입력전압은 저전압(180 ~ 425 V)이고, 효율은 89 ~ 93 %이고, 출력전력은 500 ~ 600W로 비교적 낮다. 또한 단위면적당 전력밀도가 20 W/cm<sup>3</sup> 이하로 분산형 DC-DC 전원모듈을 구현하려면 많은 DC-DC 컨버터들이 필요하게 된다.

②-1의 일반 400 V DC BUS 컨버터는 저전압이며, 출력 전력 1.75 kW(효율 97.2 %), 단위면적당 전력밀도 47.4 W/cm<sup>3</sup>이다. ②-2의 일반 800 V DC BUS 컨버터는 고전압이며, 출력 전력 1.75 kW(효율 97.7 %), 단위면적당 전력밀도 47.4 W/cm<sup>3</sup>이다. ②-3의 일반 900 V DC BUS 컨버터는 고전압이며, 출력 전력 3.0 kW(효율 96 %)이다. 단위면적당 전력밀도는 30.7 W/cm<sup>3</sup>로 ②-1과 ②-2보다 큰 면적을 차지한다.

③-1의 고밀도 400 V DC BUS 컨버터는 저전압이며, 출력 전력 3.25 kW(효율 98 %), 단위면적당 전력밀도 202 W/cm<sup>3</sup>이다. ③-2의 일반 800 V DC BUS 컨버터는 고전압이며, 출력 전력 4.0 kW(효율 98 %), 단위면적당 전력밀도 249 W/cm<sup>3</sup>이다. ③-3의 일반 1200 V DC BUS 컨버터는 고전압이며, 출력 전력 4.0 kW(효율 98 %)이며, 단위면적당 전력밀도 249 W/cm<sup>3</sup>이다. 다른 ①과 ②들의 컨버터 대비 1/16배 ~ 1/5배 소형화 된다.

DC BUS 컨버터는 전기차의 고전압 배터리 계통에 사용될 예정이다. 기존 48 V(배터리) → 12 V 전원 변환하여 사용하였지만, 고전압 DC BUS 컨버터를 사용하여 800 V(배터리) → 48 V → 12 V 전원 변환하게 되어 전력소모가 낮고, 전력 밀도가 높으며, 비용이 저렴한 고전압, 고효율, 고전력 DC BUS 컨버터이다<sup>[13]</sup>.

Table 1. Recent reported DC-DC converters

항목 제품 구분	순번	전압 분류	제조사	모델명	입력전압[V]	출력전압[V] (전류)	출력 (효율)	크기 (무게)
	①-2	300 V	SynQor <sup>[10]</sup>	MCOTS-C-270-60-FE	155 ~ 425 V	48 V (12.5 A)	600 W (91 %)	119×63.1×13 mm (289 g)
	①-3	300 V	Vicor <sup>[11]</sup>	DCM3714VD2H53E0T01	200 ~ 420 V	48 V (10.5 A)	500 W (93.6 %)	95×36×9.4 mm (116 g)
일반 DC BUS Converter	②-1	300 V (400 V)	Vicor <sup>[12]</sup>	BCM4414VD1E5135T02 (K=1/8)	260 ~ 410 V	32.5 ~ 51.25 V (35 A)	1.75 kW (97.2 %)	110×35.5×9.4 mm (145 g)
	②-2	800 V	Vicor <sup>[12]</sup>	BCM4414VH0E5035T02 (K=1/16)	500 ~ 800 V	31.3 ~ 50.0 V (35 A)	1.75 kW (97.7 %)	110×35.5×9.4 mm (145 g)
	②-3	800 V (900 V)	SynQor <sup>[10]</sup>	MCOTS-B-900-48-FT (K≈1/16)	800 ~ 1000 V	≈ 50 V (60 A)	3.0 kW (96.0 %)	119×63×13 mm (289 g)
High-Density DC BUS Converter	③-1	300 V (400 V)	Vicor <sup>[13]</sup>	400 V BCM6135 (K=1/8)	260 ~ 410 V	32.5 ~ 51.25 V (65 A)	3.25 kW (98.0 %)	61.3×35.3×7.4 mm (98 g)
	③-2	800 V	Vicor <sup>[13]</sup>	800 V BCM6135 (K=1/16)	520 ~ 920 V	32.5 ~ 57.5 V (80 A)	4.0 kW (98.0 %)	61.3×35.3×7.4 mm (98 g)
	③-3	1000 V (1200 V)	Vicor <sup>[13]</sup>	1200 V BCM6135 (K=1/24)	780 ~ 1200 V	32.5 ~ 50.0 V (80 A)	4.0 kW (98.0 %)	61.3×35.3×7.4 mm (98 g)

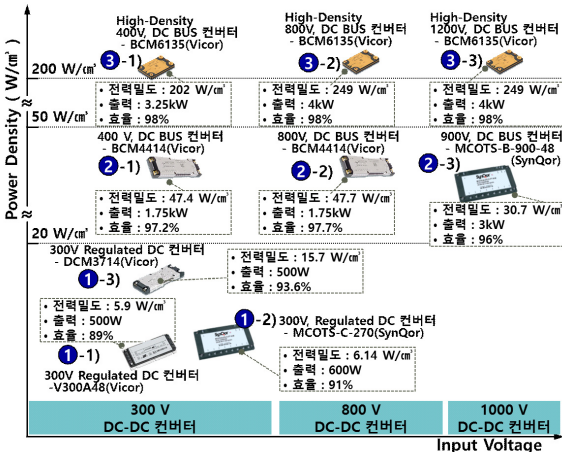


Fig. 3. Development trends of DC BUS converters and regulated DC-DC converters

2.3 제안하는 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈

본 논문의 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈은 미래 기술 추세인 고전력 DC 시스템을 구축할 수 있도록

입력 전압을 800 V로 선정하였다. 그리고 DC-DC 컨버터는 상용품으로 생산되고 있는 고전압·고효율·고전력의 일반 800 V DC BUS 컨버터(②-2)를 적용하였다.

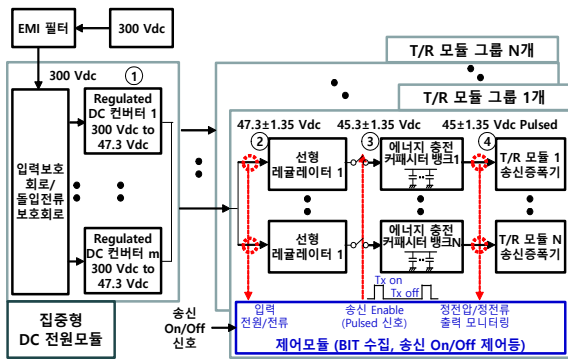
고밀도(High Density) DC BUS 컨버터들은 향후 상용품으로 생산될 예정이어서 본 논문에서는 일반 800 V DC BUS 컨버터를 적용하였다.

기존 능동위상배열 안테나 배열로 입력되는 전압은 일반적으로 DC 300 V이며, Regulated DC-DC 컨버터에 의해 T/R 모듈이 요구하는 전압 레벨(약 10 ~ 28 V, 최근 45 V)로 변환되지만, 본 논문에서는 DC 800 V 고전압을 T/R 모듈 그룹으로 공급하고, 고전압·고효율의 DC BUS 컨버터(Fixed ratio, K = 1/16)에 의해 T/R 모듈에 필요한 45 V를 공급한다.

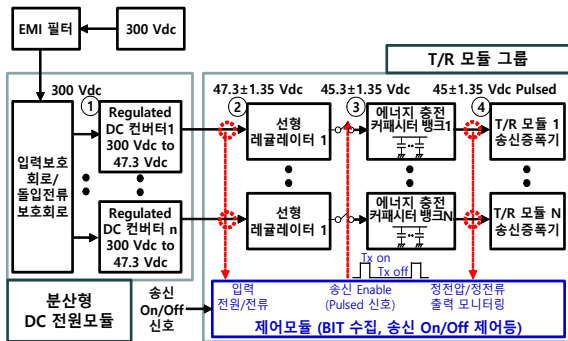
Fig. 4(a)의 기존 Regulated DC-DC 컨버터를 이용한 집중형 DC-DC 전원모듈은 한 개의 전원모듈이 다수 개의 T/R 모듈 그룹들에 전원을 공급한다. 통상적으로 안테나 어레이 가장자리나 Backplane면에 위치하게 되며 인터페이스가 복잡하다. 반면 T/R 모듈 그룹단위의 체적과 무게는 감소된다. 그리고 Fig. 4(b)의 기존

Regulated DC-DC 컨버터를 이용한 분산형 구조의 DC-DC 전원모듈은 T/R 모듈 그룹 단위마다 일대일로 인터페이스가 형성되며, 집중형 보다 외부 인터페이스가 간소화 되지만, DC-DC 전원모듈이 차지하는 체적과 무게는 다소 증가된다.

일반적으로 출력전력이 500 W 수준인 기존의 Regulated DC-DC 컨버터로 구성되는 분산형 300 V 전원모듈들은 T/R 모듈 그룹에 큰 전력(1.6 kW 이상)을 공급하기 위해서 Regulated DC-DC 컨버터들이 3 ~ 4개가 필요하게 된다. 집중형 전원모듈은 T/R 모듈 그룹을 구성하는 단위에 따라 Regulated DC-DC 컨버터들이 증가된다. 또한 선형 레귤레이터(②)는 2 V 정도의 전원 강하를 야기한다.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Centralized and (b) distributed DC power module with low-voltage 300 V, low-efficiency regulated DC-DC converters and separate T/R modules group

함정용 AESA 레이더의 전원 분배 시스템은 T/R모듈까지 고효율을 유지하며, 손실 저감의 구조로 설계

되어야 한다. 본 논문에서 제안하는 Fig. 5의 구조는 분산형으로서 효율 97.7 %의 800 V DC BUS 컨버터로 구성되는 고전압-고효율 DC-DC 전원모듈이다.

제안된 구조는 기존과 다르게 입력전압이 DC 300 V에서 800 V로 높게 입력하여 고전압, 고전력 시스템으로 구현된다. 800V DC BUS 컨버터(고정비율 : 1/16, Step-down)의 출력 전압은 46 ~ 50 V로 변환된다. 평균 전류가 2 A로 제한되도록 Buck 레귤레이터를 통해 T/R 모듈 HPA에 필요한 전원 45.3 V로 충전된다.

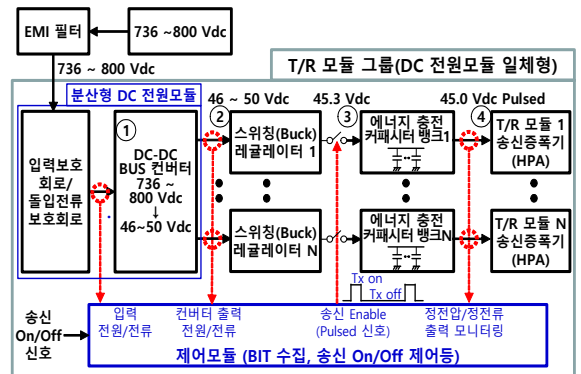


Fig. 5. Proposed all-in-one assembly with N's T/R modules and distributed DC power module : high-voltage 800 V and high-efficiency DC BUS converter

장거리 탐지를 위해 긴 송신 펄스 폭 구현을 위해 고용량의 에너지 충전 커패시터뱅크가 필요하다. 본 논문에서는 긴 송신 펄스 구간동안 펄스 전원 강하가 0.5 V 이내가 되도록 설계하였다. T/R 모듈당 커패시턴스가 2400 uF이 필요하다. 고용량 상용 1200 uF 커패시터의 경우, 크기가 직경 18 mm, 길이 40 mm, ESR(Equivalent Series Resistance)이 0.026 Ω이다. 2400 uF 구현을 위해, 2개가 필요하다. 체적은 넓이 36 mm, 높이 18 mm, 길이 40 mm로 103.7 cm<sup>3</sup>이고, 등가 ESR 0.013 Ω이다. 또한 고용량 커패시터는 저용량 대비 고가이다. 본 논문에서는 소형화/경량화를 구현하기 위해 넓이 11 mm, 높이 10 mm, 길이 10.3 mm, ESR 0.12 Ω의 상용 커패시터 330 uF을 8개(총 2640 uF)를 병렬로 배치하여 체적 9.1 cm<sup>3</sup>와 등가 ESR 0.0015 Ω이 되도록 설계하였다. 대용량 커패시터가 차지하는 공간 대비 1/11배 줄어 들고, 등가 ESR 또한 0.11배로 줄어드는 효과를 얻을 수 있다.

Table 2. Comparison of the proposed architecture

항목	기존(300 V 입력) DC-DC 전원모듈	제안(800 V 입력) DC-DC 전원모듈
컨버터	Isolated Regulated DC-DC 컨버터	Isolated DC BUS 컨버터 (고정비율, 1/16)
부하 조건	1.5 kW	1.5 kW
	(T/R 그룹 → T/R 모듈 16 채널)	
모듈 효율	89.3 %	93.4 % (고효율)
입력전압 [DC]	300 V (200 ~ 500 V)	800 V (736 ~ 800 V)
출력전압	48 V	46 ~ 50 V
DC 컨버터 수량	4개 (500 W × 4개)	1개 (1.75 kW × 1개)
DC 컨버터 크기 (체적)	95.14×35.4×9.4 mm × 4개 (509,360 mm <sup>3</sup> , 1배)	110.55×35.4×9.4 mm × 1개 (36,932 mm <sup>3</sup> , 1/10배)
모듈 무게	464 g (116 g × 4개)	145 g (145 g × 1개)
안테나 1면 무게	154.5 kg	48.3 kg (106 kg 감량)
	(1면: 5,328개 기준 <sup>18,9)</sup> → T/R 그룹 × 333개)	
케이블 굵기	1.0배 (전류 1배)	1/5배 (전류 3/8배 감소)
DC모듈 발열량	114 W (T/R 그룹)	43 W (T/R 그룹)
	38 kW (안테나 1면)	14.3 kW (발열량 감소)
소모 전력	534.6 kW	519.9 kW
	안테나 1면(5,328 채널)	
	2,424.7 kW	2,318.8 kW
	안테나 4면 + (AC-DC + 변압기 + 케이블) 손실	
소형화/경량화	불리	유리

Table 2는 기존 방식과 제안 방식의 DC-DC 전원모듈을 비교/분석하였다. T/R 모듈 단위그룹의 소모전력은 1.5 kW를 기준으로 비교하였다. 기존 300 V에서

800 V 적용 시, 전류가 3/8배로 감소하여, 케이블 굵기가 1/5배 감소한다. 그리고 안테나에서 합정 전원 경로의 AC-DC 변환기와 케이블 손실은 7.3 %이고, 입력배전반 및 케이블 손실은 3.1 %이다. 안테나 4면 기준 체계 소모전력은 300 V와 800 V 대비 106 kW를 줄일 수 있다. 또한, 기존 Regulated DC-DC 컨버터 방식에서 고전압·고효율 DC BUS 컨버터 방식으로 변경 시에 컨버터가 4개에서 1개로 구현가능하다. 컨버터 무게가 줄고, 추가적으로 컨버터 체적(크기)이 1/10배로 줄어들어 안테나를 소형화, 경량화 할 수 있다.

Fig. 5에서 송신 Enable 펄스신호는 송신 신호와 동기화 되어 On/Off하게 된다. 커패시터 뱅크는 낮은 손실을 위해 8개로 병렬 연결된다. HPA에서 필요한 전원은 45 V이지만, 커패시터 저장손실과 스위치용 FET 저항손실에 따른 0.3 V 전압 Drop을 고려하여, Buck 레귤레이터 출력 전압을 45.3 V로 설계하였다.

AESA 레이더 배열 안테나용 DC-DC 전원모듈의 요구사항은 출력전압 강하 및 리플, 노이즈 그리고 긴 송신 펄스 구간 동안 부하변화에 따른 전압/전류 강하를 최소화하기 위해 고용량 에너지 충전 커패시터 뱅크들(Energy charging capacitor banks)을 포함한다.

고용량의 에너지 충전 커패시터 경우 초기 전원인가 시에는 충전 전하가 없는 상태이므로 전기적으로 단락상태와 같다. 따라서 순간적으로 큰 전류가 흐르게 되며, 이에 대한 돌입전류 방지를 위해 Fig. 5의 ②Buck 레귤레이터가 평균 2 A로 제한되도록 설계하였다. 그리고 고용량 충전 커패시터 뱅크 앞단 Buck 레귤레이터에 첨두전류를 제한함으로써 돌입전류로부터 보호될 수 있도록 하였다.

### 3. 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈 설계 및 시물레이션

#### 3.1 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈 설계

Fig. 6은 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈 블록도이다. 800 V DC BUS 컨버터와, 16채널 Buck 레귤레이터, 16채널 커패시터 뱅크단, 돌입전류 제한회로, 제어기와 +45 V전원(16채널), 기타 전원들로 구성된다. 제어기는 Buck 레귤레이터의 출력 전압과 전류를 모니터링하고, PWM(Pulse Width Modulation) 비율을 계산하여 Buck 레귤레이터 On/Off 제어를 한다. 또한 SW(스위치)는 송신 펄스신호와 동기화되어 동작된다.

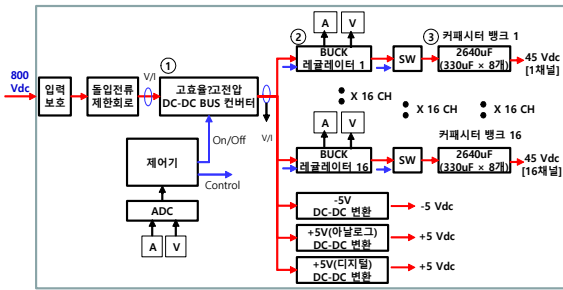


Fig. 6. The block diagram of the proposed high-voltage and high-efficiency DC power module

Fig. 7은 설계된 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈의 형상이다. 분산형 구조로, T/R 모듈 그룹(16채널)과 일체형으로 결합할 수 있는 구조이다. 또한 800 V DC BUS 컨버터, Buck 레귤레이터와 커패시터 뱅크단들을 최적으로 공간 배치하여 소형화/경량화의 분산형 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈로 설계하였다.

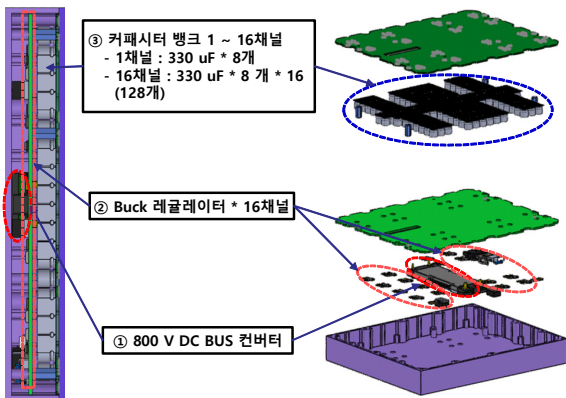


Fig. 7. The design configuration of the proposed high-voltage and high-efficiency DC power module

### 3.2 Buck 레귤레이터 설계 및 시뮬레이션

Fig. 8과 9는 Buck 레귤레이터의 동작원리이다. 우선 Fig. 8에서 R1은 입력 전류 검출용으로서 저항으로부터 전류정보를 제어회로에 전달한다. FET1(Q1)이 ON 되면, L1을 통해 출력단 충전 커패시터 뱅크에 전원이 공급된다. Fig. 8에서 FET1(Q1)이 OFF되면 FET2(Q2)가 ON되어서 L1에 충전된 에너지를 출력단 충전 커패시터 뱅크로 흐를 수 있도록 한다. FET1과 FET2는 제어회로에서 PWM(Pulse Width Modulation)신호에

의해 제어된다<sup>14)</sup>. ON/OFF 펄스 폭은 출력전압과 입력 전류를 제어하여 항상 일정한 출력전압을 유지할 수 있도록 제어신호를 공급한다. 그리고 Fig. 10은 Buck 레귤레이터의 동작 순서도를 나타낸다.

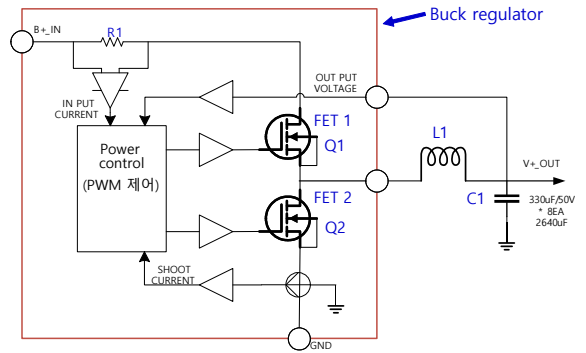


Fig. 8. Block diagram of buck regulator

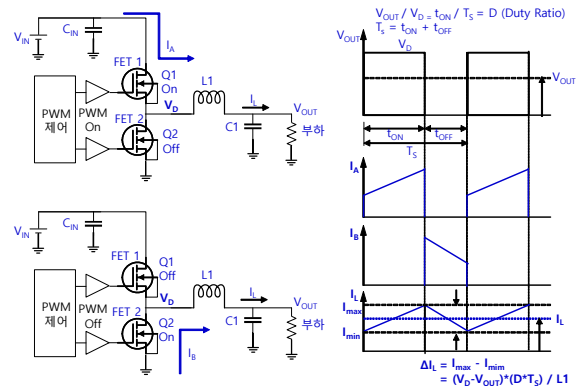


Fig. 9. Buck regulator topology and operating waveform

Fig. 11은 Buck 레귤레이터를 위한 시뮬레이션 회로 도이며, 구성은 다음과 같다.

- ㉠ Buck 레귤레이터 회로 : 일반적인 Synchronous Step-down 레귤레이터(Fig. 8과 Fig. 9참조)이며, PWM On/Off 제어신호를 받아서 L1(인덕터, ①)에 흐르는 출력 전압/전류를 계산하여 일정한 전압을 유지할 수 있도록 한다.
- ㉡ 송신 Enable on/off 스위칭 및 에너지 충전 커패시터 뱅크 회로 : 긴 송신 펄스 구간 동안 부하변화에 따른 전압/전류 강하를 최소화하기 위해 고용량 에너지 충전 커패

시터들을 포함(330 uF × 8개 = 2.64 mF)

- © Pulsed HPA 등가회로 :  
GaN형 HPA 반도체소자의 부하 저항 R6을 3.82 Ω 로 설정(HPA 전류 : 최대 11.78 A)

에너지 충전 커패시터 뱅크와 Pulsed HPA 등가 부하 조건으로 동작 특성을 시뮬레이션 하였다. 주요 파라미터 선정은 LT8620 Data sheet를 참조하였다.

Table 3. Simulation parameters

파라미터	값
DC 입력전압	46 V ~ 50 V
Buck regulator	LT8620(Linear Technology사)
스위칭 주파수	680 kHz
R1	68 kΩ
R2	1 MΩ
R3	22 kΩ
L1	100 uH
C4(충전 커패시터)	2.64 mF (330 uF × 8개)
R6(HPA 부하저항)	3.82 Ω

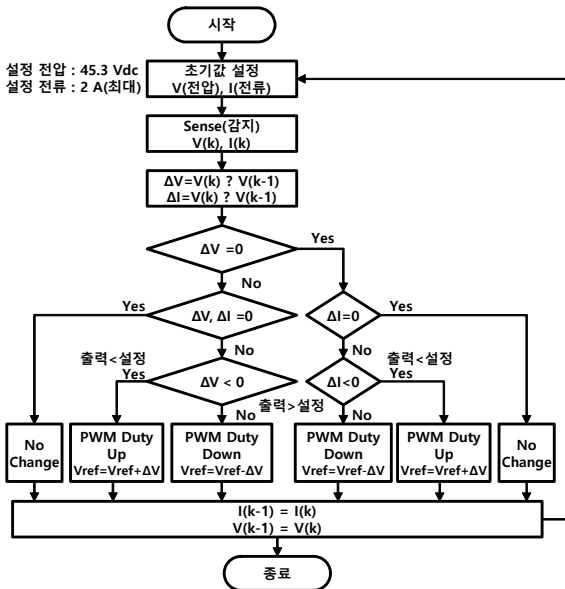


Fig. 10. Flow chart of buck(step-down) regulator

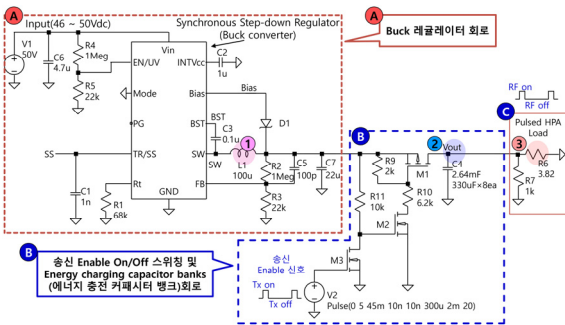


Fig. 11. Simulation circuit of buck regulator

Buck 레귤레이터 시뮬레이션을 위한 주요 파라미터 값은 Table 3과 같다. GaN형 200 W 고효율증폭기의 드레인 소모전력은 CW 조건에서 11.78 A이다. 펄스 모드로 동작될 때, 듀티(Duty) 15 %이면, 평균 전류는 1.76 A(11.78 A × 0.15)이다. 이에 입력범위 3.4 ~ 65 V, 전류 2 A, Synchronous Step-down Regulator인 Linear Technology사의 상용 칩 LT8620을 이용하였다. 그리고 LTSpice 툴로 전체 Buck 레귤레이터, 스위칭 회로 및

Buck 레귤레이터 시뮬레이션 결과는 Fig. 12와 같다. Fig. 12의 시뮬레이션 결과는 Fig. 11 시뮬레이션 회로도에서 L1 인덕터에 흐르는 충전전류(①), 에너지 충전 커패시터 뱅크단 출력전압(②), HPA에 구동되는 출력전류(③) 해석 결과이다. L1에 흐르는 충전전류(①)는 에너지 충전 커패시터 뱅크단의 전압(②)이 45.3 V로 도달되면 충전을 멈추게 되어 0 A로 근접하게 된다.

Fig. 12(a)에서 HPA 부하저항에 흐르는 전류(③)는 11.78 A의 특성 결과로 보였고, L1에 흐르는 전류(①)는 송신 Enable off 구간에서 에너지 충전 커패시터 뱅크단 전압(②)이 다음 송신 시작 전에 45.3 V로 충전되고, 전류는 더 이상 충전이 필요 없는 특성을 보였다.

레이더 실제 운용에서 송신/수신을 하는데 충분한 고속 충전 회로임을 해석결과로 확인하였다. 송신 펄스 On 시간을 300 us, 펄스 주기는 2 ms이며, 듀티 15 %로 설정하였다. Fig. 12 (a)와 (b)에서 1.7 ms 수신구간(송신 Enable off 구간)에서는 에너지 충전 커패시터 뱅크의 전압이 다음 송신 시작 전에 HPA에서 필요로 하는 45.3 V로 충전되고, 전류 또한 45.3 V 충전 이후로는 전류가 거의 흐르지 않는 것을 확인하였다. Buck 레귤레이터의 정전압/정전류 기능이 정상적



으로 동작하는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

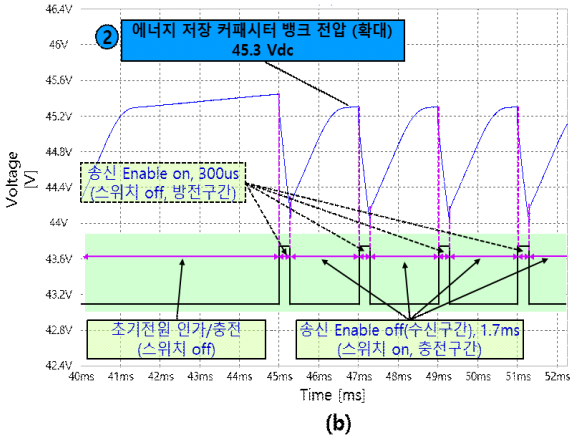
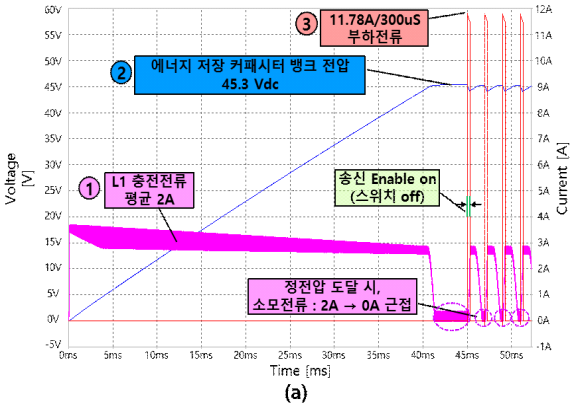


Fig. 12. Simulation waveform using LTSpice (a) charging/discharging voltage/current and (b) magnified voltage

#### 4. 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈 시험 및 결과

Fig. 13은 제작된 Buck 레귤레이터(A), 송신 On/Off 스위칭 및 Energy Charging Capacitor Bank단(B), Pulsed HPA 부하(C)이다. HPA 펄스 부하는 마진을 고려하여 Peak 12 A가 흐를 수 있도록 부하 저항 R6을 3.75 Ω으로 설정하였다.

Fig. 14는 부하저항에서 걸리는 충전전 전압 및 전류에 대한 실험결과이다. 송신 Enable On 구간인 300 us 동안 방전 전압이 45 V ↔ 43 V의 충전전 특성을

보였고, 전류는 12A → 11.7 A의 전류강하 특성을 보였다. 시험 보드간 사이의 연결선 때문에 Rising 특성이 뭉개어짐 현상을 보였다. 송신 Enable off(스위치 on) 구간에서 충전 전압이 정상적으로 45 V로 다음 송신시점 이전에 충전됨을 확인하였다.

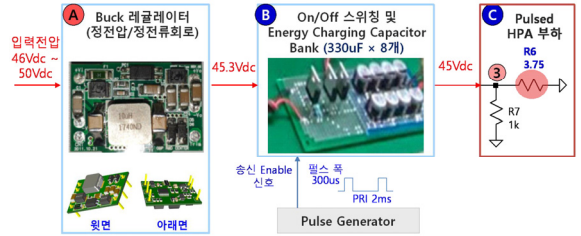


Fig. 13. The fabricated buck regulator and capacitor banks with tx. on/off switching elements

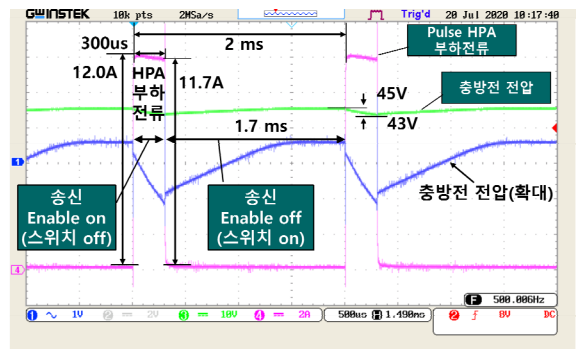


Fig. 14. Test results of buck regulator

Fig. 15는 본 논문에서 제안하는 고효율·고전압 DC-DC 전원모듈과 펄스형 RF GaN HPA의 연동시험을 위한 연결도이고, 구성은 다음과 같다.

- A DC 800V 전원공급기 : 상용 전원공급기로 736 ~ 800 V 입력전원 공급
- B 고효율·고전압 DC-DC 전원모듈 :
  - ① Bus Converter(Vicor사 BCM4414) - 입력 전압을 16:1로 전압 step-down
  - ② Buck 레귤레이터
  - ③ 송신 Enable on/off 스위칭 및 충전 커패시터 뱅크(Energy charging capacitor banks) 회로
- C Pulsed 200W GaN 증폭기
- D RF/전원 Timing 제어기
- E RF 신호발생기, F Peak Power 측정기

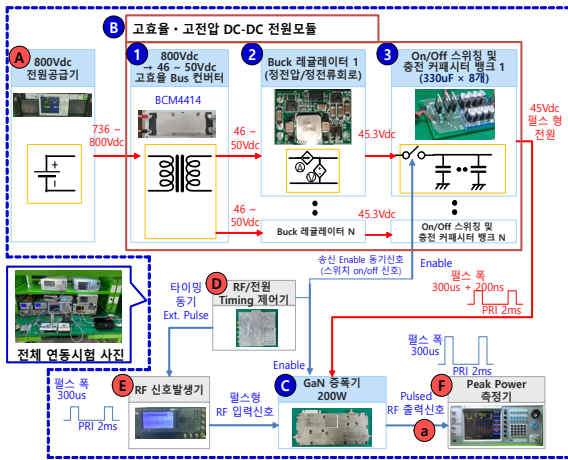


Fig. 15. Test configuration diagram of high efficiency and high voltage DC-DC power module

Fig. 15에서 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈(B)의 DC BUS 컨버터(1) 출력은 16:1 비율로 Step-down되어 입력전압 736 ~ 800 V가 46 ~ 50 V로 변환되고 93.4 % 이상의 고효율 성능을 갖는다. 또한 Buck 레귤레이터(2)에서는 Fig. 12의 결과와 같이 최대 평균전류 2 A 제한된 상태로 고속 충전/방전하는 특성을 보였다.

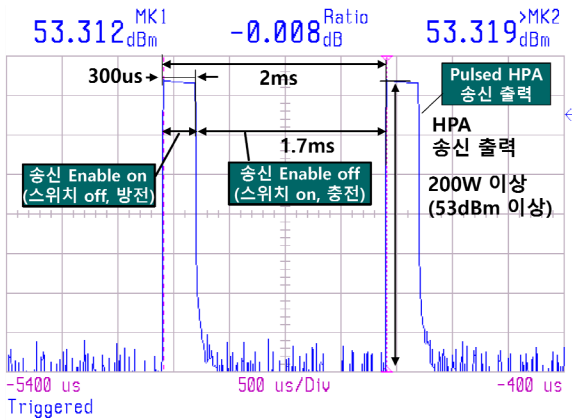


Fig. 16. RF output waveform of GaN HPA linked to high efficiency and high voltage DC-DC power module

Fig. 16은 실제 RF GaN형 Pulsed HPA와 연동하여 시험한 RF 출력전력을 측정된 결과이다. RF 출력 특성이 송신 펄스 폭 300 us 구간에서 정상적인 200 W 이상의 Pulsed RF 출력특성을 만족하였고, RF 펄스

강하는 0.6 dB로 나타났다. Fig. 14의 전압출력 강하 특성에서 0.4 dB( $20 \times \log(43 \text{ V} / 45 \text{ V})$ )로 예측되었지만, RF 출력 펄스 강하가 0.2dB 증가된 특성을 보였다. 이에 대한 원인은 고효율·고전압 DC-DC 전원모듈의 최종단 에너지 충전 커패시터 뱅크(3) 출력단의 전원이 GaN 증폭기(C)에 연결될 때 전원 케이블이 길이가 30 cm 이상이어서 추가적인 전압 강하가 나타났다. 전원모듈과 T/R 모듈 그룹은 일체형으로 설계되어 HPA까지 거리는 수 cm 이하로 되기 때문에, RF 전력 강하 특성은 0.4 dB에 근접할 것으로 예측된다.

## 5. 결론

국의 고전압 DC 분배 시스템 개발 동향에서 미국의 미래 함정용 무기체계와 센서류들의 전원 계통이 고전압 DC 분배 인터페이스인 LVDC/MVDC로 고에너지, 고전압 전력시스템으로 빠르게 발전하고 있다. 특히, 미 해군에서는 LVDC/MVDC 인터페이스를 구축하여 AESA 레이더 안테나 배열에 높은 DC 전압을 공급하고 있다. 미 해군의 함정용 레이더 DC 전원 분배시스템은 기존 300 V에서 1000 V로 고전압, 고전력화로 발전하고 있다. 그리고 DC-DC 컨버터들의 시장 조사에서는 고전압, 고전력에 적합한 고밀도, 고효율의 800 V와 1200 V DC BUS 컨버터들이 상용품으로 생산되고 있음을 확인하였다.

함정용 AESA 레이더의 운용에 직접적으로 많은 영향을 주는 것이 전원이며, 안정적이고 신뢰성 있는 전원공급이 필요하다. 본 논문에서 제안된 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈은 첫째, 고전력을 위해 고전압 800 V 전원을 적용하였고, 둘째 고효율(97.7 %)의 800 V DC BUS 컨버터를 적용하여 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈을 설계하였다. 주요 구성품의 시뮬레이션과 실험을 통해 고전압·고효율 전원모듈의 성능을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈의 주요 구성품인 800 V DC BUS 컨버터, BUCK 레귤레이터, 송신 On/Off 스위치와 장거리 탐지를 위해 긴 송신 펄스 폭 구현을 위해 고용량 에너지 충전 커패시터 뱅크단 회로들을 설계, 제작, 시험하였다. 고전압·고효율 DC-DC 전원모듈의 전압/전류 펄스 강하 성능과 고속 충전/방전 특성을 확인하였고, GaN형 Pulsed HPA와 연동 시험하여 만족할 수준의 RF 출력

특성 결과를 확인하였다.

본 논문에서 제안된 고전압·고효율 DC-DC 전원 분배기술을 적용 시, T/R 모듈 그룹단위(T/R모듈 8개 ~ 16개로 구성)와 DC-DC 전원모듈을 일체형으로 구현할 수 있다. 또한 DC 전원 분배 시스템은 분산형 시스템으로 구현할 수 있어 체계 DC 전원 인터페이스를 간소화 할 수 있다. 그리고 DC 800 V 고전압, 고효율, 고전력을 안테나 시스템에 제공함으로써, 능동 위상배열 안테나의 크기와 무게를 획기적으로 줄일 수 있고, 고효율 시스템으로 안테나 소모전력을 106 kW 줄일 수 있는 것으로 분석되었다. 공간(Space), 무게(Weight), 전력(Power)과 냉각(Cooling)이 제한되는 함정용 AESA 레이더용 분산형 DC 전원분배 시스템에 적용 시 소형화, 경량화가 구현될 것으로 사료된다. 또한 SWaP-C에 대한 마진을 확보할 수 있다.

이러한 DC 고전압의 사용은 이미 세계적인 추세로서, 미국의 최신 함정용 능동위상배열 레이더인 AN/SPY-6 레이더는 LVDC 인터페이스의 1000 V 전압을 적용하고 있고, 또한 민수시장에서도 전기 자동차에 고전압·고효율 DC BUS 컨버터 기술(800 V 또는 1200 V to 48 V 변환)을 적용하고 있어 고전압·고효율 DC-DC 전원 분배 기술은 군용, 민수분야 등에서 새롭게 떠오르는 미래형 기술로 부각되고 있다.

## References

- [1] J. Frank, and K. O'Haver., "Phased Array Antenna Development at the Applied Physics Laboratory," Johns Hopkins APL Tech. Digest, Vol. 14, No. 4, pp. 339-347, 1993.
- [2] Ashok K. Agrawal, Bruce A. Kopp, Mark H. Luesse, and Kenneth W. O'Haver, "Active Phased Array Antenna Development for Modern Shipboard Radar Systems," Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 22, No. 4, pp. 600-613, 2001.
- [3] E. Holzman, and A. Agrawal, "Active Phased Array Design for High Clutter Improvement Factor," IEEE Int. Symp. Phased Array Technol., Boston, MA, pp. 44-47, 1996.
- [4] Agrawal, A., and Holzman, E., "Beamformer Architectures for Active Phased Array Radar Antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 47, No. 3, pp. 432-442, 1999.
- [5] N. Doerry, "Next Generation Integrated Power System: NGIPS Technology Development Roadmap," Report, Naval Sea Systems Command, Washington, DC, pp. 13-38, 2007.
- [6] Stephen P. Markle, "Naval Power & Energy Systems: Way Forward," Surface Navy Association : 32nd Annual National Symposium, Electric Ships Office(PMS320), U.S. Navy, pp. 1-18, 2020.
- [7] William J. Fontana and Karl H. Krueger, "AN/SPY-3: The Navy's Next-Generation Force Protection Radar System," IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, pp. 594-604, 2015.
- [8] U.S. Navy, "DDG 51 Flight III Ships Air and Missile Defense Radar Engineering Change Proposal," Report to Congress on the DDG 51 Flight III Design Status, The Department of the Navy(DoN), Washington, pp. 5-30, 2015.
- [9] T. Dickenson, "Air & Missile Defense Radar (AMDR) AN-SPY-6(V)," Raytheon Company(USA), pp. 2-8, 2015.
- [10] [https://www.synqor.com/document-viewer/document/MCOTS-DC\\_Brochure.pdf](https://www.synqor.com/document-viewer/document/MCOTS-DC_Brochure.pdf)
- [11] <http://www.vicorpower.com/dc-dc/isolated-regulated>
- [12] <http://www.vicorpower.com/dc-dc/isolated-fixed-ratio/bus-converter-module>
- [13] <http://www.vicorpower.com/industries-and-innovations/automotive>
- [14] N. MOHAN, M. UNDELAND, and P. ROBBINS, "Power Electronics: Converter, Applications, and Design Third Edition," John Wiley & Sons, Inc., pp. 161-172, 2003.