

# 다기능 레이더 방위각 구동 장치의 정지 모드를 위한 제동저항 설계

## A Design of Dynamic Braking Resistor for Stationary Mode of Azimuth Driving Equipment for Multi-Function Radar

한 별\*, 오 우 석\*, 신 명 환\*, 박 영 수\*\*★

Byeol Han\*, Woo-Seok Oh\*, Myeong-Hwan Shin\*, Yeongsu Bak\*\*★

### Abstract

In this paper, a design of dynamic braking resistor for stationary mode of azimuth driving equipment (ADE) for multi-function radar (MFR) is presented. The ADE carries out missions which is the rotation mode for all directions and the stationary mode for tracing a subject with standstill. The ADE has to transfer the operation mode in demand time from rotation mode to stationary mode for precise target tracing. During the transition with deceleration, it may cause the fault of input power device due to back-electromotive force (back-EMF) of PMSM with generator mode. To protect the power device, a design of dynamic braking resistor is essential for consuming back-EMF. This paper presents the development of dynamic braking resistor for consuming back-EMF of ADE with deceleration mode. The validity and effect of the design is verified using simulation results.

### 요 약

본 논문에서는 다기능 레이더(multi-function radar, MFR) 방위각 구동 장치(azimuth driving equipment, ADE)의 정지 모드를 위한 제동저항 설계를 제안한다. ADE는 중거리의 지대공 유도미사일과 유인 전투기 감시정찰 임무를 수행하며, 360도 전방향을 회전하는 회전 모드와 정지된 상태에서 피사체를 추적하는 정지 모드가 있다. 또한, ADE는 정밀 추적을 위해 규격시간 내에 회전 모드에서 정지 모드로 전환해야 한다. 하지만, 감속 시 발전기로 동작하는 영구자석 동기전동기(permanent magnet synchronous motor, PMSM)에 의해 입력 전원이 소손될 우려가 있으며, 이를 보호하기 위해 PMSM의 역기전력을 소모하는 제동저항 설계가 필요하다. 본 논문에서는 방위각 구동 장치를 구성하는 PMSM의 감속에 의해 발생하는 역기전력을 소모하는 제동저항 설계 방안을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 설계 방안 및 효과에 대한 타당성을 입증한다.

*Key words : multi-function radar, azimuth motor, permanent magnet synchronous motor, medium-range surface-to-air missile, dynamic braking resistor*

### 1. 서론

표적 정밀 타격을 위한 무기 체계에서 미사일 기술 및 전투 체계는 날로 고도화되고 있다[1]. 미사일 체계는 지

대지, 지대공, 공대지 미사일 등 여러가지 미사일 체계로 구분되며, 이에 따라 이를 방어하기 위한 체계 또한 연구 중에 있다[2, 3]. 그 중에서 지대공 미사일(surface-to-air missile, SAM)에 대한 연구 및 개발이 활발히 이루

\* Power Control Team, Hanwhasystems

\*\* Dept. of Electrical Energy Engineering, Keimyung University

★ Corresponding author

E-mail : ysbak@kmu.ac.kr, Tel : +82-53-580-5291

※ Acknowledgment

Manuscript received Sep. 5, 2024; revised Sep. 19, 2024; accepted Sep. 24, 2024.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

어지고 있으며, SAM은 요격 고도에 따라 장거리 미사일 항공기 요격체계, 중거리 미사일 항공기 요격체계 천궁-II 등으로 구분한다. 천궁-II는 국내 개발 및 배치가 완료되었고, 이를 바탕으로 중동 국가에 수출까지 이루어 내며 성능을 입증하고 있다[4, 5]. 또한, 중거리 미사일 항공기 요격체계는 고정포대가 아닌 차량화된 발사대의 형태로 기술적인 기동이 가능하며, 유도 미사일 및 발사대뿐만 아니라 다기능 레이더(multi-function radar, MFR), 발전기, 교전통제소, 운용 인력으로 구성된 이동포대로 구성된다. MFR은 레이더를 이용한 피사체 추적, 전자전, 탐지 피아식별 등의 기능과 임무를 수행한다[6]. 차량용 MFR의 경우, 레이더 전개 후에 레이더를 일정하게 회전하여 전방향으로 표적을 감시하는 회전 모드와 정지된 상태에서 표적을 추적하는 정지 모드를 지원하기 위해 정밀 추적이 가능하도록 방위각 구동 장치(azimuth driving equipment, ADE)를 사용하며, 이를 위한 모터를 적절히 선정해야 한다[7].

영구자석 동기전동기(permanent magnet synchronous motor, PMSM)는 회전자 자속을 발생시키기 위해 영구자석을 사용하여 여자 권선에 의한 손실이 없고, 출력 밀도 및 속응성이 높아 정밀 제어가 요구되는 고성능 전동기 구동분야에 적합하다[8-10]. 이에 따라, ADE에 주로 사용되며, MFR의 ADE는 요구시간 내 회전 모드에서 정지 모드로 전환되어야 하므로 PMSM을 타력이 아닌 감속으로 정지시켜야 한다. 다만, 전동기를 이용한 구동 시스템에서 감속 시에는 역기전력에 의한 역전류로 직류단 커패시터의 전압이 상승하게 되며, 이를 적절하게 소모시키지 않으면 입력 전원이 소손될 우려가 있다.

역기전력에 의한 역전류를 소모시키는 방법은 크게 회생 제동 방식과 발전 제동 방식으로 구분한다[11-13]. 회생 제동 방식은 전동기에서 발생한 전기 에너지를 다시 전원 측으로 되돌리는 방식으로 가장 효율적인 제동 방법이다. 하지만, 이를 구현하기 위해서는 다이오드 정류기 등 단방향 전원 공급장치를 양방향 전력 흐름이 가능한 PWM 컨버터 등의 비교적 고가의 전원 공급장치로 교체가 필요하고, 전력 계통에서 이를 수용할 수 있는 설비를 추가하는 등 여러 단점이 있다. 발전 제동 방식은 변환된 전기 에너지를 전원 측으로 반환하지 않고 제동 저항에서 열로 소비하는 방식이다. 에너지 효율 측면에서는 효율이 좋지 않지만, 저가로 간단하게 구성이 가능하며, 차량용 MFR처럼 격오지에서 단독 운용이 필요한 시스템에는 발전제동 방식이 적합하다.

발전제동 방식으로 역기전력을 소모하기 위해서는 주

로 전력반도체 소자와 제동저항을 직렬로 연결한 회로를 직류단 커패시터와 병렬로 구성하는 방법을 사용한다. 직류단 커패시터의 전압이 일정 전압 이상인 경우, 전력반도체 소자에 펄스폭 변조 신호를 인가하여 역기전력 에너지를 제동저항에서 열로 소모한다[14-16].

본 논문에서는 MFR의 ADE의 정지 모드를 위한 제동저항 설계 방안을 제안한다. ADE의 구동 모터로는 PMSM을 선정하고, 감속 시 필요 토크에 의한 출력 전력을 계산하여 제동저항의 용량과 크기를 선정한다. 이를 바탕으로 MFR 안테나구동용 유니트와 안테나 유니트를 모사한 더미를 구동하여 감속 시 제동저항에 의해 직류단 커패시터의 전압이 일정 전압 이하로 유지되는 것을 확인한다. 제안하는 설계 방안의 타당성은 시뮬레이션 결과를 통해 입증한다.

## II. 차량용 다기능 레이더용 방위각 구동 장치

### 1. 차량용 다기능 레이더(MFR)

그림 1은 중거리 미사일 항공기 요격체계(M-SAM) 구성을 나타낸다[4]. 그림 1(a)는 지휘-통제소, 그림 1(b)는 미사일 발사대, 그림 1(c)는 MFR 레이더를 나타내며, MFR 레이더는 MFR 레이더 전원장치로부터 전원을 공급받는다. MFR은 레이더를 안정적으로 회전시키는 수평 구동 장치와 레이더를 일정 각도로 이동하는 고각 구동 장치, 그리고 레이더를 일정 속도로 회전하는 ADE로 구성한다[3].

그림 2는 차량용 MFR 모델링을 나타낸다. 차량용 MFR은 안테나 유니트, 냉각장치, 수평 구동 장치, 고각 구동 장치, ADE 등으로 구성된다. 본 논문에서는 ADE만을 기술하며, 이외 장치에 대한 세부 내용은 생략한다.

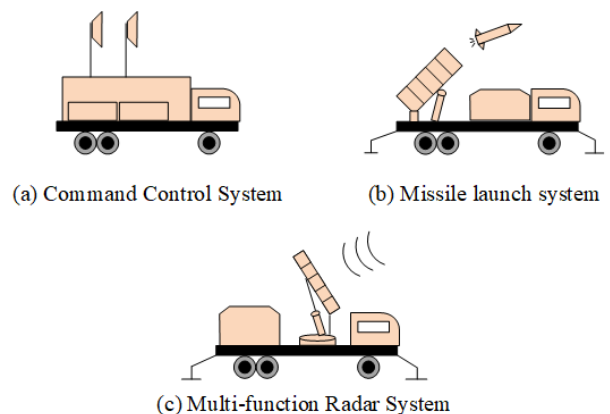


Fig. 1. Configuration of medium-range surface-to-air missile (M-SAM) system.

그림 1. 중거리 미사일 항공기 요격체계 구성



Fig. 2. Modeling of multi-function radar with vehicle[5].  
그림 2. 차량용 다기능 레이더 모델링[5]

2. 방위각 구동 장치(ADE)

가. 구성

그림 3은 ADE의 구성을 나타내며, (a), (b), (c), (d)는 각각 ADE, 방위각 구동 모듈, 방위각 구동 모터, ADE 외부에 탑재되는 사람-기계 인터페이스(Human Machine Interface, HMI)로서 그림 2의 차량용 MFR에 탑재된다. 방위각 구동 모터 제어 명령은 운용자가 HMI를 조작하여 UART 통신 방식으로 방위각 구동 모듈에 전달된다. 방위각 구동 모터의 운전 모드는 고중량 10 ton의 안테나 유닛을 요구 속도 40 rpm으로 회전하는 회전 모드와 정지 위치에서 특정 각도 내로 이동하는 정지 모드로 구분한다.

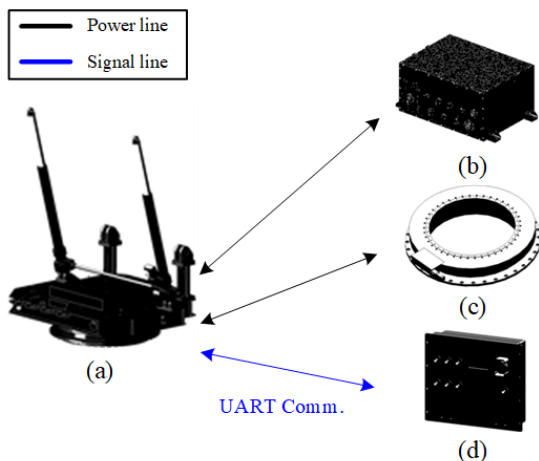


Fig. 3. Configuration of azimuth driving equipment (ADE).  
그림 3. 방위각 구동 장치의 구성

(1) PMSM 필요 토크 산출

PMSM의 필요 토크는 식 (1)로 나타낸다[9].

$$T_M = J\alpha + B\omega_m + T_L \tag{1}$$

여기서,  $T_M$ ,  $J$ ,  $\alpha$ ,  $B$ ,  $\omega_m$ ,  $T_L$ 는 각각 PMSM 출력 토크, 관성 모멘트, 기계 각가속도( $\alpha = d\omega/dt$ ), 점성 마찰 계수, 기계 각속도, 부하 토크를 나타낸다. 관성 모멘트는 회전하는 물체가 회전을 지속하려고 하는 성질의 크기를 나타낸 것으로, 고각 구동 장치를 이용하여 안테나를 수평에서 60도로 이동한 상태에서 측정한다. 각가속도는 설계 규격시간 내에 목표 도달속도의 비로 나타내며, 나머지 항은 마찰 토크로 간략화한다.

나. 방위각구동모듈

그림 4는 방위각 구동 모듈의 블록도를 나타낸다. 입력 전원부는 노이즈 차폐를 위한 입력 필터, AC 전원을 DC 전원으로 변환하는 정류기 및 제동저항 회로를 탑재한 전원 모듈, DC 전원을 AC 전원으로 변환하여 PMSM을 구동하는 인버터를 탑재한 구동 모듈로 구성한다. 제어부는 구동 모듈 운전 명령 및 상위 제어기 통신 연동을 수행하는 DSP(Digital Signal Processor)로 구성한다.

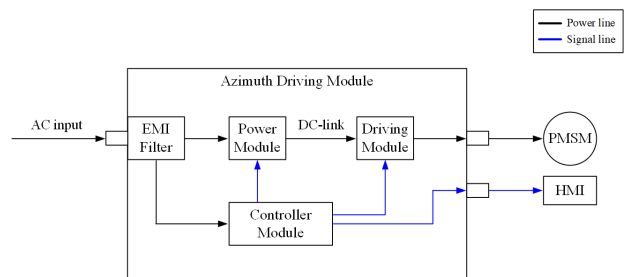


Fig. 4. Block diagram of azimuth driving module.  
그림 4. 방위각 구동 모듈의 블록 다이어그램

(1) PMSM 토크 및 속도 제어

방위각 구동 모듈에 사용된 인버터는 DC 전원을 입력받아 AC 전원을 출력한다. 인버터는 방위각 구동 모터의 속도에 따라 전압과 주파수를 가변하는 가변 전압 가변 주파수(Variable Voltage Variable Frequency, VVVF) 전압형 인버터를 사용한다.

그림 5는 ADE의 PMSM 토크 제어 블록도를 나타내며, PMSM의 토크 제어 알고리즘은 벡터 제어를 사용한다. 벡터 제어는 인버터의 출력 3상 전류를 90도의 위상차를 갖는 d-q축 전류로 변환하고, d축 전류로는 자속의 크기를 조절하고 q축 전류로는 토크의 크기를 순시 제어하는 기법이다. 좌표변환된 d-q축 전류와 d-q축 지령 전류의 오차는 비례-적분(Proportional-Integral, PI) 제어기에 의해 0으로 제어된다. PI 전류 제어기의 출력

은 d-q축 지령 전압으로 생성되며, 이를 역변환하여 3상 abc축 지령 전압으로 변환하고, 공간 벡터 전압 변조 방식(Space Vector PWM)으로 인버터에 구동 신호를 인가하여 PMSM을 구동한다[8].

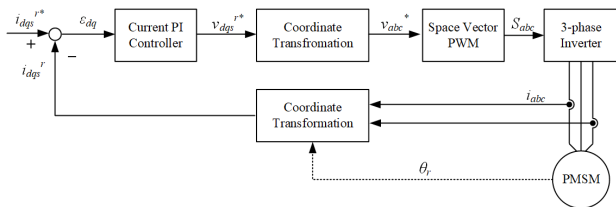


Fig. 5. Block diagram of PMSM torque control of ADE.  
그림 5. 방위각 구동 장치의 PMSM 토크 제어 블록도

PMSM의 d-q축 좌표는 회전자 쇄교자속 기준 동기 좌표계를 사용하며, 토크는 식 (2)와 같다.

$$T_M = \frac{3}{2} P_n [\lambda_f i_{qs}^r + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r i_{qs}^r], \quad (2)$$

여기서,  $P_n$ ,  $\lambda_f$ ,  $i_{dq}^r$ ,  $L_{dq}$ 는 각각 PMSM 극쌍수, 영구자석 쇄교자속, d-q축 전류, d-q축 인덕턴스를 나타낸다.

ADE용 PMSM은 표면 부착형 PMSM이므로 식 (2)에서 PMSM 돌극비를 간략화하면 식 (3)으로 나타낼 수 있다[9].

$$T_M = \frac{3}{2} P_n \lambda_f i_{qs}^r, \quad (3)$$

### (2) PMSM 속도 제어

PMSM 속도 제어기는 전류 제어기와 마찬가지로 PI 제어기를 사용하며, 지령 속도와 실제 속도의 오차를 0으로 제어한다. PI 속도 제어기의 출력은 지령 전류가 되며, PMSM의 속도가 급변하지 않도록 PI 속도 제어기 출력에 제한값을 설정한다.

### (3) 제동저항 설계

그림 6은 방위각 구동 모터의 운전 프로파일을 나타낸다. 그림 6(a), 6(b), 6(c)는 각각 PMSM의 속도, 토크, 출력 전력을 나타낸다. PMSM의 출력 전력은 식 (4)로 나타낸다.

$$Power = T_M \times \omega_m \quad (4)$$

전동기가 기계적 부하를 구동하는 경우 전동기의 발생

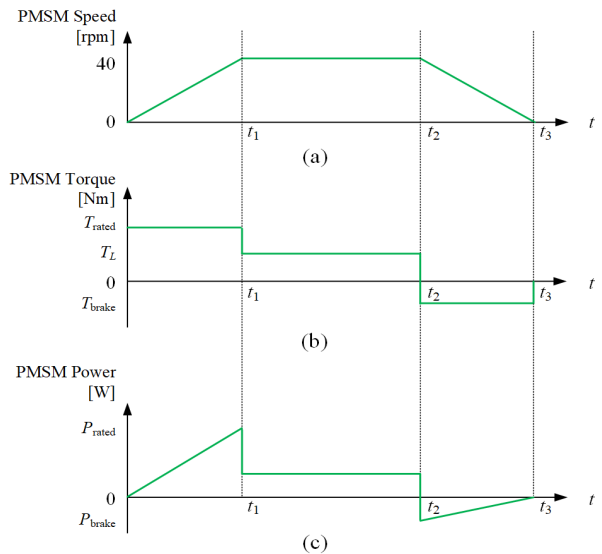


Fig. 6. Driving profile of ADE PMSM.  
그림 6. 방위각 구동 모터의 운전 프로파일

토크 방향과 반대로 부하가 회전할 때 부하에서 전동기로 에너지가 전달된다. 이때 PMSM은 발전기 모드로 동작하게 된다[11]. 이러한 회생 에너지는 전동기 구동 시스템의 내부 직류단 커패시터의 전압을 상승시켜 커패시터 및 구동 시스템의 소손을 야기한다. 회생 에너지를 전원으로 되돌리는 회생 제동 방식이 가장 효율적이지만, 회생 제동 방식은 단방향 전원 공급장치를 양방향 전원 공급이 가능한 PWM 컨버터 등의 비교적 고가의 전원 공급장치로 교체가 필요하고 MFR 전원 공급장치인 발전기 등 레이더 시스템 전력 계통에서 이를 수용할 수 있는 설비를 추가하는 등 여러 단점이 있다. 또한, MFR은 운용 개념상 회전 구동 모터는 가속 후 1주일동안 운용 속도로 회전 후 정지한다. 빈번한 감속이 없으므로 제동저항에서 회생 에너지를 소비하는 발전제동 방식이 회생 가능한 컨버터 설치 등 설비를 추가하는 회생 제동 방식보다 효과적이다.

회생 에너지를 소모하기 위해서 전동기 구동시스템 내부에 제동저항과 전력반도체 소자를 직렬로 구성하여 직류단 커패시터와 병렬로 설치한다. 전력반도체 소자는 직류단 커패시터 전압의 설정 범위에 도달하면 PWM 신호를 인가하여 제동저항 회로에서 전력을 소모시킨다 [15].

식 (5)는 그림 6(c)에 나타난 바와 같이 감속 구간에서 출력 전력을 나타낸다.

$$\begin{aligned} E_{brake} &= P_{brake} \times time, \\ P_{brake} &= T_{brake} \times \omega_m, \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $E_{brake}$ ,  $P_{brake}$ ,  $T_{brake}$  는 각각 PMSM 제동 에너지, PMSM 제동 출력, PMSM 제동 토크를 나타낸다.

제동저항 값은 식 (6)으로 나타내며, 제동저항 용량은 식 (7)에 나타난 것처럼 제동저항에 흐르는 전류를 고려하여 선정한다.

$$R_{dbr} = \frac{V_{dc,brake}^2}{P_{brake}}, \tag{6}$$

$$P_{brake} = I_{dc,brake}^2 \times R_{dbr}, \tag{7}$$

여기서,  $R_{dbr}$ ,  $V_{dc,brake}$ ,  $I_{dc,brake}$  는 각각 제동저항 값, 제동저항 회로의 동작 전압, 제동저항 회로의 전류를 나타낸다.

### III. 시뮬레이션 결과

제안하는 논문의 타당성을 검증하기 위해 PSIM tool 을 이용한 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 7은 시뮬레이션을 진행한 방위각 구동 모듈의 회로도다. ADE는 입력 교류전원 노이즈 차폐를 위한 입력 EMI 필터, 단상 다이오드 정류기 및 직류단 전해 커패시터, 직류 전원을 교류 전원으로 변환하는 3상 2-레벨 인버터, 교류 전원으로 구동되는 PMSM, 그리고 감속 시 직류단 전압을 일정하게 제어하는 제동저항 회로로 구성한다.

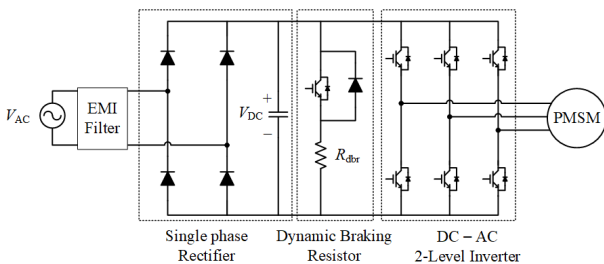


Fig. 7. Circuit diagram of azimuth driving module.  
그림 7. 방위각 구동 모듈 회로도

표 1은 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. MFR 안테나 유니트의 요구 회전 속도는 40 rpm이며, 정지상태와 요구 회전 속도간의 전환 시간은 45초 이내이다. PMSM의 출력 토크 및 용량은 다음을 고려하여 선정한다. 부하 관성 모멘트 10,000 kg·m<sup>2</sup>, 기계 각가속도 4.19/45 rad/sec<sup>2</sup> 및 부하 토크 500 N·m를 식 (1)에 대입하여 정격 토크 1,500 N·m, 정격 용량 6 kW급 PMSM을 선정하였다. 제동저항 회로의 제동저항은 직렬 및 병렬 조합으로 15 Ω, 1.5 kW로 선정하였다.

Table 1. Simulation parameters.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value	Unit
Input AC Voltage	220	[V <sub>AC</sub> ]
DC-link capacitor capacitance	4,480	[μF]
DC-link capacitor voltage rating	450	[V <sub>DC</sub> ]
Dynamic Braking Resistor	15	[Ω]
Control period	222	[μs]
PMSM Rated Power	6	[kW]
PMSM Rated Speed	40	[rpm]
PMSM Rated Torque	1500	[N·m]
PMSM Stator Resistance	50	[mΩ]
PMSM Stator Inductance	2.1	[mH]
PMSM Pole pairs	60	
Moment of Inertia	10,000	[kg·m <sup>2</sup> ]
Load Torque	500	[N·m]
Transition time (PMSM standstill ↔ rated speed)	45	[sec]

발전제동 동작 조건은 직류단 전압이 385 V<sub>DC</sub> 이상인 경우, 제동저항 회로의 IGBT를 턴온시켜 제동저항에서 회생에너지를 소모하며, 380 V<sub>DC</sub> 이상인 경우, IGBT를 턴오프하는 히스테리시스 동작을 수행한다.

그림 8은 제동저항회로 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 8(a)는 PMSM 속도, 8(b)는 제동저항 회로 전류, 8(c)는 직류단 전압, 8(d)는 PMSM 출력 토크, 8(e)는 PMSM q축 전류, 8(f)는 제동저항회로 전력을 나타낸다. PMSM 속도는 일정 속도 부하 40 rpm으로 설정하였고, PMSM q축 지령 전류를 20 A에서 -20 A로 설정하여 제동저항회로가 동작하도록 하였다. 제동저항 회로에 흐르는 전류  $I_{dbr}$ 의 실효값은 약 14.85 A로 측정되며, 그림 8(f) 및 식 (7)에 따라 제동저항 회로에서 소모하는 전력은 약 3,285 W로 계산된다.

그림 9는 방위각 구동 모듈의 가속 및 감속 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 9(a)~9(e)는 그림 8(a)~8(e)와 같다. 그림 9(f)는 인버터에 입력되는 출력 전력을 나타낸다. 정지부터 요구 회전 속도 40 rpm까지 가속 시간은 약 41.9초로 측정되며, 요구 회전 속도 40 rpm부터 정지까지 감속 시간은 약 34초로 측정된다. 따라서, 다기능 레이다 MFR의 임무 수행에 필요한 운용모드 전환시간 조건을 만족하는 것을 확인하였다. 그림 9(f)에 나타난 것처럼 가속 시에는 양의 값을 가지므로 인버터에서 PMSM로 출력 전력이 공급되지만, 감속 시에는 음

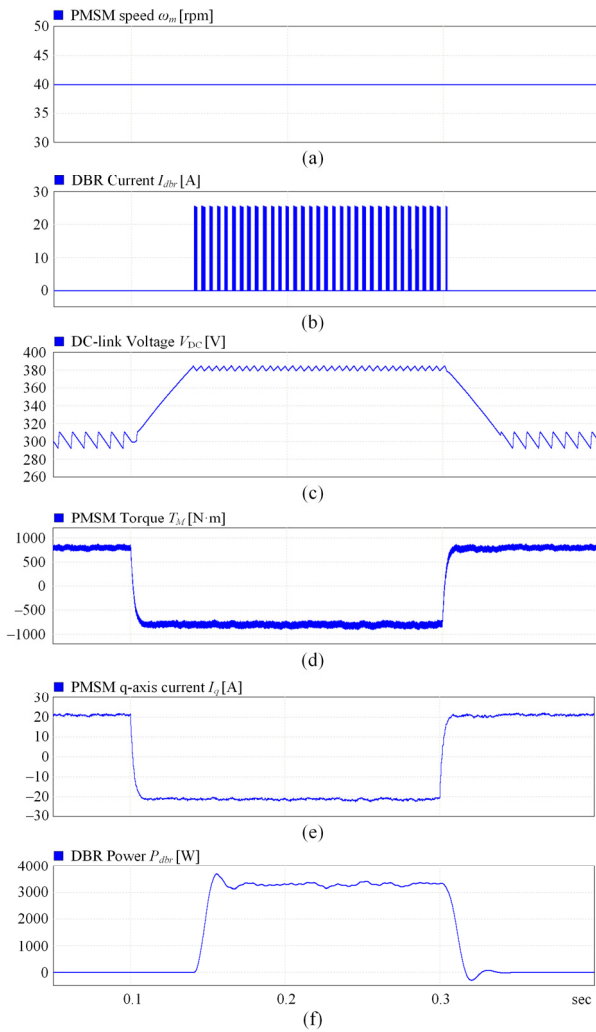


Fig. 8. Simulation results of dynamic braking resistor.  
그림 8. 제동 저항 시뮬레이션 결과

의 값을 가지므로 PMSM이 발전기로 동작하여 인버터로 출력 전력을 회생하는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 9(b)에 나타난 것처럼 발생하는 회생 에너지는 발전제동 시작 전압 값에 따라 제동저항 회로에서 소모되는 것을 확인하였고, 직류단 전해 커패시터의 전압이 400 V<sub>DC</sub> 미만을 유지하여 직류단 전해 커패시터의 내압 450 V<sub>DC</sub>를 초과하지 않는 것을 확인하였다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 MFR ADE의 정지 모드를 위한 제동저항 설계를 제안하였다. 정지 모드에서 회전 모드까지 구역시간 내에 운용 요구 속도까지 도달하기 위한 PMSM 필요 토크와 같은 성능을 계산하였고, 회전 모드에서 정지 모드로 전환할 때 발생하는 회생에너지를 소모하기

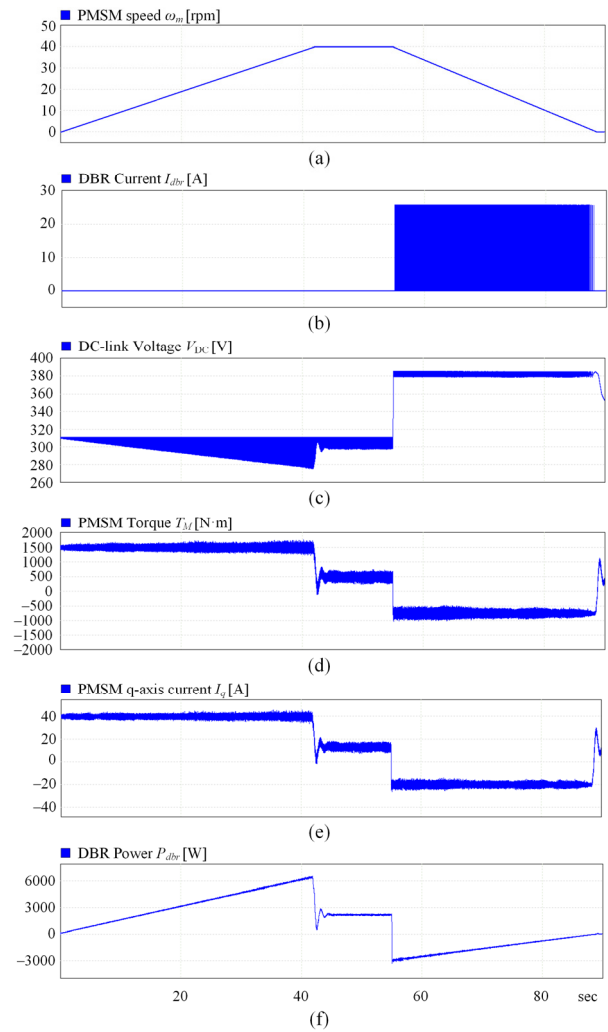


Fig. 9. Simulation results of azimuth driving module.  
그림 9. 방위각 구동 모듈의 시뮬레이션 결과

위한 제동저항 회로 설계 방안을 제시하였다. 또한, PMSM 속도 제어를 통해 가속 및 감속 구간에서 제동저항 회로가 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 제안하는 제동저항 회로 설계 방안에 대한 타당성은 시뮬레이션 결과로 검증하였다.

#### References

[1] D.-H. Lee, S.-I. Jang, and D.-S. Shin, "Active Power Factor Correction Method for Multi-function Radar Power Supply on Surface Ships," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol.25, no.2, pp.588-598, 2024. DOI: 10.5762/KAIS.2024.25.2.588  
[2] S. Lee and N. M. Kim, "Search Operation

Method for Multi-Search Areas of Multi-Function Radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol.33, no.1, pp.52-57, 2022.

DOI: 10.5515/KJKIEES.2022.33.1.52

[3] B. Han, Y. Chang, and S. Lee, "A Control Strategy of Auto-Leveling Equipment of Multi-Function Radar for Vehicle based on Embedded System Modeling," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, vol.28, no.9, pp.1-8, 2023. DOI: 10.9708/jksci.2023.28.09.000

[4] Defense and Technology, "Medium-range surface-to-air guided weapon system 'Chungong-II' exports to UAE", <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11027957>

[5] Defense and Technology, "HanwhaSystems exports 'Cheon-Gung-II Multi-Function Radar' to Saudi Arabia", <https://dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NODE11863546>

[6] Y.-K. Kwag, *Radar System Engineering*, Gyomoon, 2020. ISBN: 978-89-3632-090-4

[7] T. Ha and J. Park, "Dynamic Behavior Analysis of the Auto-leveling System for Large Scale Transporter Type Platform Equipment on the Ground Slope," *Journal of the KIMST*, vol.23, no.5, pp.502-515, 2020. DOI: 10.9766/kimst.2020.23.5.502

[8] B. Han, J.-S. Lee, Y. Bak, and K.-B. Lee, "Six-step operation strategy for direct self-control method of interior permanent magnet synchronous motors based on torque angle," *Journal of Power Electronics*, vol.21, no.9, pp.1352-1364, 2021.

DOI: 10.1007/s43236-021-00281-1

[9] K.-B. Lee, *Advanced power electronics*, munundang, 2019. ISBN: 979-11-5692-402-9.

[10] Y. Bak, "Hardware Simulator of DC-AC Inverters for Electric Compressors," *Journal of Power Electronics*, vol.24, no.6, pp.906-912, 2024. DOI: 10.1007/s43236-024-00816-2

[11] B. Xu, C. Gao, J. Zhang, J. Yang, B. Xia, and Z. He, "A Novel DC Chopper Topology for VSC-based Offshore Wind Farm Connection," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.36, no.3, pp.3017-3027, 2021.

DOI: 10.1109/TPEL.2020.3015979

[12] M. M. Skwarski, S. Robak, M. R. Piekarczyk, and M. M. Polewaczyk, "Multi-Objective Optimal Sizing of Shunt Braking Resistor for Transient State Improvement," *IEEE Access*, vol.9, pp.69127-69138, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3077333

[13] S. H. Kwon, T. J. Park, and C. S. Chung, "Optimal Regeneration Algorithm for Electric Vehicle," *Proceedings of the KIEE Conf.*, 2006, pp.1105-1106.

[14] H.-J. Park, H.-J. Lee, S.-G. Oh, and B.-J. Min, "Comparison of Control Performance by Braking Resistor in Electro-mechanical Actuator for Thrust Vector Control," *Proceedings of the KSAS Conf.*, 2017. pp.1150-1151.

[15] B.-I. Yang, S.-H. Song, and D.-J. Lim, "Design of Small Wind Power System DC Voltage Controller for Over-Voltage Protection through Dynamic Brake Resistor at Over Wind Speed Condition," *Proceedings of the KIPE Conf.*, 2017. pp.91-92.

[16] C.-M. Yun, H. Kim, H. Kim, M. Kim, and H. Jung, "A Characteristic Analysis of Power Quality on Railway Distribution Power Network Connection with Regenerative Inverter in DC Railway System," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.72, no.9, pp.1107-112, 2023. DOI: 10.5370/KIEE.2023.72.9.1107

## BIOGRAPHY

### Byeol Han (Member)



2015 : BS degree in Electronic System Engineering, Hanyang University ERICA.

2021 : MS degree in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

2021~2022 : Assistant Engineer, Hyundai-Rotem.

2022~present : Assistant Engineer, Hanwhasystems.

**Woo-Seok Oh** (Member)



2022 : BS degree in Electrical and  
Electronics Engineering, Konkuk  
University.  
2022~present : Engineer,  
Hanwhasystems.

**Myeong-Hwan Shin** (Member)



2023 : BS degree in Electrical and  
Electronics Engineering, Konkuk  
University.  
2023~present : Engineer,  
Hanwhasystems.

**Yeongsu Bak** (Member)



2014 : BS degree in Electrical and  
Computer Engineering, Ajou  
University.  
2016 : MS degree in Electrical and  
Computer Engineering, Ajou  
University.

2019 : PhD degree in Electrical and Computer  
Engineering, Ajou University.

2019~2020 : Research Associate, Research Institute  
for Information and Electronics Technology, Ajou  
University.

2020~present : Assistant Professor, Keimyung  
University.