다기능 레이다 구동시스템의 정지조향을 위한 제동저항 설계

한 별, 오 우 석, 신 명 환
한화시스템

A Development of Dynamic Braking Resistor for Stationary mode of Driving system for Multi-Function Radar

Byeol Han, Woo Seok Oh, Myeong Hwan Shin
Hanwha Systems

ABSTRACT

본 논문에서는 다기능 레이다(Multi-Function Radar, MFR) 구동시스템의 정지조향을 위한 제동저항 설계를 제안한다. 방위각구동장치(Azimuth Driving Equipment, ADE)는 중거리의 지대공 유도미사일 감시정찰 임무를 수행한다. ADE는 360도 전방향을 회전하는 회전모드와 정지된 상태에서 피사체를 추적하는 정지모드가 있다. ADE는 요구규격에 따라 규격시간 내에 회전모드에서 정지모드로 전환해야 한다. 감속 시 발전기로 동작하는 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)에 의해 입력 전원이 소손될 우려가 있으며, 이를 보호하기 위해 회생에너지를 소모하는 제동저항 설계가 필요하다. 본 논문에서는 방위각구동모터의 감속에 의해 발생하는 역기전력을 소모하는 제동저항 설계 방안을 제안한다. 제안하는 설계 방안에 대한 타당성은 실험 결과로 입증한다.

1. 서 론

표적 정밀 타격을 위한 무기 체계에서 미사일 기술은 날로 고도화되고 있다. 지대공 미사일(Surface-to-Air Missile, SAM)에 대한 연구 및 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 중거리 미사일 항공기 요격체계 천궁-II는 국내 개발 및 배치가 완료되었고, 이를 바탕으로 해외 국가에 수출사업을 진행 중이다.

차량용 다기능 레이다(Multi-Function Radar, MFR)는 레이다를 이용한 피사체 추적, 미사일 유도 등의 기능과 임무를 수행한다. 차량용 MFR의 경우, 레이다 전개 후 레이다를 일정하게 회전하여 전방향으로 표적을 감시하는 회전모드와 정지된 상태에서 표적을 추적하는 정지모드를 구현하기 정밀 제어가 가능한 전동기를 선정해야 한다.

영구자석 동기전동기 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 정밀 제어가 요구되는 전동기 구동분야에 적합하다[1]. MFR의 방위각구동장치(Azimuth Driving Equipment, ADE)는 요구시간 내 회전모드에서 정지모드로 전환되어야 한다. 다만, 전동기의 급감속 시에는 역기전력에 의해 직류단 커패시터의 전압이 상승하여 인버터가 소손될 우려가 있다. 역기전력을 소모시키는 방법에는 주로 전력반도체소자와 제동저항 직렬로 연결한 회로를 직류단 커패시터와 병렬로 구성하는 방법을 사용한다[2]. 직류단 커패시터의 전압이 일정 값 이상인 경우, 전력반도체소자에 펄스폭 변조(Pulse Width Modulation, PWM) 신호를 인가하여 역기전력 에너지를 제동저항에서 열에너지로 소모한다.

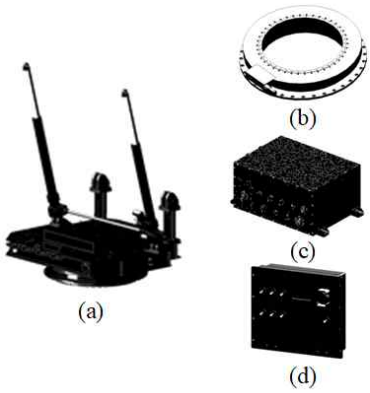

그림 1 다기능 레이다용 방위각구동장치 구성도
Fig. 1 A configuration of azimuth driving equipment for multi-function radar

본 논문에서는 다기능 레이다 구동시스템의 정지조향을 위한 제동저항 설계 방안을 제안한다. 감속 시 필요 토크에 의한 출력 전력을 계산하여 제동저항의 용량과 크기를 선정한다. 이를 바탕으로 MFR 안테나구동용 유니트와 안테나유니트를 모사한 더미를 구동하여 감속 시 제동저항에 의해 직류단 커패시터의 전압이 일정 전압 이하로 유지되는 것을 확인한다. 제안하는 설계 방안의 타당성은 실험 결과로 입증한다.

2. 본 론

2.1 다기능 레이다용 방위각구동장치(ADE)

그림 1은 다기능 레이다용 방위각구동장치 구성도를 나타낸다. 그림 1.(a)는 방위각구동장치, 그림 1.(b)는 방위각구동모터, 그림 1.(c)는 방위각구동모듈, 그림 1.(d)는 사람-기계 인터페이스(Human Machine Interface, HMI)를 나타내며 각각 차량용 MFR에 탑재된다. 방위각구동모터는 10 ton에 해당하는 안테나 유니트를 구동해야 하며, 정지위치에서 정밀 제어를 수행해야 하므로 중공형 PMSM을 선정하였다.

PMSM의 필요 토크는 식 (1)과 같이 나타낸다[1].

$$T_M = J\alpha + B\omega_m + T_L, \quad (1)$$

여기서, T_M, J, α, B, ω, T_L는 각각 PMSM 출력 토크, 관성모멘트, 각가속도($d\omega_m/dt$), 점성 마찰 계수, 기계적 각속도, 그리고 부하 토크를 나타낸다.

관성모멘트는 회전하는 물체가 회전을 지속하려고 하는 성

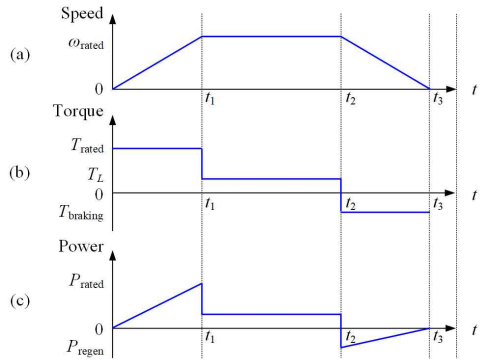

그림 2 ADE용 PMSM 운전 프로파일
Fig. 2 A driving profile of PMSM for ADE

질의 크기를 나타낸 것으로, 고각구동장치를 이용하여 MFR을 수평에서 60도로 들어올린 상태에서 측정한다. 각가속도는 설계 규격시간 내에 목표 도달속도의 비로 나타내며, 나머지 항은 마찰 토크로 간략화한다.

2.2 정지조향을 위한 제동저항 설계

전동기 부하의 관성이 크고 급감속이 발생하는 경우 전동기 구동시스템 내부에 회생에너지가 발생한다. 회생에너지는 인버터 내부 직류단 커패시터의 전압을 상승시켜 인버터 소손의 원인이 된다. 회생에너지를 열에너지로 소비시키기 위해 제동저항과 전력반도체소자를 직렬로 구성하여 직류단 커패시터와 병렬로 설치한다. 직류단 커패시터 전압의 설정 범위에 도달하면 PWM 신호를 인가하여 전력반도체소자를 동작시킨다[2].

그림 2는 ADE용 PMSM 운전 프로파일 1사이클을 나타낸다. 그림 2.(a)는 PMSM 속도, (b)는 PMSM 토크, (c)는 PMSM 출력 전력을 나타낸다. 그림 2.(c)에 나타낸 것 처럼 감속 구간에서 출력 전력은 음의 값을 나타내며, 회생 에너지가 발생한다. MFR의 PMSM은 시계방향으로만 운전하므로 역방향 운전은 고려하지 않는다.

식 (2)는 감속 구간 시 발생하는 회생에너지를 나타낸다.

$$E_{regen} = P_{regen} \times t, \quad P_{regen} = T_{braking} \times \omega_m, \tag{2}$$

여기서, E_{regen}, P_{regen}, $T_{braking}$은 각각 회생에너지량, 회생전력, 감속 토크를 나타낸다.

제동저항의 용량과 값은 식 (3)으로 나타낸다.

$$R_{dbr} = V_{dc,regen}^2 \div P_{regen}, \tag{3}$$

여기서, R_{dbr}, $V_{dc,regen}$은 각각 제동저항 값, 제동저항 동작 전압값을 나타낸다.

3. 실험 결과

표 1은 PMSM 파라미터 및 실험환경을 나타낸다. 직류단 전압은 교류전원 단상을 정류하여 공급하며, 스위칭 주파수는 10 kHz로 설정하였다. 실험 결과는 Elmo Application Studio 2 프로그램에서 기록한 로깅 데이터로 나타낸다.

마찰 토크에 의해 $T_{braking}$의 최대 값은 약 1,100 Nm으로 P_{regen}은 약 4.6 kW로 계산되며, $V_{dc,regen}$, R_{dbr}은 식 (3)에 따라 각각 375 V, 용량 2 kW, 30 Ω으로 선정하였다.

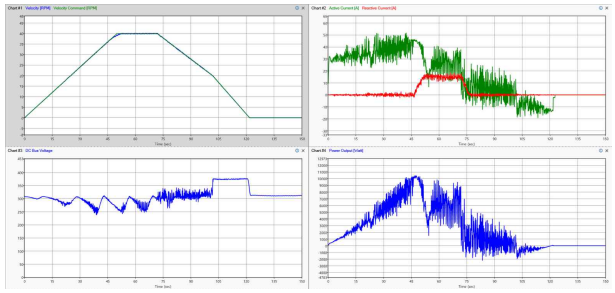

그림 3 방위각구동장치용 PMSM 실험 결과
Fig. 3 Experimental results of PMSM for ADE

표 1 PMSM 파라미터 및 실험환경
Table 1 PMSM parameters and experimental conditions

PMSM 상간저항	105 [mΩ]	운용 속도	40 rpm
PMSM 상간인덕턴스	1.97 [mH]	토크 상수	54.5 $N{\cdot}m/A_{rms}$
역기전력	106.5 V_{rms}/40rpm	제동저항	24 [Ω]
관성모멘트	12,000 $kg{\cdot}m^2$	마찰 토크	약 1300 N·m

그림 3은 40 rpm 도달 및 감속 실험 결과를 나타낸다. 요구 규격시간은 가속 및 감속 각각 60 초 이내로 설정하였다. 가속 시, 직류단 전압의 전압제한에 의해 약 37 rpm부터는 약자속 제어(Flux weakening, FW)가 수행되도록 설정하였다. 감속 시에는 40 rpm부터 20 rpm까지 타력에 의해 감속되도록 감속도를 0.8 rpm/sec로 설정하였으며, 20 rpm부터는 요구 규격시간을 맞추기 위해 감속도를 1.0 rpm/sec으로 설정하였다. 감속도를 1.0 rpm/sec로 설정하는 경우, q축 전류가 음의 값으로 설정되어 직류단 커패시터의 전압이 상승하며 380 Vdc부터 제동저항이 동작하며 제동저항이 동작하는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 MFR 구동시스템의 정지조향을 위한 제동저항 설계를 제안하였다. MFR용 ADE는 규격시간 내에 회전모드에서 정지모드로 전환해야 하며, 이를 위해 감속 시 PMSM의 역기전력을 소모하는 제동저항 설계가 필요하다. 제동저항 및 전력반도체소자는 PMSM 용량에 맞추어 선정하였고, 원활한 제동이 이루어지도록 속도 프로파일을 설정하였다. 해당 설계방안은 환경시제에서 실험으로 검증하였으며, 추후 주장비에서 감속 시간을 개선하는데 도움이 될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

[1] K.-B. Lee, “Advanced Power Electronics,” munundang, 2019, ISBN 979-11-5692-402-9.

[2] 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 braking resistor at over wind speed condition,” in Proc. of KIPE, 2017, pp. 91-92.