

A Control Strategy of Auto-Leveling Equipment of Multi-Function Radar for Vehicle based on Embedded System Modeling

Byeol Han*, Yushin Chang*, Sungyong Lee*

*Assistant Researcher, Power Control Team, Hanwha Systems, Yongin, Korea

*Principal Researcher, Power Control Team, Hanwha Systems, Yongin, Korea

*Principal Researcher, Power Control Team, Hanwha Systems, Yongin, Korea

[Abstract]

This paper presents the control strategy of Auto-leveling equipment (ALE) of Multi-function radar (MFR) for vehicle using Embedded System. MFR implements surveillance patrol missions such as surface-to-air missiles and fighters with constant rotation. ALE consists of 4 Auto-leveling modules (ALM) and retains the stability with maintaining level. The gradient of vehicle can be measured and controlled by embedded systems. This paper contributes for improvement the system design with the ALM 1 set modeling. The validity of the modeling is verified using MATLAB/Simulink.

▶ **Key words:** Multi-function radar, Auto-leveling equipment, Embedded system, PMSM, MATLAB/Simulink

[요 약]

본 논문에서는 임베디드 시스템을 이용한 차량용 다기능 레이더(Multi-Function Radar, MFR) 수평구동장치(Auto-Leveling Equipment, ALE) 구동 전략을 제안한다. 차량용 레이더는 일정 속도로 회전하며 지대공 유도미사일, 유인/무인 전투기 감시정찰 임무를 수행한다. 수평구동장치는 수평구동모듈 4세트 구성하고 레이더 차량의 수평을 유지하여 시스템의 안정성을 확보한다. 차량의 수평은 임베디드 시스템을 이용하여 경사도를 측정하고, 구동모터를 이용하여 차량의 수평각을 유지한다. 본 논문에서는 수평구동모듈 1세트를 모델링하여 수평구동장치를 축소 구현하여 수평구동장치 설계 향상에 기여한다. 제안하는 구동 전략의 타당성은 MATLAB/Simulink 시뮬레이션으로 입증한다.

▶ **주제어:** 다기능 레이더, 수평구동장치, 임베디드 시스템, 영구자석 동기전동기, MATLAB/Simulink

-
- First Author: Byeol Han, Corresponding Author: Byeol Han
 - Byeol Han (hanstar@hanwha.com), Power Control Team, Hanwha Systems
 - Yushin Chang (yushin.chang@hanwha.com), Power Control Team, Hanwha Systems
 - Sungyong Lee (sy0103.lee@hanwha.com), Power Control Team, Hanwha Systems
 - Received: 2023. 08. 09, Revised: 2023. 09. 08, Accepted: 2023. 09. 08.

I. Introduction

현대전에서 표적 정밀 타격을 위한 미사일 기술 및 전투 체계가 날로 고도화되고 있다[1]. 미사일은 지대공 미사일 발사체, 유/무인 전투기 등에 탑재되어 정밀 타격 임무를 수행한다. 이를 방어하기 위한 수단 또한 연구중에 있으며, 대표적으로 지대공 미사일에 대한 연구 및 개발이 활발히 이루어지고 있다. 패트리엇(미국)[2, 3, 22], MEADS(EU)[4], 천궁(한국)[5] 등 이 지대공 미사일의 대표적인 예시이며, 그 중에서 천궁은 국내 개발 및 배치가 완료되었으며 이를 바탕으로 해외 수출까지 성공하여 전 세계의 이목을 집중시키고 있다[6].

지대공미사일은 교전통제소, 미사일발사대, 다기능레이다, 다기능레이다용 발전기로 구성된다. 그중에서 다기능레이다(Multi-Function Radar, MFR)는 단일기능의 레이다와 탐지, 추적, 전자전, 피아식별, 미사일유도 등의 기능과 임무를 동시에 수행한다. 차량용 MFR의 경우, 레이다 전개 후 레이다를 일정하게 회전하여 전방향으로 표적을 감시하는 임무를 수행한다[7]. 이를 위해서는 레이다의 수평각을 유지하는 것이 중요하다.

수평구동장치(Auto-Leveling Equipment, ALE)는 주로 운용자가 수평상태를 육안으로 확인하고 수평구동모듈의 높이를 직접 조작하는 형태로 운용된다. 이러한 방식은 운용자의 숙련 상태에 따라 정확도와 운전 시간이 결정되므로 제한된 시간내에 전투 준비를 마쳐야 하는 군용 장비로는 적합하지 않은 방식이다[23].

자동운전 ALE는 이러한 단점을 보완하기 위해 차량의 수평 상태를 2축으로 감지하여 수평구동모듈을 제어하므로 어느 상황에서든 동일한 성능을 발휘할 수 있다. 자동운전 ALE는 수평구동모듈의 볼스크류를 구동하여 차량 플랫폼의 수평을 유지하며, 주로 유압식 수평구동모듈과 전기식 수평구동모듈로 구분한다[8-12]. 전기식 수평구동모듈은 수평구동모터와 감속기를 사용하여 스크류를 구동하므로 누유 문제가 있는 유압식 수평구동모듈보다 장점이 있다[13]. MFR의 수평은 임베디드 시스템에서 수평센서모듈의 정보를 획득하여 경사도를 측정하고, 수평구동모터에 구동 명령을 인가하여 차량의 수평각을 유지한다. 수평구동모터는 정밀 제어가 가능하며 높은 전력 밀도와 효율을 가지는 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)로 구성한다[14-16]. 이를 제어하기 위해서 3상 2-레벨 인버터를 사용하며, 자속 기준 제어(Field Oriented Control, FOC) 또는 벡터 제어라 불리는 제어 기법을 이용하여 PMSM을 제어한다



Fig. 1. System configuration of patriot missile system[22]



Fig. 2. Multi-function radar for vehicle of patriot missile system

[17-21]. 추가적으로 PMSM은 차량의 어댑터조립체에 장착되어 지면까지 무부하로 운전하고 이후 부하 운전으로 동작하여 볼스크류의 행정거리를 제한한다.

본 논문에서는 임베디드 시스템을 이용한 차량용 MFR ALE의 구동 전략을 제안한다. 수평구동모터는 감속기를 통하여 수평 안정 동작을 수행하며, 수평구동모듈 1세트를 모델링하여 수평구동장치를 축소 구현한다. 더불어 수평구동모터의 운전 프로파일을 설정하여 무부하 및 부하 운전을 수행한다. 3상 2-레벨 인버터 및 PMSM 또한 구현하여 수평구동장치 실제 운용 시 전력 소모량을 예측할 수 있어 완성도 높은 장비 제작에 기여할 수 있다. 제안하는 구동 전략의 타당성은 MATLAB/Simulink 시뮬레이션으로 입증한다.

II. Modeling of Multi-function Radar for Vehicle

1. Multi-function Radar (MFR) for vehicle

그림 1은 패트리엇 지대공 유도미사일 시스템 구성을 나타낸다[3]. 지대공 유도미사일은 교전통제소, 미사일발사대, MFR (레이다 및 발전기 세트)로 구성한다. MFR은 레이다를 일정 속도로 회전하며 정밀 유도 미사일, 유인 및 무인 전투기 등에 대한 전방향 감시 임무를 수행한다.

그림 2는 미국 패트리엇 시스템의 차량용 MFR을 나타낸다. 차량용 MFR은 차량, MFR, 수평구동장치, 안테나 유닛, 냉각장치유닛 등으로 구성된다. 본 논문에서는 수평구동장치 모델링만 기술하므로 미사일 시스템과 MFR의 세부 유닛에 대한 내용은 생략한다.

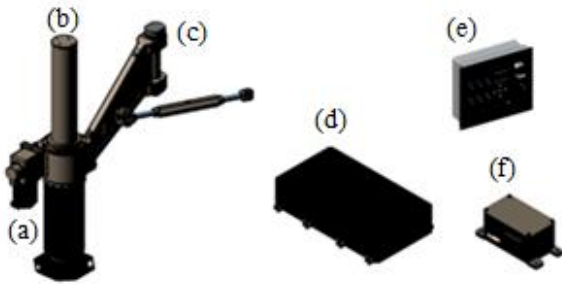


Fig. 3. Configuration of auto-leveling equipment

2. Auto-leveling equipment (ALE)

그림 3은 수평구동장치 구성을 나타낸다. 그림 3.(a)는 수평구동모터, 그림 3.(b)는 감속기 및 볼스크류를 포함하는 수평구동모듈, 그림 3.(c)는 수평구동모듈과 차량 플랫폼을 연결하는 아웃트리거, 그림 3.(d)는 수평구동제어기, 그림 3.(e)는 사람-기계 인터페이스(Human Machine Interface, HMI), 그리고 그림 3.(f)는 수평센서모듈을 나타내며 각각 차량의 적재적소에 탑재된다. 수평구동모듈은 전기식 수평구동모듈로 구성하였으며, 전기식 수평구동모듈은 유압식 수평구동모듈보다 경량화, 정밀제어가 가능하다. 또한, 유압 실린더를 사용하는 경우 운용 환경에서 발생하는 오일의 유질 및 점도 변화 등에 지속적인 유지보수가 필요하며, 근본적으로 누유라는 결점에서 자유롭지 못한 단점이 있다[13, 23].

2.1 Auto-leveling controller

그림 4는 수평구동제어기 블록 다이어그램을 나타낸다. 수평구동제어기는 전원부와 제어부로 구분한다. 전원부는 AC전원 입력 필터, AC전원을 DC전원으로 정류하는 전원

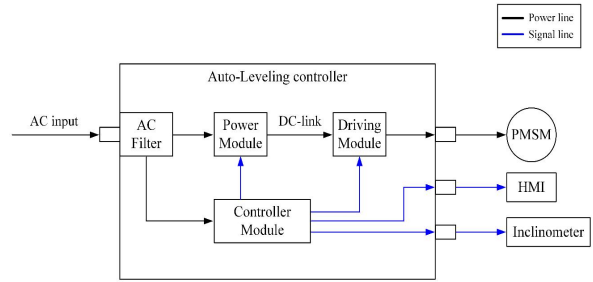


Fig. 4. Block diagram of auto-leveling controller

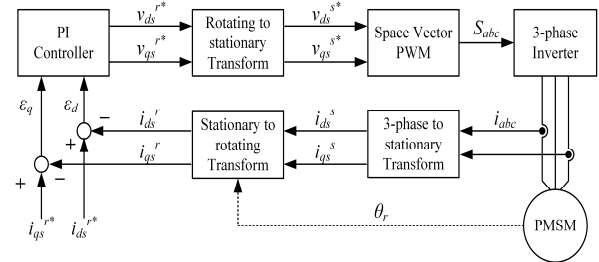


Fig. 5. Block diagram of field oriented control method

모듈, DC전원을 AC전원으로 변환하여 수평구동모터를 구동하는 구동모듈로 구성된다. 제어부는 수평 기울기 정보와 수평구동모듈 필요 행정거리를 계산하는 실시간 임베디드시스템인 디지털 신호 처리 프로세서(Digital Signal Processor, DSP)가 포함된 제어모듈로 구성한다.

2.1.1 Power module

전원모듈은 단상 교류 전원을 입력받아 직류 전원으로 변환하는 다이오드 정류기로 구성한다. 전원모듈은 과전압, 저전압, 과전류 등에 대한 보호 기능을 가지고 있으며, 제어모듈로부터 정류 가능 신호를 받을 때만 출력을 내보낸다.

2.1.2 Driving module

구동모듈은 직류 전원을 입력 받아 교류 전압을 출력하며, 수평구동모터의 속도에 따라 전압과 주파수를 가변하는 3상 2-레벨 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 인버터로 구성한다. 수평구동모터는 PMSM을 사용하며, PMSM은 유도 전동기보다 효율이 좋고, 전력 밀도가 높아 시스템의 부피를 줄이고 전력 소모량을 낮출 수 있어 다가능 레이더 구동 시스템으로 적합하다.

그림 5는 PMSM의 제어 알고리즘으로 주로 사용되는 FOC 방법을 나타낸다. FOC 방법은 인버터의 출력 3상 abc 축 전류 i_{abc} 과 PMSM 엔코더 신호 θ_r 를 이용하여 2상 d-q 축 전류 i_{dqs}^r 로 좌표변환하여 각각 자속과 토크를 제어하는 방법이다. d-q축 지령 전류 i_{dqs}^{r*} 와 변환된 d-q축 전류의 오차 전류 ϵ_{dq} 는 비례-적분(Proportional-Integral, PI) 제어

기에 의해 0으로 제어한다. PI 제어기의 출력 d-q축 지령 전압 v_{dqs}^* 은 역 좌표변환을 거쳐 3상 abc축 전압으로 변환되며, 공간벡터전압 변조기법(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)으로 인버터에 구동 신호를 인가하여 PMSM을 구동한다[17].

이때, PMSM의 d-q축 좌표는 회전자 쇄교 자속 기준 동기 좌표계로 나타내며, 전압방정식은 식 (1)로 표현하고, 토크는 식 (2)로 표현한다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_{ds} & -\omega_r L_{qs} \\ \omega_r L_{ds} & R_s + pL_{qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

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

여기서, $v_{dqs}^r, i_{dqs}^r, L_{dqs}$ 는 각각 회전자 쇄교 자속 기준 동기 좌표계 d-q축 전압, 전류, 그리고 인덕턴스를 나타낸다. $T_e, R_s, \lambda_f, p, \omega_r, P_n$ 은 각각 PMSM 토크, 고정자 저항, 영구자석 쇄교자속, 미분 연산자, 회전자 각속도 및 극 쌍수를 나타낸다. 식 (1)과 식 (2)는 PMSM의 구조에 따라 달라지는데, 표면부착형 PMSM의 경우 $L_{ds} = L_{qs}$ 이며, 매입형 PMSM의 경우 $L_{ds} \neq L_{qs}$ 이다[19].

PMSM의 출력 전력 P_m 은 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$P_m = T_e \times \omega_r, \quad (3)$$

2.2 Auto-leveling module

수평구동모듈은 감속기를 장착하여 PMSM의 토크를 증가시켜 볼 스크류를 구동한다. 볼 스크류의 작동 필요토크는 식 (4)과 같이 나타낸다.

$$T_b = \frac{F \times l}{2\pi\eta}, \quad (4)$$

여기서, T_b, F, l, η 는 각각 볼 스크류 작동 토크, 축방향 하중, 볼스크류 리드 길이, 볼스크류 효율을 나타낸다.

최대 축방향 하중은 식 (5)로 나타낸다.

$$F = mg, \quad (5)$$

여기서, m, g 는 각각 차량을 제외한 MFR의 하중, 중력 가속도 $9.81mm/sec^2$ 를 나타낸다.



Fig. 6. Modeling of inclinometer for ALE

따라서, 볼스크류의 목표 출력속도에 맞게 볼스크류 리드 길이를 선정했을 때, 축방향 하중에 따른 PMSM의 구동 필요토크는 식 (6)로 나타낼 수 있다.

$$T_{e,req} = T_b \times \frac{1}{\eta_1 \eta_2}, \quad (6)$$

여기서, $T_{e,req}, n_{12}, \eta_{12}$ 는 각각 PMSM의 필요 구동토크, 1차 베벨기어 감속기, 2차 웜기어 감속기의 감속비, 그리고 감속기 효율을 나타낸다.

2.1.3 Inclinometer module

수평센서모듈은 MFR의 수평상태를 측정하고 ALE의 수평구동모듈을 제어하기 위해 다음과 같은 요구사항이 있다.

- 차량의 전/후방 및 좌/우측 수평상태 확인(2채널)
- 정밀한 센싱을 위한 높은 분해능(최소 0.01°)
- 가혹 환경에서 구동 가능(저온/고온 동작 온도 조건)

이러한 ALE의 구동 요구사항을 만족하기 위해 수평구동모듈은 Jewell instruments사의 DXI-200 제품으로 선정하였으며, 그림 6과 표 1에 제품 모델링과 사양을 나타내었다.

Table 1. Specification of inclinometer for ALE

Parameters	Value
Number of axes	2 axis
Input range	±30°
Resolution	0.001°
Interface	RS-422 / RS-485
Supply Voltage (VDC)	10 ~ 30 V
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C

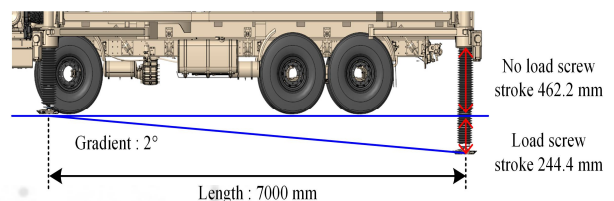


Fig. 7. Stroke of auto-leveling module with gradient 2°

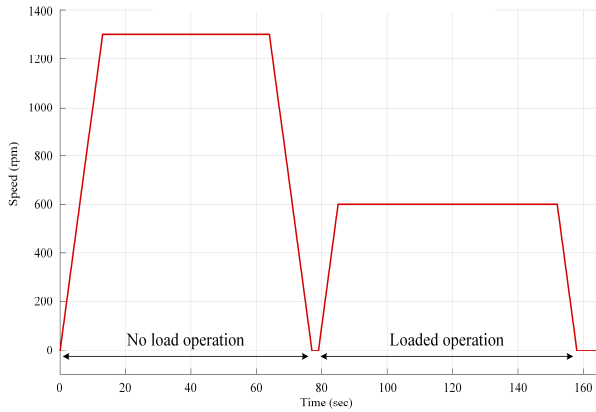


Fig. 8. Driving profile of auto-leveling motor (PMSM)

3. Driving profile of Auto-leveling motor

그림 7은 운용 경사도 2°에 따른 수평구동모듈의 행정 거리를 나타낸다. 수평구동모듈의 총 행정거리는 1000 mm로 설계되었으며, 트레일러 장축 기준 수평구동모듈간 거리는 7000 mm로 설계되었다. 수평구동모듈의 운전 구간은 무부하 및 부하 운전 구간이 존재하며, 볼 스크류가 지면에 닿기 전후로 운전 구간을 구분한다. 따라서, 그림 7에서 알 수 있듯이 무부하 운전구간은 462.2 mm이며 부하 운전구간은 삼각함수의 탄젠트 함수를 이용하면 운용 경사도 2° 기준에서 약 244.4 mm가 된다.

그림 8은 수평안정화를 위한 PMSM의 운전 프로파일을 나타낸다. 운전 프로파일은 무부하 운전구간에서는 PMSM의 정격 속도인 1300 rpm으로 구동한다. 수평구동모듈이 지면에 닿은 후 2초간 정지한 뒤 부하 운전구간으로 진입하여 600 rpm으로 구동한다. 급격한 속도 변화를 방지하기 위해 속도 상승률을 초당 100 rpm으로 설정한다. 따라서, 무부하 운전 구간에서 목표 속도 1300 rpm까지는 13초의 시간이 소요되며, 부하 운전 구간에서는 목표 속도 600 rpm까지 6초의 시간이 소요된다. 목표 속도에서 정지까지 속도 변화율도 같게 설정한다. 그림 8에서 알 수 있듯이, 운용경사도 2° 기준에서 구동 시간이 총 160 초이므로 수평구동장치의 구동 요구 시간인 300 초를 만족하도록 설계하였다.

III. Simulation results

표 2는 차량용 MFR ALE의 수평구동모듈 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. 차량용 MFR에는 수평구동모듈이 총 4 세트 장착되지만, 본 논문에서는 1 세트만 축소 모델링하여 구현한다. 또한, 수평구동모듈 1 세트만 제어하여

트레일러 장축 기준 운용 경사도 2°에서 MFR 수평을 유지하는 상황을 가정한다. PMSM은 온도, 습도 등 환경조건을 고려하여 Kollmorgen사의 EKM73P 제품으로 선정하였고, 표 2에 모터 파라미터를 나타내었다. 구동모듈의 PWM 스위칭 주파수는 속도제어기 및 전류제어기 대역폭을 고려하여 10 kHz로 선정하였으므로 제어 주기는 역수인 100 μsec가 된다.

Table 2. Simulation parameters of auto-leveling module.

Parameters	Value
1. PMSM parameters	
Stator resistance [Ω]	0.38
Stator inductance [mH]	5.9
Pole pairs	5
Torque constant [N·m/Arms]	2.13
Back-emf constant [Vrms/krpm]	137
Rated Torque [N·m]	34.5
Rated speed [rpm]	1300
Rated Power [kW]	4.69
2. Mechanical parameters	
1st bevel gear ratio n_1	1:1.5
1st bevel gear efficiency η_1 [%]	30
2nd worm gear ratio n_2	1:50
2nd bevel gear efficiency η_2 [%]	95
Ball screw lead [mm]	25
Ball screw efficiency [%]	0.9
3. Simulation parameters	
Sampling time [μsec]	100
Axial load [kg]	18000
Leveling precision [°]	±0.1

PMSM의 구동 필요토크는 식 (6)을 이용하여 계산한다. 수평구동모듈 1 세트의 축 하중은 표2에 나타난 것처럼 18000 kg이며, 식 (5)를 이용하여 식 (4)를 계산하면, 볼 스크류의 작동 필요토크는 780.8 N·m이다. 볼 스크류의 작동 필요토크 및 총 기어 감속비, 감속기 효율을 대입하여 식 (6)을 계산하면 부하 운전 구간에서 PMSM의 최소 구동 필요토크는 27.4 N·m이다.

한편, 볼 스크류 1회전당 이동하는 직선 이동 거리인 리드는 수평구동장치의 구동 요구 시간인 300 초를 만족하기 위해서 총 기어 감속비를 고려하여 25 mm로 설정하였다. 이에 따라 볼 스크류 리드의 선 속도는 PMSM이 무부하 운전 구간에서 1300 rpm으로 회전하는 경우 7.2 mm/sec이며, 부하 운전 구간에서 600 rpm으로 회전하는 경우 3.3 mm/sec이다.

주어진 조건에 따라 Kollmorgen 사의 EKM73P PMSM을 선정하였다. PMSM의 파라미터는 표 2의 1. PMSM parameters를 참고한다.

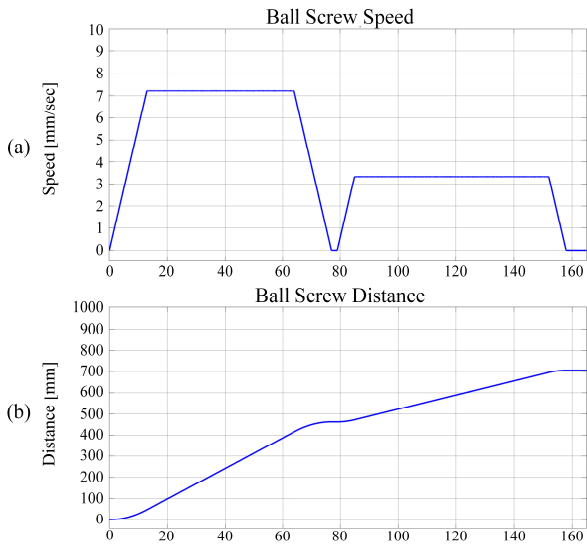


Fig. 9. Simulation results of ball screw

그림 9는 그림 8의 운전 프로파일에 따라 PMSM을 구동했을 때의 볼 스크류 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 9.(a)는 볼 스크류 리드의 선 속도이며, 그림 9.(b)는 볼 스크류 리드의 이동거리를 나타낸다. 선 속도는 기어 감속비에 따라 무부하 운전 구간에서 7.2 mm/sec, 부하 운전 구간에서 3.3 mm/sec로 나타났으며, 볼 스크류의 이동 거리는 무부하 운전 구간에서 462.2 mm, 부하 운전 구간에서 243.3 mm, 볼 스크류의 총 이동 거리는 705.5 mm로 계산된다. 따라서, 그림 7에 나타난 것처럼 운용 경사도 2° 기준에서 그림 8의 운전 프로파일로 수평구동모듈을 운전한 경우, 조절된 수평각은 1.99°로 표 2의 수평 정밀도 ±0.1°를 만족함을 알 수 있다.

그림 10은 그림 8의 운전 프로파일에 따른 PMSM의 출력 특성을 나타낸다. 그림 10.(a)는 PMSM의 속도, 그림 10.(b)는 PMSM의 출력 토크, 그리고 그림 10.(c)는 PMSM의 출력 전력을 나타낸다. 그림 8의 운전 프로파일에 따라 PMSM의 속도가 제어되며, 부하 운전 구간에서 PMSM의 출력 토크는 정격 토크인 약 34 N·m로 PMSM 구동 필요토크보다 크고, 무부하 운전 구간보다 출력 토크가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만, 그림 10.(c)에서 알 수 있듯이, PMSM의 출력 전력은 무부하 운전 구간에서 약 2.6 kW, 부하 운전 구간에서 약 2.2 kW로 나타나는 데 이는 식 (3)에서 알 수 있듯이, 출력 토크의 증가율보다 PMSM 속도의 감소율이 더 크기 때문이다.

그림 11은 그림 8의 운전 프로파일에 따른 PMSM의 출력 전류 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 11.(a)는 PMSM 3상 고정자 전류 i_{abc} 를 나타내며, 그림 11.(b)는 i_{abc} 의 확대파형, 그리고 그림 11.(c)는 PMSM d-q축 전류

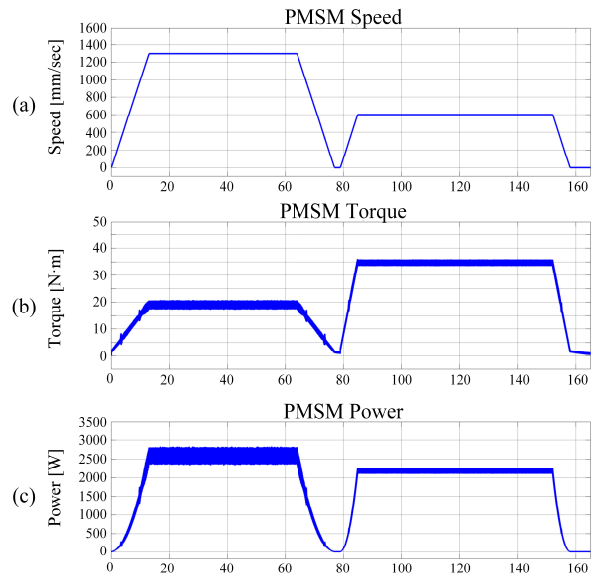


Fig. 10. Simulation results of PMSM output characteristics

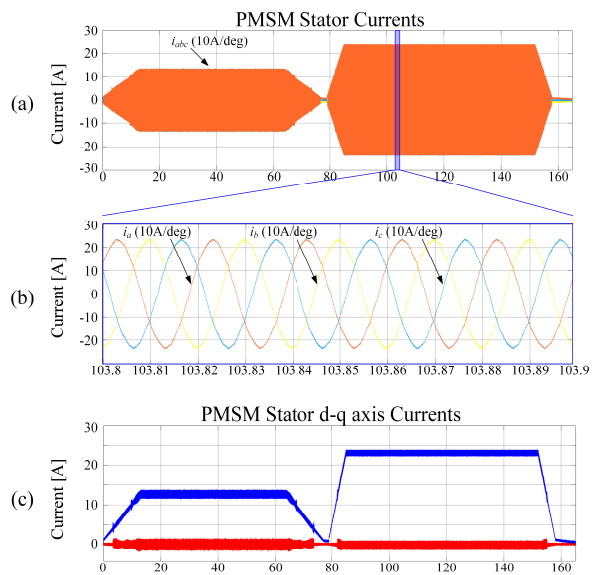


Fig. 11. Simulation results of PMSM output currents

i_{dq} 를 나타낸다. PMSM의 속도 제어기 출력인 지령 전류에 따라 PMSM d-q축 전류 i_{dq} 가 적절하게 추종되는 것을 확인하였으며, FOC 방법에 따라 3상 출력 전류 i_{abc} 또한 제어되는 것을 확인하였다.

따라서, 수평구동장치의 운전 프로파일을 무부하 운전 구간 및 부하 운전 구간으로 나누어 MFR의 기계적 안정성을 확보하고, 감속비를 적절하게 선정하면 수평 정밀도를 확보하면서 수평구동장치의 구동 요구 시간을 만족할 수 있다.

IV. Conclusions

본 논문에서는 임베디드 시스템을 이용한 차량용 다기능 레이더 수평구동장치 구동 전략을 제안하였다. 수평구동장치의 시스템과 수평구동제어기의 전원모듈 및 구동모듈을 모델링하였고, 무부하 및 부하구간을 나누어 운전 프로파일을 설정하였다. 또한, 운전 프로파일에 따른 소모 전력량을 계산하여 다기능 레이더의 설계 향상에 기여하였다. 추후 수평구동모드 및 차량분리모드 등 여러 운전 모드에 대한 요구사항 정립과 고온 및 저온 극한 환경에서 동작하는 알고리즘에 대한 연구가 필요하다. 제안하는 구동 전략의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

REFERENCES

- [1] S.-H. Kang and K.-H. Kim, "Design and Implementation of User-Level File System in the Combat Management System" *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, vol. 27, no. 12, pp. 9-16, Dec. 2022. DOI: 10.9708/jksoci.2022.27.12.009
- [2] C. Bennett, G. Anderson, and J. Brady, "Improving Situational Awareness Training for Patriot Radar Operators", in *Proc. of IEEE Aerospace Conference*, 2010, pp. 1-7. DOI: 10.1109/AERO.2010.5446795
- [3] E. Brookner, "Advance and breakthroughs in radars and phased-arrays", in *Proc. of CIE International Conference on Radar (RADAR)*, 2016, pp. 1-9. DOI: 10.1109/RADAR.2016.8059284
- [4] W. A. Kuhn, W. Sieprath, L. Timmoneri, and A. Farina, "Phased Array Radar Systems in Support of the Medium Extended Air Defense System (MEADS)", in *Proc. of IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, 2003, pp. 94-100. DOI: 10.1109/PAST.2003.1256963
- [5] 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
- [6] 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>
- [7] Y.-K. Kwag, *Radar System Engineering*, Gyomoon, 2020. ISBN: 978-89-3632-090-4
- [8] H. Yang and G. Li, "Research on an Automatically Leveling Control System for vehicle-borne platform with high accuracy", in *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications*, 2006, pp. 1-5. DOI: 10.1109/MESA.2006.296967
- [9] J. Zhang, D. Huang, and C. Lu, "Research on Dynamic Model and Control Strategy of auto-leveling system for vehicle-borne platform", in *Proc. of International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007, pp. 973-977. DOI: 10.1109/ICMA.2007.4303679
- [10] C. Lu, D. Huang, Z. Jin, and Y. Huang, "The Research and Design of Auto-leveling Control System for vehicle-borne radar platform based on AVR", in *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications*, 2006, pp. 1-5. DOI: 10.1109/MESA.2006.296949
- [11] J. Ruobing, C. Chong, Y. Min, and W. Fuping, "The Study of Automatically Leveling Control System on Electromechanical vehicle stable platform", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 494, pp. 266-269, 2014. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.494-495.266
- [12] 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, Oct. 2020. DOI: 10.9766/kimst.2020.23.5.502
- [13] J.-H. Cha and M.-J. Shin, "A Study on Improvement of Oil Leakage by Applying Double Seals in the Hydraulic Fan Motor for K200 Series Tracked Vehicles", *Journal of the KAIS*, vol. 23, no. 5, pp. 32-39, May 2022.
- [14] 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, Jul. 2021. DOI: 10.1007/s43236-021-00281-1
- [15] Y.-G. Oh, B. Han, Y.-K. Oh, J.-H. Ryu, and K.-B. Lee, "Modeling of Hybrid Railway Vehicles with Hydrogen Fuel-Cell/Battery using a Rule-Based Algorithm", *Journal of Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers*, vol. 24, no. 6, pp. 610-618, Jun. 2020. DOI: 10.7471/ikeee.2020.24.2.610
- [16] B. Han, Y. Bak, and K.-B. Lee, "Improvement of Dynamic Response for IPMSM based on DTC-CFTC Using Sliding Mode Control", *Journal of IKEEE*, vol. 23, no. 2, pp. 628-635, Jun. 2019. DOI: 10.7471/ikeee.2019.23.2.628
- [17] B. Han, J.-S. Lee, Y. Bak, and K.-B. Lee, "Performance Analysis of Direct Torque Control method for Traction System based on IPMSM," *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 23, no. 1, pp. 21-34, Jan. 2020. DOI: 10.7782/jksr.2020.23.1.21
- [18] S. Kim, Y. Kim, M. Kim, U. Yi, and S. Lee, "Experimental verification of inverter's optimal controller for driving 150kW SPMSM of EGR blower of Green-ships", *Journal of IKEEE*, vol. 26, no. 4, pp. 73-78, Dec. 2022. DOI: 10.7471/ikeee.2022.26.4.596
- [19] S.-H. Kim, *Motor Control*, bogdoo, 2022. ISBN 979-11-6675-093-9
- [20] K. Kim, S.-M. Ryu, M.-K. Kim, Y.-J. Kang, H. Kim, H. Lee,

and J.-H. Lee, "Detects abnormal behavior using motor power consumption," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, vol. 23, no. 10, pp. 65-72, Oct. 2018. DOI: 10.9708/jksci.2018.23.10.065

- [21] J.-G. Kang, "A Study on Mobile Robot for Posture Control of Flexible Structures Using PI Algorithm," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, vol. 27, no. 2, pp. 9-14, Feb. 2022. DOI: 10.9708/jksci.2022.27.02.009
- [22] Chosunilbo, Beaten by Patriot again, humiliation of hypersonic Kinzal, who Putin said "piercing everything," <https://www.chosun.com/international/europe/2023/05/17/GMACNFB4ORBXFEXV VYYWOMCZJM/>
- [23] J.-W. Chung, "Design of Hydraulic System for Leveling Control of a Large Vehicle," *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 385-390, Apr. 2015.

Authors



Byeol Han received his B.S. degree in Electronic System Engineering from Hanyang University ERICA, Ansan, Korea, in 2015. He received his M.S. degree in Electrical and Computer Engineering from Ajou University,

Suwon, Korea, in 2021. Mr. Han joined the Power Control Team, division of Research and Development, Hanwha Systems, Yongin, Korea in 2022. His current research interests include power electronics, electric machine drives such as permanent magnet synchronous machines (PMSMs), and grid-connected inverters.



Yushin Chang received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University, Korea, in 1996, 1998 and 2006, respectively. Dr. Chang joined the Power Control Team, Division of

Research and Development, Hanwha Systems, Yongin, Korea in 2006. He is interested in Power and Servo Control, Radar Servo Driving Systems, High-load Servo Radar Platforms, Auto-leveling Control Radar Platforms, Azimuth Rotating and Elevation Driving Servo Platforms, Radar Servo Driving Test Systems, Vehicle-Mounted Mine Detecting (VMMD) Systems, Hand-Held Mine Detectors (HHMD), Robot-Mounted Mine Detecting (RMMD) Systems and Penetrating Radar Systems.



Sungyong Lee received the B.S., M.S. degrees in Electronic Control and Robotics Engineering from Kumho National Institute of Technology, Korea, in 2001, 2003, respectively.

Mr. Lee has been working at Hanwha Systems Co., Ltd. since 2002, and his main job is to design Servo Systems. He is interested in Gimbal control, Line of sight stabilization, and development of high load drives.