



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

고신뢰성 유도무기용 브러쉬 없는  
영구자석 속도검출기 최적 설계

Optimal Design of Highly Reliable Brushless  
Tachogenerator for Guided Weapons

2016년 8월

서울대학교 대학원

전기·컴퓨터 공학부

유 청 희

고신뢰성 유도무기용 브러쉬 없는  
영구자석 속도검출기 최적 설계

지도교수 정 현 교

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함  
2016년 8월

서울대학교 대학원  
전기·컴퓨터 공학부  
유 청 희

유청희의 공학박사 학위논문을 인준함  
2016년 8월

위 원 장 \_\_\_\_\_ (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

## 국문초록

유도무기 및 무인 항공기와 같은 국방 및 항공 분야 구동장치로는 전동기를 이용한 전기식 구동장치가 널리 사용되고 있으며, 이러한 전기식 구동장치를 제어하기 위해서는 회전속도 센서가 필수적으로 요구된다. 현재 국내외에서 개발 완료 되었거나, 개발 진행 중인 유도무기용 전기식 구동장치에 사용되는 회전속도 센서로는 직류 영구자석 속도검출기(DC Tachogenerator)가 가장 많이 사용되고 있다. 직류 영구자석 속도검출기는 직류 발전기 원리를 이용하는 간단한 구조를 가지므로 소형으로 구현이 가능하며, 여기전압이 불필요하고, 속도에 비례하는 전압 출력을 빠르고 손쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 직류 영구자석 속도검출기는 기계적으로 브러시를 통하여 접촉하는 구조를 가지고 있기 때문에, 진동 및 충격 등이 지속적으로 인가되는 가혹한 군사환경 조건에 대한 내환경성 측면에서 불리하고, 고속 회전하는 전동기에 사용하기 힘들며, 브러시의 기계적 마모에 의한 사용시간 제한 및 전자파 간섭에 의한 신호 잡음 발생 등의 문제점을 가지게 된다.

따라서, 본 논문에서는 직류 영구자석 속도검출기의 우수한 장점들을 유지하면서도 브러시의 사용으로 인한 단점들을 극복함으로써, 유도무기에서 요구하는 높은 안정성과 신뢰성을 가질 수 있는 브러시 없는 영구자석 속도검출기(Brushless Tachogenerator)를 제안하고, 이의 최적 설계안을 제시한다. 제안된 브러시 없는 영구자석 속도검출기는 교류 발전기 원리를 이용하기 때문에 국내의 전동기 및 발전기 제조시설 기반을 활용하여 제작이 가능하다. 따라서, 군사용 목적 사용에 따른 해외 도입품의 수출 규제와 관계없이 국내에서 독자 개발이 가능한 장점을 가진다.

본 논문에서는 브러시 없는 영구자석 속도검출기의 회전속도 및 회전방향 구현 기법을 새롭게 제안하고, 브러시 없는 영구자석 속도검출기 운용 중에 단선에 의해 3개의 상역기전압 중 1개가 검출이 불가능하더라

도 센서 자체적으로 이를 극복하는 내고장성 확보 방법에 대하여 제안함으로써 속도검출기의 신뢰성 및 안정성을 향상시켰다.

또한, 본 논문에서는 복잡한 목적함수를 가지며 오랜 계산시간이 소요되는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기와 같은 전기기기 최적설계 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 새로운 대리모델 기반 멀티모달 최적화 알고리즘을 제안하고, 이를 바탕으로 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기에 대한 최적 설계를 수행하였으며, 실제 시제품을 제작하고 이에 대하여 다양한 시험을 수행함으로써 제안된 설계기법 및 시제품의 성능을 입증하였다.

마지막으로 제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 이용하여 유도탄 날개 구동장치에 발생한 공기역학적 공탄성 진동을 효과적으로 억제할 수 있는 새로운 제어 기법을 제시하고, 이에 대한 검증시험을 수행함으로써, 제안된 기법의 우수한 성능을 확인하였다.

**주요어** : 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기, 멀티모달 최적화 설계, 유도무기 구동장치, 고장 허용 설계, 공탄성 진동 억제 제어

**학 번** : 2011-30968

# 목 차

국문초록 .....	i
목차 .....	iii
그림 목차 .....	v
표 목차 .....	ix
제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 논문 구성 .....	4
제 2 장 영구자석 속도검출기 .....	6
제 3 장 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 설계 기법 ....	9
3.1 사다리꼴 역기전력을 이용한 설계 .....	10
3.2 정현파 역기전력을 이용한 설계 .....	29
제 4 장 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 최적 설계 ....	41
4.1 기존의 최적화 기법 .....	42
4.2 제안된 최적화 기법 .....	46
4.3 제안된 최적화 기법을 이용한 영구자석 속도검출기 최적 설계 .....	59
제 5 장 시제품 설계, 제작 및 평가 .....	76
5.1 사다리꼴 역기전력을 이용한 속도검출기 시제품 .....	77
5.2 정현파 역기전력을 이용한 속도검출기 시제품 .....	86

제 6 장 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 이용한 유도탄 날개 구동장치 공탄성 진동 억제 제어 .....	95
6.1 유도탄 날개 공탄성 진동 현상 .....	95
6.2 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 이용한 공탄성 진동 억제 제어 .....	96
제 7 장 결론 및 향후 연구계획 .....	114
7.1 결론 .....	114
7.2 향후 연구계획 .....	115
참고문헌 .....	117
Abstract .....	129

## 그림 목 차

그림 2.1. 직류 영구자석 속도검출기 .....	7
그림 2.2. 교류 영구자석 속도검출기 .....	8
그림 2.3. 브러쉬 없는 직류 영구자석 속도검출기 .....	8
그림 3.1 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 구현 방식 비교 .....	10
그림 3.2 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 상세 개념도 (래치형 홀센서를 회전축 위치 감지기로 이용하는 경우) .....	12
그림 3.3 래치형 홀센서를 이용한 회전방향 선정 방법 .....	14
그림 3.4 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 상세 개념도 (선형 홀센서를 회전축 위치 감지기로 이용하는 경우) .....	16
그림 3.5 래치형 및 선형 홀센서 출력파형 비교 .....	16
그림 3.6 선형 홀센서와 비교기를 이용한 신호처리 .....	17
그림 3.7 3상 사다리꼴 역기전압에 대한 회전각도 계산 파형 ..	20
그림 3.8 선형 홀센서 신호에 대한 내고장성 구현 .....	21
그림 3.9 회전속도 계산 영역 (구간 1 및 구간 2 판별 방법) .....	23
그림 3.10 회전속도 계산 영역 (구간 2-1 및 구간 2-2 판별 방법) .....	23
그림 3.11 C상 고장시 A상과 B상으로 구현한 회전속도의 크기 .....	26
그림 3.12 C상 고장시 A상과 B상으로 구현한 회전각도 계산 파형 .....	28
그림 3.13 정현파 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기 상세 개념도 .....	29
그림 3.14 3상 정현파 역기전압을 이용한 변형된 페이지도 .....	31
그림 3.15 3상 정현파 역기전압에 대한 회전각도 계산 파형 .....	33
그림 3.16 회전방향 결정법 .....	34
그림 3.17 B상 고장시 A상과 C상으로 구현한 B상 추정치 .....	35



그림 3.18 C상 고장시 A상과 B상으로 구현한 회전각도 계산 파형 .....	37
그림 3.19 왜곡이 존재하는 3상 역기전압 및 이의 복원 결과 ...	40
그림 4.1 빅뱅-빅크런치 알고리즘 순서도 .....	45
그림 4.2 벡터 이미지에 대한 희소 변환 .....	48
그림 4.3 희소 공간에서의 이미지 분포 및 가중함수 형상 .....	50
그림 4.4 가중치 가변 조정을 위한 샘플의 증가율과 분포 척도 .....	50
그림 4.5 기존 기법과 제안된 기법의 비교 .....	51
그림 4.6 니체 반경 계산 기법 1 .....	52
그림 4.7 니체 반경 계산 기법 2 .....	53
그림 4.8 제안된 최적화 기법의 전체 순서도 .....	56
그림 4.9 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 설계 변수 ...	60
그림 4.10 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 해석 모델 형상 .....	62
그림 4.11 사다리꼴 역기전압 속도검출기 편심 적용 .....	63
그림 4.12 사다리꼴 역기전압 속도검출기 편심 적용시 역기전압 해석 결과 .....	63
그림 4.13 사다리꼴 역기전압 속도검출기 편심 적용시 코깅 토오크 해석 결과 .....	64
그림 4.14 사다리꼴 역기전압 속도검출기 상온 운용시 온도 변화량 .....	65
그림 4.15 사다리꼴 역기전압 속도검출기 전류 계측 결과 .....	67
그림 4.16 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 설계 변수 ...	68
그림 4.17 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 해석 모델 형상 .....	70
그림 4.18 정현파 역기전압 속도검출기 편심 적용 .....	71
그림 4.19 정현파 역기전압 속도검출기 편심 적용시 역기전압 해석 결과 .....	71

그림 4.20 정현파 역기전압 속도검출기 편심 적용시 코깅 토오크 해석 결과 .....	72
그림 4.21 정현파 역기전압 속도검출기 전류 계측 결과 .....	74
그림 4.22 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 최적화 과정 .....	75
그림 5.1 시험 구성도 .....	76
그림 5.2 사다리꼴 역기전압 이용 영구자석 속도검출기 시제품 단면도 .....	77
그림 5.3 사다리꼴 역기전압 이용 영구자석 속도검출기 실물 사진 .....	77
그림 5.4 역기전압 해석결과 및 실험결과 .....	78
그림 5.5 속도 출력 비교 (100 [rpm]) .....	80
그림 5.6 속도 출력 비교 (1,000 [rpm]) .....	80
그림 5.7 속도 출력 비교 (10,000 [rpm]) .....	81
그림 5.8 속도 출력 비교 (0 ⇒ 5,000 [rpm]) .....	81
그림 5.9 사다리꼴 역기전압 속도검출기 선형성 그래프 .....	83
그림 5.10 초저속 영역 속도 출력 비교 (5 [rpm]) .....	84
그림 5.11 초저속 영역 속도 출력 비교 (10 [rpm]) .....	84
그림 5.12 사다리꼴 역기전압 속도검출기 내고장성 .....	85
그림 5.13 정현파 역기전압 이용 영구자석 속도검출기 시제품 단면도 .....	86
그림 5.14 정현파 역기전압 이용 영구자석 속도검출기 실물 사진 .....	86
그림 5.15 역기전압 해석결과 및 실험결과 .....	87
그림 5.16 속도 출력 비교 (100 [rpm]) .....	89
그림 5.17 속도 출력 비교 (1,000 [rpm]) .....	89
그림 5.18 속도 출력 비교 (10,000 [rpm]) .....	90
그림 5.19 속도 출력 비교 (0 ⇒ 5,000 [rpm]) .....	90
그림 5.20 정현파 역기전압 속도검출기 선형성 그래프 .....	92
그림 5.21 초저속 영역 속도 출력 비교 (5 [rpm]) .....	93

그림 5.22 초저속 영역 속도 출력 비교 (10 [rpm])	93
그림 5.23 정현파 역기전압 속도검출기 내고장성	94
그림 6.1 유도탄 날개 구동 시스템 세부 구성도	98
그림 6.2 제안된 공탄성 진동 능동 억제 기법의 상세 구조	99
그림 6.3 제안된 UCE의 상세 구조	103
그림 6.4 FECC의 상세 구조	104
그림 6.5 시험구성	107
그림 6.6 스텝 구동명령에 대한 동적 응답 비교	108
그림 6.7 정현파 구동명령에 대한 동적 응답 비교	108
그림 6.8 PID 제어 기법 주파수 응답 결과	109
그림 6.9 TDC 제어 기법 주파수 응답 결과	110
그림 6.10 제안된 제어 기법 주파수 응답 결과	110
그림 6.11 PID 제어 기법의 비행 조건에 대한 동적응답	112
그림 6.12 TDC 제어 기법의 비행 조건에 대한 동적응답	112
그림 6.13 제안된 제어 기법의 비행 조건에 대한 동적응답	112
그림 6.14 공탄성 진동에 의한 날개 구동장치 파손 예	113

## 표 목 차

표 3.1 래치형 홀센서를 이용한 상역기전압 선택 논리표 .....	13
표 3.2 래치형 홀센서를 이용한 회전방향 논리표 : 시계방향 .....	13
표 3.3 래치형 홀센서를 이용한 회전방향 논리표 : 반시계방향 ..	13
표 3.4 3상 역기전압 신호에 따른 6개 구간 선정 방법 .....	18
표 3.5 상역기전압 선택 논리표 .....	18
표 4.1 제안된 최적화 기법과 기존 최적화 기법의 비교 .....	57
표 4.2 제안된 최적화 기법과 기존 최적화 기법의 비교 .....	58
표 4.3 제안된 최적화 기법과 기존 최적화 기법의 비교 .....	58
표 4.4 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 초기 모델 사양 .....	60
표 4.5 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 최적화 결과 ...	61
표 4.6 사다리꼴 역기전압 속도검출기 온도변화 해석 결과 .....	66
표 4.7 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 초기 모델 사양 ..	68
표 4.8 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 최적화 결과 .....	69
표 4.9 정현파 역기전압 속도검출기 온도변화 해석 결과 .....	73
표 5.1 사다리꼴 역기전압 속도검출기 선형성 확인시험 .....	82
표 5.2 정현파 역기전압 속도검출기 선형성 확인시험 .....	91
표 6.1 기호 설명 및 단위 .....	97

# 제 1 장 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

최근 전기기기 설계 및 제어 관련 기술의 비약적인 발전으로 인하여 정밀 속응 제어를 요구하는 유도무기 및 무인항공기와 같은 국방 및 항공 분야 기기의 구동을 위한 서보 응용 분야에 전동기를 이용한 전기식 구동장치의 사용이 급격히 증대되고 있다. 전기식 구동장치는 간헐적 오버 드라이브가 가능하여 소형화에 유리하고, 대기전력이 적게 소모되며, 유지 보수가 쉽고, 장기간 저장 보관이 가능한 점 등 여러가지 우수한 장점을 많이 가지고 있다. 또한 전기식 구동장치의 단위 체적당 출력이 현저히 증가함에 따라, 현재 유도무기에 사용되는 고성능 구동 시스템은 전기식 구동장치로 설계하는 경우가 다수를 차지하고 있다[1]~[5].

유도무기용 고성능 전기식 구동장치를 제어하기 위해서는 위치 센서, 속도 센서 및 전류 센서 등과 같은 상태 변수 피드백을 위한 센서류의 사용이 요구되게 된다. 전기식 구동 시스템은 위치 제어와 연관된 댐핑 요소의 구현을 위해서나, 혹은 직접적인 속도 제어에 사용하기 위하여 회전속도 센서를 필수적으로 요구한다. 현재 국내에서 개발 완료되거나 개발 중인 유도무기용 전기식 구동장치에 사용되는 속도 센서로는 직류 영구자석 속도검출기(DC Tachogenerator)가 가장 많이 사용되고 있다. 직류 영구자석 속도검출기는 가장 간단한 구조를 가지기 때문에 소형으로 구현이 가능하고, 여기전압이 필요 없으며, 취급이 용이하고, 속도에 비례하는 전압 출력을 빠르고 손쉽게 얻을 수 있다. 하지만 내부에서 기계적으로 브러시를 통하여 접촉하는 구조를 가지고 있기 때문에, 진동 및 충격 등과 같은 내환경성이 불리하고, 고속 회전하는 전동기에 연결하여 사용하기 힘든 특성을 가지며, 브러시의 기계적 마모에 의한 사용 시간 제한 및 전자기파 간섭에 의한 신호 잡음 발생 등의 문제점을 가지

고 있다[6]-[9].

일반적인 민수용 전기식 구동장치의 회전속도 검출을 위해서 사용되는 다른 종류의 속도 센서로는 엔코더 및 레졸버 등이 있다. 하지만 이들을 유도무기 구동장치에 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 엔코더는 광학식으로 속도를 검출하는 구조를 가지므로, 진동 및 충격에 민감하게 반응하기 때문에, 유도무기 운용에 필요한 군사 환경조건을 만족하기 힘들다[10]-[13]. 레졸버는 비접촉식으로 구현되기 때문에 진동 및 충격 등의 군용 환경조건을 만족할 수 있지만, 속도 검출을 위해 부가적인 여기전압 및 정현파 발진회로와 신호처리 회로 등의 전용 전자회로가 필요하게 된다. 최근 이들 주변회로를 한개의 전자칩으로 구현한 소자들이 판매되고 있지만, 군용 환경규격을 만족하는 소자는 거의 판매되고 있지 않거나, 수출 규제를 받고 있는 실정이다[14]-[17].

따라서, 본 논문에서는 빠른 응답특성과 단순한 구조를 가지며, 여기전압 및 추가적인 전용 전자회로가 필요 없는 직류 영구자석 속도검출기의 장점들을 살리면서도, 직류 영구자석 속도검출기의 브러쉬 사용으로 인한 단점들을 극복함으로써, 유도무기에서 요구하는 높은 안정성과 신뢰성 및 정확성을 획득할 수 있는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기(Brushless Tachogenerator)를 제안하고, 이의 상세설계안을 제시한다. 제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 국내의 전동기 및 발전기 제조 시설을 활용하여 국내 제작이 용이하기 때문에, 수입품을 대체하여 자체 제작이 가능하고, 또한 군용 목적 사용에 따른 해외 도입품의 수출 규제를 피할 수 있는 장점을 가진다.

한편, 군용 무기체계 및 항공우주용 센서류는 특성상 센서 자체내의 특정 부위 고장이 전체 시스템의 정상동작에 치명적인 영향을 주거나, 극단적으로는 시스템의 정상동작을 불가능하게 만든다. 특히, 유도무기용 구동장치는 유도탄의 방향을 제어하는 역할을 담당하기 때문에, 여기에 사용되는 센서류의 고장은 유도탄의 제어 불가 상태를 만들 수도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 일반적으로 센서류를 이중으로 장착하

여 사용하고 있다. 하지만, 이는 공간적으로나 경제성 측면에서 매우 불리하게 작용하게 된다. 이를 반영하여, 최근 고장이 발생하더라도 센서 자체적으로 이를 극복할 수 있는 고장허용(Fault Tolerance) 성능을 구현하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 제안하는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기가 단선에 의한 고장에 대하여 고장허용 성능을 가질 수 있도록 설계하였다.

최근 개발되는 전기기기 및 전자기 현상을 이용한 센서류는 고성능을 요구하기 때문에 종래의 전기기기 및 센서류와 달리 더욱 복잡한 형상을 가지게 되고, 이로 인하여 전자기장의 비선형성이 증대되어 유한요소법(Finite Element Method, FEM)과 같은 좀 더 정확한 전자기장 해석 방법이 필수적으로 요구된다. 하지만 유한요소법과 같은 최신의 전기기기 해석 기법들은 계산 시간 및 자원을 상대적으로 많이 요구하게 된다. 더군다나 이러한 유한요소법 등을 최적화 알고리즘에 적용하여 전기기기를 설계하게 되면 목적함수 계산 횟수의 증가에 따라 계산시간이 심각하게 늘어나게 된다. 따라서 본 논문에서는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 최적 설계에 있어서 전역 최적해 이외에 여러개의 국소 최적해를 동시에 탐색하면서도 계산시간을 효과적으로 단축시키는 새로운 최적화 기법 및 설계 절차를 제안한다. 또한, 제안된 새로운 최적화 기법 및 설계 절차를 기반으로 유도무기용 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 최적 설계를 수행하고, 이의 검증을 위한 시제품을 제작하여 성능시험을 수행함으로써, 제안된 최적화 기법이 실제적인 전기기기 및 센서류 설계 문제에 효과적으로 적용 가능함을 보였다.

끝으로, 본 논문에서는 제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 이용하여 유도탄 날개 구동장치에 발생한 공탄성 진동을 효과적으로 억제하는 방법을 새롭게 제안하고, 이에 대한 다양한 시험을 수행함으로써 제안된 기법의 우수성을 입증하였다.

## 1.2 논문 구성

본 논문은 총 7장으로 구성되어 있으며, 각 장의 연구범위 및 내용은 다음과 같다.

제 1장에서는 연구배경과 목적 및 논문의 구성에 대하여 기술하였다.

제 2장에서는 영구자석 속도검출기의 종류 및 특징에 대하여 살펴본다.

제 3장에서는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 구성하는 방법 및 이를 이용하여 속도검출을 구현하는 기법에 대하여 제안한다. 제안하는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 사다리꼴 역기전력을 이용하는 설계 기법과 정현파 역기전력을 이용하는 설계 기법의 두가지로 나뉘며, 두가지 모두 회전속도에 비례하여 발생하는 발전기의 역기전력을 이용하여 회전속도 및 회전방향을 생성하게 된다. 또한, 본 장에서는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 고장허용 성능을 구현하는 방법을 제안하고 상세 내용을 기술한다.

제 4장에서는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 최적 설계 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 새로운 멀티모달 최적화 기법 및 설계 절차를 제안하고 이를 검증한다. 또한, 제안된 멀티모달 최적화 기법 및 설계 절차에 따라 사다리꼴 역기전력 및 정현파 역기전력을 이용하는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기에 대한 최적 설계를 수행함으로써 제안된 설계 기법이 실제 공학적인 문제에 효율적으로 적용 가능함을 보인다.

제 5장에서는 본 연구에서 제안하는 최적화 기법 및 설계 절차에 따



라 설계된 사다리꼴 역기전력 및 정현파 역기전력을 이용하는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 시제품을 실제로 제작하여, 다양한 특성시험을 수행하고, 이를 통하여 제안된 설계 기법의 타당성과 유용성을 검증한다.

제 6장에서는 본 논문에서 제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 이용하여 유도탄 날개 구동장치에 발생한 공기역학적 간섭에 의한 공탄성 진동 현상을 효과적으로 억제하는 제어 기법을 제안하고, 그 시험 결과를 상세하게 기술한다.

제 7장에서는 본 논문의 결과와 향후 연구계획에 대하여 정리한다.

## 제 2 장 영구자석 속도검출기

영구자석 속도검출기(Tachogenerator)는 회전축의 회전운동에 따라 초소형의 발전기에서 출력되는 역기전압을 이용하여 회전속도 및 회전방향에 비례하는 전압을 생성하는 회전속도계이다. 영구자석 속도검출기의 종류에는 직류 영구자석 속도검출기, 교류 영구자석 속도검출기 및 브러시 없는 직류 영구자석 속도검출기가 있으며, 공작기계, 리프트, 로봇 등의 민수 분야 및 유도무기, 무인 항공기, 전차 등의 군수 분야를 포함하는 거의 모든 산업분야에서 다양하게 적용되고 있다.

직류 영구자석 속도검출기는 그림 2.1과 같이 초소형 직류 발전기를 이용하는 구조이며 현재까지 유도무기 구동장치에서 가장 널리 사용되고 있다. 직류 영구자석 속도검출기는 영구자석 속도검출기 중에서 가장 간단한 구조를 가지고 있어 소형화에 유리하며, 센서 구동을 위한 역기전압이 필요하지 않고, 속도에 비례하는 전압 출력을 빠르고 쉽게 얻을 수 있다. 하지만, 회전에 따라 역기전압을 스위칭하기 위하여 브러쉬 및 정류자를 가지게 되며, 이 때문에 브러쉬에 대한 유지보수가 필요하게 되고, 진동 및 충격 등과 같은 내환경성 측면에서 불리하다. 또한 브러쉬를 통한 기계적 접촉을 사용하기 때문에 고속 회전시 브러쉬 바운싱과 같은 현상이 발생할 수 있으며, 브러쉬와 정류자 사이에 불꽃이 발생할 가능성이 있어 폭발 환경에서 사용하기 힘든 단점을 가진다. 현재 군용으로 사용 가능한 해외 도입 직류 영구자석 속도검출기의 최대 운용속도는 약 5,000 [rpm] 정도이다.

교류 영구자석 속도검출기는 그림 2.2와 같이 초소형 교류 발전기를 이용하는 구조이며, 그 출력이 3상 브리지 전파정류 회로에 연결되어 사용된다. 일반적으로 비접촉식 센서이므로 내환경성이 좋고, 고속에서 사용이 가능하며, 유지보수가 필요 없지만, 여러개의 상역기전압을 전파정류하여 사용하기 때문에 속도 출력에 리플 성분을 포함하고 있으며, 회

전방향은 추가적인 보조기구를 이용하여 별도로 계측하게 된다. 아직까지 유도무기용 구동장치에 적용된 사례는 보고된 바가 없다.

브러시 없는 직류 영구자석 속도검출기는 그림 2.3과 같이 초소형 브러시 없는 직류 발전기를 이용하는 구조이며, 속도출력의 구현이 상대적으로 복잡하기 때문에 아직까지 널리 사용되고 있지는 않다. 교류 영구자석 속도검출기와 마찬가지로 비접촉식 센서이므로 내환경성 및 고속에서의 사용이 가능하고, 추가적인 유지보수가 필요 없지만, 회전에 따라 적절한 상역기전압을 선택하기 위하여 홀센서와 같은 회전축 위치 감지가 별도로 필요하게 되고, 회전축 위치 감지기 구동을 위한 여기전압이 필요하게 된다. 현재까지 유도무기용 구동장치에 적용된 사례는 보고된 바가 없다.

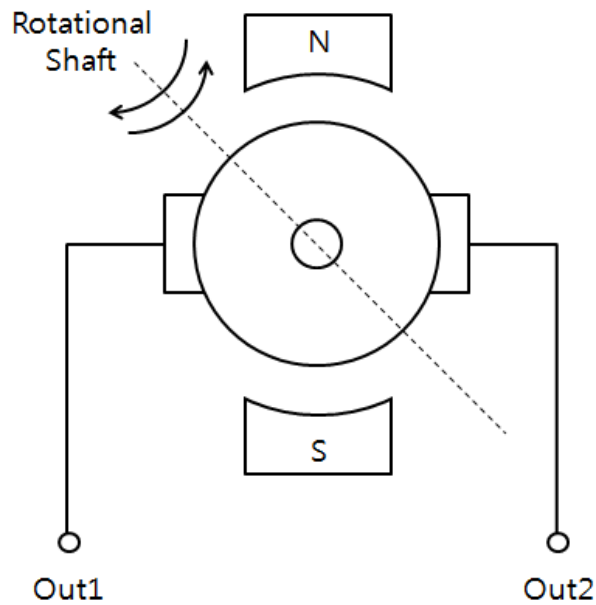


그림 2.1. 직류 영구자석 속도검출기

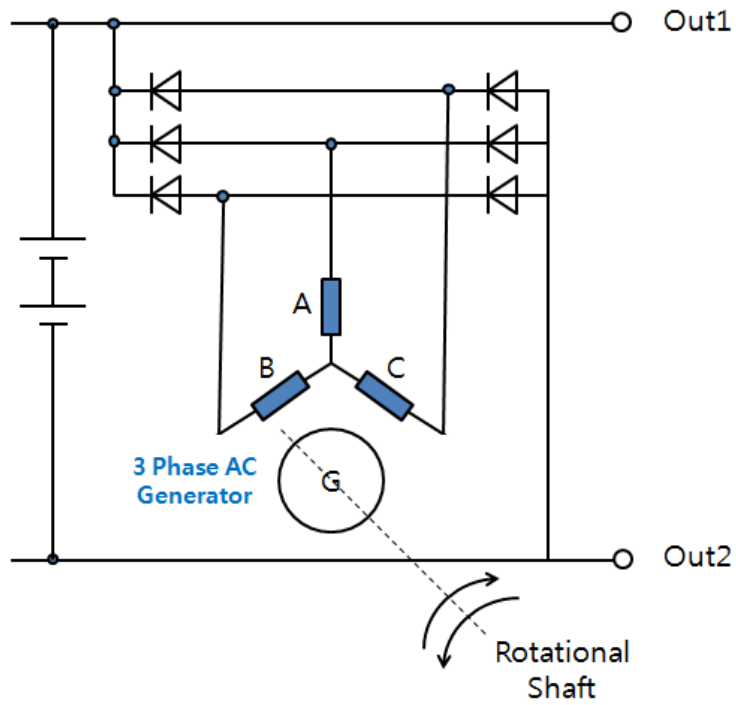


그림 2.2. 교류 영구자석 속도검출기

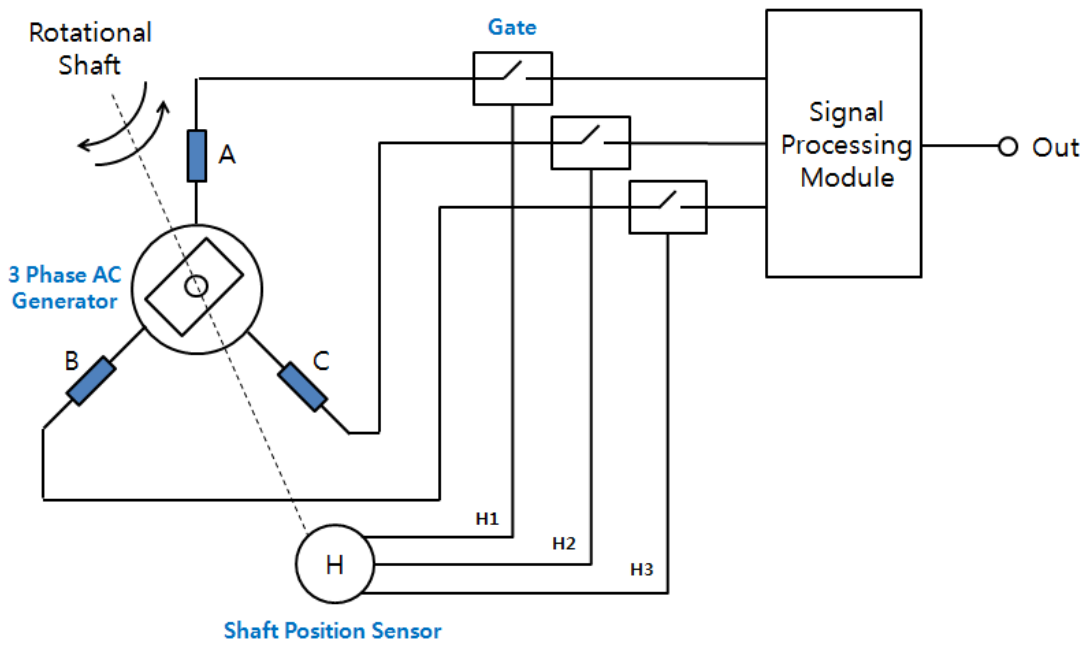


그림 2.3. 브러쉬 없는 직류 영구자석 속도검출기

## 제 3 장 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 설계 기법

본 장에서는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 구성하는 방법 및 이를 이용하여 회전속도 및 회전방향을 도출하는 기법에 대하여 제안한다. 제안하는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 크게 사다리꼴 역기전력을 이용하는 설계 기법 및 정현파 역기전력을 이용하는 설계 기법의 두가지로 나뉜다. 두가지 영구자석 속도검출기 모두 회전속도에 비례하여 발생하는 발전기의 역기전력을 이용하여 회전속도 및 회전방향을 생성하게 된다.

사다리꼴 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 브러쉬 없는 3상 사다리꼴 역기전압 발전기와 회전속도 및 회전방향 생성기로 구성된다. 사다리꼴 역기전압 발전기에서 생성된 3상의 역기전압을 기반으로, 회전각도에 따라 3상의 역기전압 중 회전속도 출력에 적합한 상을 선택하고, 이를 신호처리하여 회전속도 및 회전방향을 생성한다.

정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 브러쉬 없는 3상 정현파 역기전압 발전기와 회전속도 및 회전방향 생성기로 구성된다. 정현파 역기전압 발전기에서 생성된 3상의 역기전압을 기반으로 적절한 신호처리를 거쳐 회전속도 및 회전방향을 생성한다.

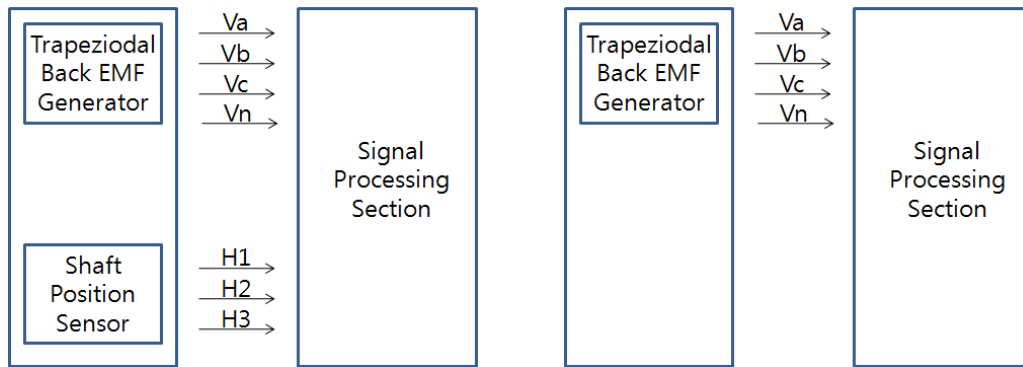
또한, 본 장에서는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 내고장성(Fault Tolerance)을 구현하는 방법에 대하여 제안한다. 사다리꼴 역기전력을 이용하는 영구자석 속도검출기 및 정현파 역기전력을 이용하는 영구자석 속도검출기는 운용 중 단선, 단락, 절연 파괴 및 분할 단락 등 여러가지 유형의 고장이 발생할 수 있다. 본 장에서는 이러한 여러가지 고장 유형 중에서 3상의 역기전압 중 1상이 단선에 의하여 고장이 발생하더라도 센서 자체적으로 이를 극복하는 방법에 대하여 제안한다.

### 3.1 사다리꼴 역기전력을 이용한 설계

본 절에서는 사다리꼴 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도 검출기에 대하여, 홀센서와 같은 회전축 위치 감지기를 사용하는 경우와 이를 사용하지 않는 경우로 나누어, 회전속도 및 회전방향을 생성할 수 있는 새로운 영구자석 속도검출기 설계 기법을 제안한다. 또한 발전기에서 생성된 3상의 사다리꼴 역기전압 중 1상이 단선에 의하여 고장이 발생한 경우 이를 센서 자체적으로 극복하는 내고장성(Fault Tolerance) 구현 방법을 도출하고 이를 기술한다.

#### 3.1.1 사다리꼴 역기전력을 이용한 속도출력 구현

앞서 설명한 바와 같이 제안된 사다리꼴 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기는 래치형 홀센서와 같은 회전축 위치 감지기를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우로 나누어 회전속도 및 회전방향을 출력하도록 설계되었다. 그림 3.1은 두가지 구현 방법의 구성상 차이점을 나타낸다.



(a) 회전축 위치 감지기 사용

(b) 회전축 위치 감지기 미사용

그림 3.1 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 구현 방식 비교

회전축 위치 감지기를 사용하는 경우에는 상전압의 계측 노이즈에 민감하지 않은 장점이 있지만, 위치 감지기를 구동하기 위한 여기전압이 별도로 필요하게 된다. 반면에 회전축 위치 감지기를 사용하지 않는 경우에는 별도의 위치 감지기 여기전압이 필요하지 않지만, 상전압 계측시 노이즈에 대한 추가적인 처리가 필요한 경우가 발생할 수 있다.

제안된 사다리꼴 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 브러쉬 없는 3상 사다리꼴 역기전압 발전기와 회전속도 및 회전방향 생성기로 구성된다.

### **3.1.1.1 사다리꼴 역기전압 발전기**

사다리꼴 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 역기전압이 이상적인 사다리꼴에 가깝게 생성되도록 제작하여야 속도출력의 오차를 최소화할 수 있게 된다. 따라서, 실제 형상을 고려한 정확한 전자기장 해석이 가능한 유한요소법 및 최적 설계기법을 이용하여 브러쉬 없는 사다리꼴 역기전압 발전기를 설계하였으며, 상세한 설계 내용은 4.3.1절에 기술하였다.

### **3.1.1.2 사다리꼴 역기전압용 회전속도 및 회전방향 생성기**

발전기에서 생성된 3상의 사다리꼴 역기전압을 기반으로 회전속도 및 회전방향을 생성한다.

#### **(가) 회전축 위치 감지기를 사용하는 경우**

먼저, 사다리꼴 역기전압 영구자석 속도검출기의 회전축 위치 감지기로 래치형 홀센서를 사용하여 회전속도 및 회전방향을 생성하는 방법을 제시한다[18]. 상세 개념도는 그림 3.2와 같다.

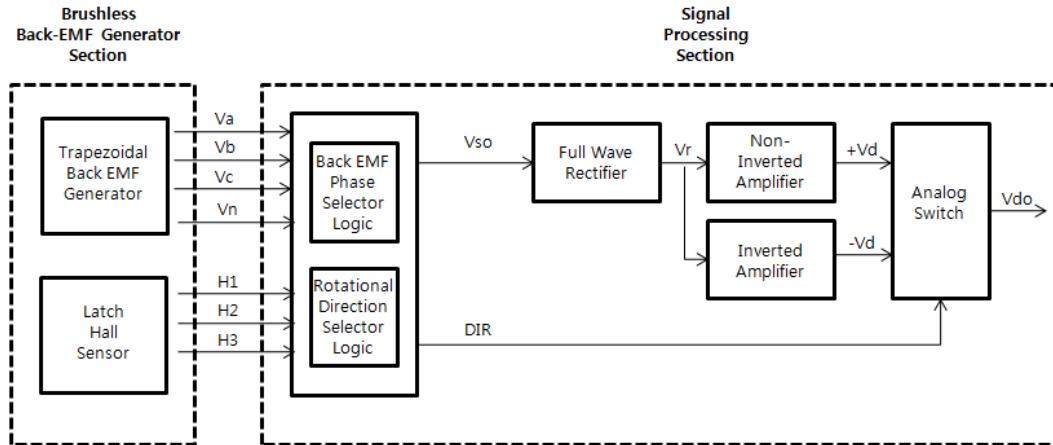


그림 3.2 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 상세 개념도  
(래치형 홀센서를 회전축 위치 감지기로 이용하는 경우)

그림 3.2의 역기전압 선택기에서는 120도 간격으로 구성된 3개의 래치형 홀센서 신호를 기반으로 표 3.1과 같이 회전축의 회전각도를 6개의 구간으로 나눈 후, 6개의 구간 각각에 대하여 해당 구간에서 선택될 상역기전압을 선정한다. 각각의 구간에서 선택된 상역기전압의 크기는 회전속도에 비례하여 변하게 된다.

그림 3.2의 회전방향 선택기에서는 영구자석 속도검출기 회전자의 회전방향을 결정한다. 회전방향은 앞서 구한 표 3.1의 상전압 선택 논리표와 3상의 역기전압을 기반으로 결정되며, 상세 회전방향 선정 논리표는 표 3.2 및 표 3.3과 같다. 표 3.2는 시계 방향(CW) 회전에 대한 논리표이며, 표 3.3은 반시계 방향(CCW) 회전에 대한 논리표이다. 제안된 논리표는 선택된 상의 최대 및 최소 구간을 이용하여 회전 방향을 결정하기 때문에 주변 노이즈에 대하여 안정적으로 동작할 수 있는 특성을 가진다. (그림 3.3 참조)

역기전압 선택기와 회전방향 선택기에서 출력된 역기전압 및 회전방향을 기반으로 그림 3.2에 나타낸 것과 같은 전파정류기, 비반전 증폭기, 반전 증폭기 및 아날로그 스위치로 구성된 신호처리기를 이용하여 사다리꼴 역기전압에 대한 연속적인 스위칭을 수행함으로써 회전속도에 비례



하는 직류 출력을 얻게 된다.

표 3.1 래치형 홀센서를 이용한 상역기전압 선택 논리표

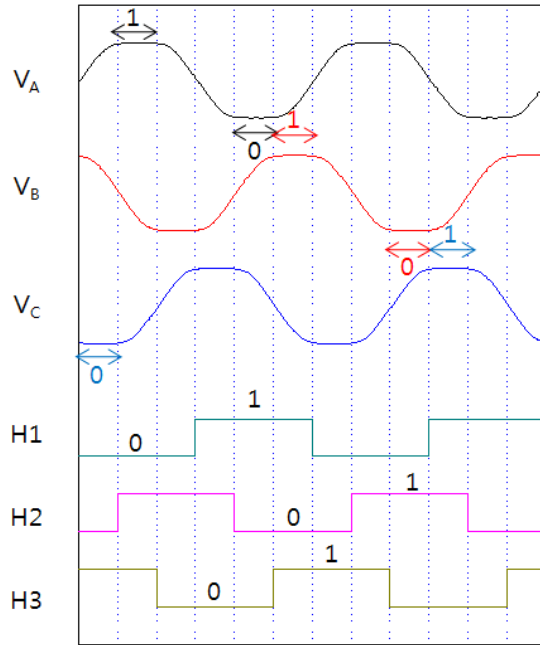
Hall Sensor 1	0	0	0	1	1	1
Hall Sensor 2	0	1	1	1	0	0
Hall Sensor 3	1	1	0	0	0	1
Phase Selection	$V_C$	$V_A$	$V_B$	$V_C$	$V_A$	$V_B$

표 3.2 래치형 홀센서를 이용한 회전방향 논리표 : 시계방향

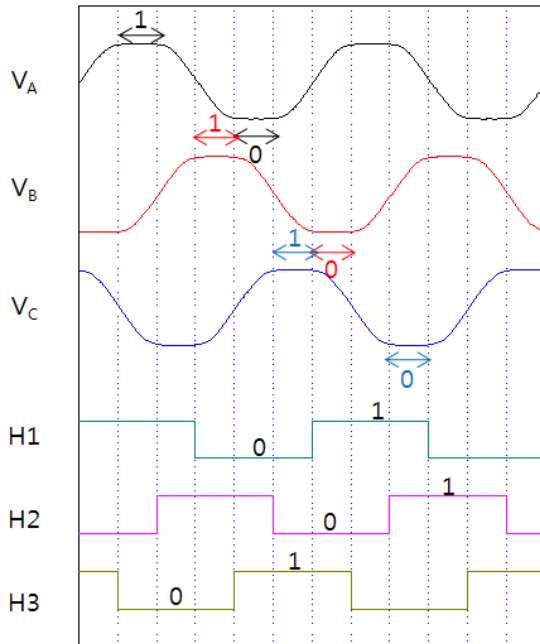
Hall Sensor 1	0	0	0	1	1	1
Hall Sensor 2	0	1	1	1	0	0
Hall Sensor 3	1	1	0	0	0	1
$V_A$	X	1	X	X	0	X
$V_B$	X	X	0	X	X	1
$V_C$	0	X	X	1	X	X
회전방향	CW	CW	CW	CW	CW	CW

표 3.3 래치형 홀센서를 이용한 회전방향 논리표 : 반시계방향

Hall Sensor 1	1	1	1	0	0	0
Hall Sensor 2	0	0	1	1	1	0
Hall Sensor 3	1	0	0	0	1	1
$V_A$	X	1	X	X	0	X
$V_B$	0	X	X	1	X	X
$V_C$	X	X	0	X	X	1
회전방향	CCW	CCW	CCW	CCW	CCW	CCW



(a) 시계방향



(b) 반시계방향

그림 3.3 래치형 홀센서를 이용한 회전방향 선정 방법

다음은, 사다리꼴 역기전압 영구자석 속도검출기의 회전축 위치 감지기로 선형 홀센서를 사용하여 회전속도 및 회전방향을 생성하는 방법을 제안한다. 상세 개념도는 그림 3.4와 같다.

래치형 홀센서의 출력파형과 선형 홀센서의 출력파형을 그림 3.5에 비교하여 나타내었다. 그림 3.5를 통하여 알 수 있는 바와 같이 래치형 홀센서를 이용하는 경우 60도 간격으로 이산적인 회전자 위치정보를 획득할 수 있는 반면, 선형 홀센서를 이용하는 경우 회전 전구간에 대하여 연속적인 회전자 위치정보를 획득하는 것이 가능하다. 따라서, 회전자 위치정보를 얻기 위하여 3개의 선형 홀센서를 120도 간격으로 배치하고, 이를 통해 획득된 3상의 정현파 신호를 그림 3.6과 같은 연산 증폭기로 구현된 비교기를 통하여 신호처리를 하게 되면, 래치형 홀센서와 동일한 회전자 위치정보 신호를 얻게 된다. 따라서 앞서 구현한 래치형 홀센서를 이용한 회전속도 및 회전방향 결정방법을 그대로 이용하되, 래치형 홀센서를 선형 홀센서와 비교기로 대체하면 회전하는 대상물의 회전속도를 계측할 수 있게 된다.

앞서 살펴본 바와 같이 회전축 위치 감지기로 120도 간격을 가지는 3개의 선형 홀센서를 사용하는 경우 선형 홀센서 출력신호가 3상의 대칭 정현파를 이루게 되어 내고장성의 구현이 가능한 장점을 가지게 된다. 상세한 내고장성 구현 방법은 3.1.2절에 기술한다.

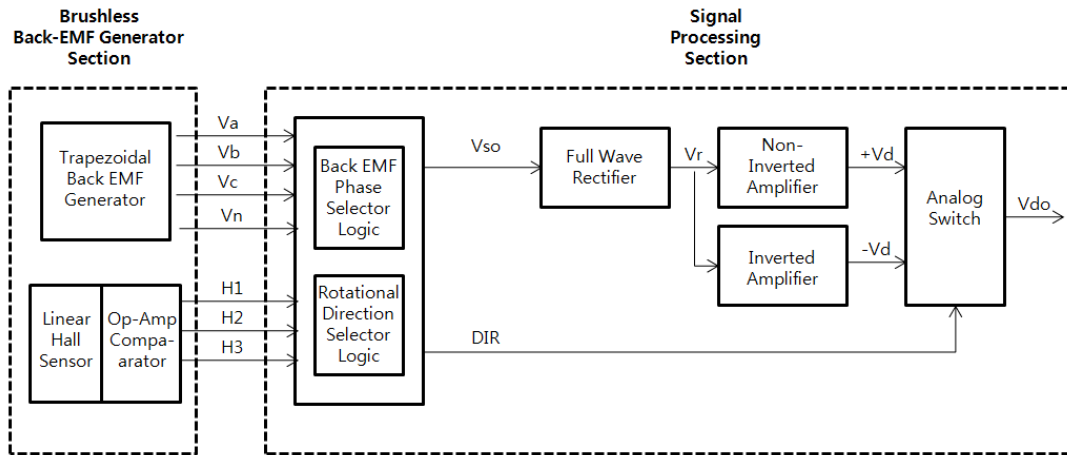


그림 3.4 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 상세 개념도  
(선형 홀센서를 회전축 위치 감지기로 이용하는 경우)

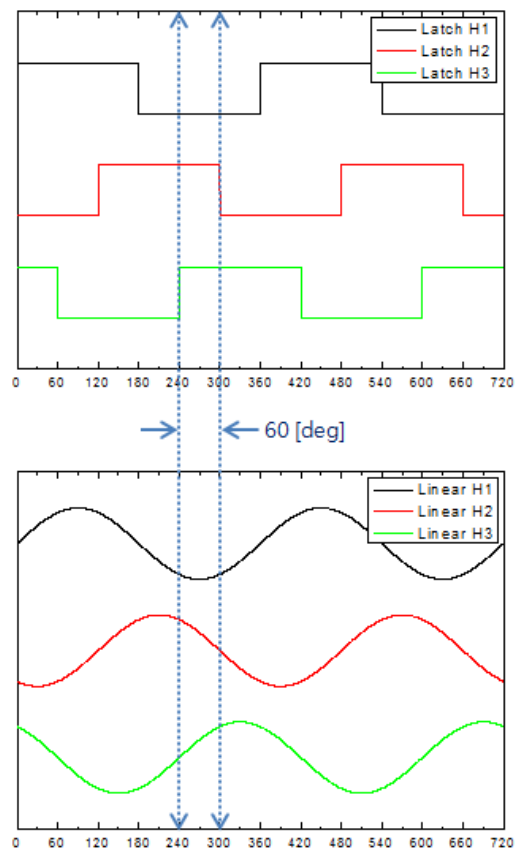


그림 3.5 래치형 및 선형 홀센서 출력파형 비교

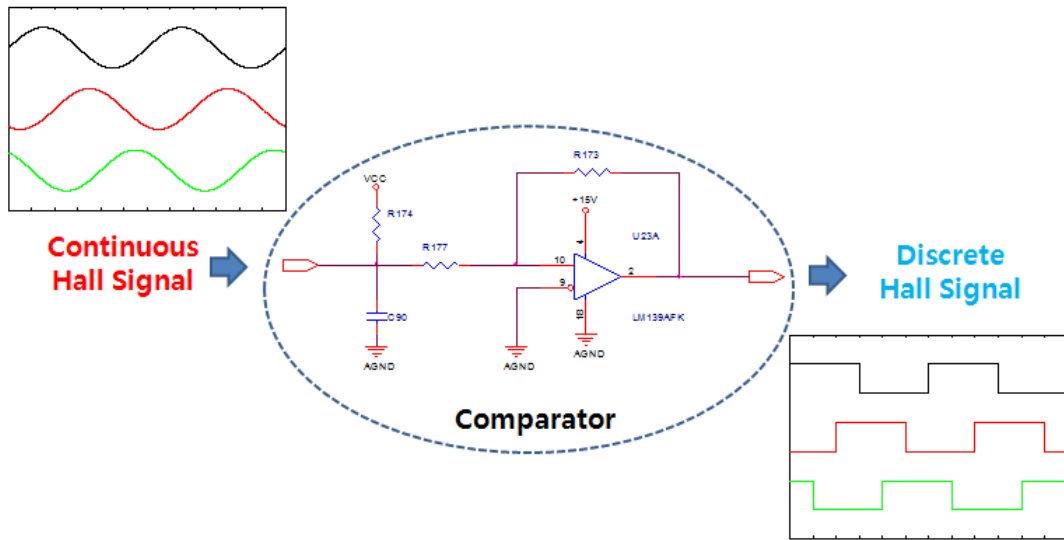


그림 3.6 선형 홀센서와 비교기를 이용한 신호처리

#### (나) 회전축 위치 감지기를 사용하지 않는 경우

다음은 래치형 홀센서와 같은 회전축 위치 감지기를 사용하지 않고 사다리꼴 역기전압만을 이용하여 회전속도 및 회전방향을 도출하는 방법에 대하여 살펴본다.

먼저 회전속도를 구하기 위하여 3상의 사다리꼴 역기전압 신호를 기반으로 표 3.4와 같이 회전축의 회전각도를 6개의 구간으로 나눈 후, 도출된 6개의 구간에 대하여 표 3.5의 논리표에 따라 해당 구간에 대한 상역기전압을 선택하고, 이의 절대값을 취하여 회전속도의 크기를 결정한다. 회전속도의 크기를  $VEL_{amp}$ 라 정의하고, 상기의 회전속도 도출 과정을 수식으로 표현하면 식 (3.1)과 같다.

$$VEL_{amp} = \max(abs(V_A), abs(V_B), abs(V_C)) \quad (3.1)$$

표 3.4 3상 역기전압 신호에 따른 6개 구간 선정 방법

$V_A$	$V_A \geq 0$	$V_A \geq 0$	$V_A \geq 0$	$V_A < 0$	$V_A < 0$	$V_A < 0$
$V_B$	$V_B \geq 0$	$V_B < 0$	$V_B < 0$	$V_B < 0$	$V_B \geq 0$	$V_B \geq 0$
$V_C$	$V_C < 0$	$V_C < 0$	$V_C \geq 0$	$V_C \geq 0$	$V_C \geq 0$	$V_C < 0$
구간	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6

표 3.5 상역기전압 선택 논리표

구간	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
선택 상	$V_C$	$V_A$	$V_B$	$V_C$	$V_A$	$V_B$

회전방향 결정 방법은 다음과 같다. 시험 시작 후 매 샘플링 시간마다 계측된 A상, B상 및 C상 역기전압  $V_A$ ,  $V_B$  및  $V_C$ 와 아래에 기술된 수식들을 이용하여 3상 사다리꼴 역기전압에 대한 회전각도  $\theta$ 를 계산한다.

A상, B상 및 C상 역기전압  $V_A$ ,  $V_B$  및  $V_C$ 는 다음과 같다.

$$V_A = V_m f_{trapez}(wt) \quad (3.2)$$

$$V_B = V_m f_{trapez}(wt - 120^\circ) \quad (3.3)$$

$$V_C = V_m f_{trapez}(wt - 240^\circ) \quad (3.4)$$

여기서  $V_m$ 은 사다리꼴 역기전압의 피크값이며,  $f_{trapez}$ 는 사다리꼴 형상 함수이다.

벡터 공간상에 A상, B상 및 C상 역기전압에 대응되는 3개의 단위 벡터를 120도 간격으로 정의하면 식 (3.5), 식 (3.6) 및 식 (3.7)과 같이 표현된다.

$$\bar{u}_A = [0 \quad 1] \quad (3.5)$$

$$\bar{u}_B = [-\cos(30^\circ) \quad -\sin(30^\circ)] \quad (3.6)$$

$$\bar{u}_C = [\cos(30^\circ) \quad -\sin(30^\circ)] \quad (3.7)$$

따라서, A상, B상 및 C상 역기전압에 대응되는 변형된 페이지 벡터  $\bar{p}_A$ ,  $\bar{p}_B$  및  $\bar{p}_C$ 는 다음과 같다. 변형된 페이지 벡터 도출과 관련된 내용은 3.2.1.2절에서 상세하게 기술한다.

$$\bar{p}_A = V_A \bar{u}_A \quad (3.8)$$

$$\bar{p}_B = V_B \bar{u}_B \quad (3.9)$$

$$\bar{p}_C = V_C \bar{u}_C \quad (3.10)$$

A상, B상 및 C상 페이지 벡터의 합을  $\bar{p}_{ABC}$ 라 하면  $\bar{p}_{ABC}$ 의 위상은 식 (3.12)와 같이 표현되며, 이는 회전각도  $\theta$ 에 대응된다.

$$\bar{p}_{ABC} = \bar{p}_A + \bar{p}_B + \bar{p}_C \quad (3.11)$$

$$\angle \bar{p}_{ABC} = \angle (\bar{p}_A + \bar{p}_B + \bar{p}_C) \quad (3.12)$$

$$\theta = \angle \bar{p}_{ABC} \quad (3.13)$$

위의 식 (3.12)와 식 (3.13)을 이용하여 계산된 회전각도  $\theta$ 는 그림 3.7과 같은 모양으로 나타나게 된다. 그림 3.7에서 알 수 있듯이  $\theta$ 의 기울기가 회전방향과 비례함을 알 수 있다. 현재 단계의 회전각도를  $\theta_n$ 이라 하고, 이전 단계의 회전각도를  $\theta_{n-1}$ 이라 하면 회전방향  $VEL_{dir}$ 은 다음과 같이 도출된다.

$$\theta_{del} = \theta_n - \theta_{n-1} \quad (3.14)$$

$$VEL_{dir} = sign(\theta_{del}) \quad (3.15)$$

좀 더 명확하게 회전방향을 결정하기 위해서는 구해진 현재 단계의 회전각도  $\theta_n$ 과 이전 단계의 회전각도  $\theta_{n-1}$ 의 증감량  $\theta_{del}$ 에 대하여 저역 통과필터를 적용한 후, 그 값에 대한 부호가 양인지 음인지를 판단하고, 이를 통하여 회전방향이 시계방향(CW)인지, 반시계방향(CCW)인지를 결정한다.

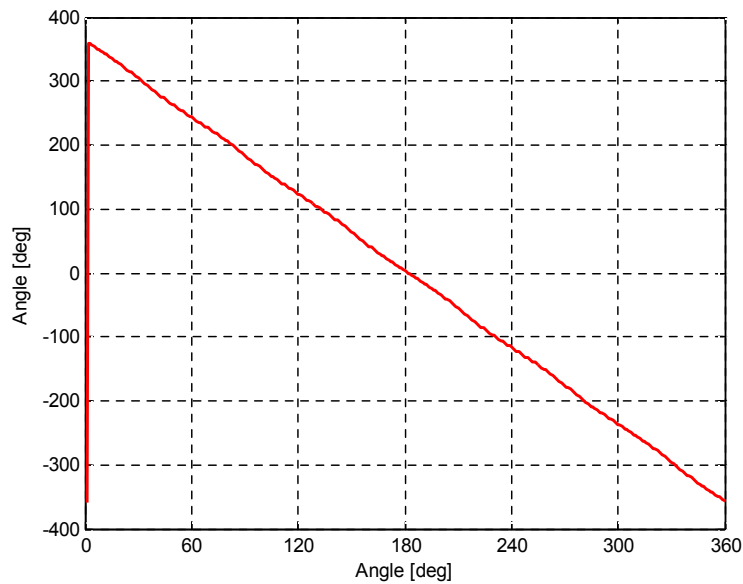


그림 3.7 3상 사다리꼴 역기전압에 대한 회전각도 계산 파형

### 3.1.2 사다리꼴 역기전력 이용 속도검출기 내고장성 구현

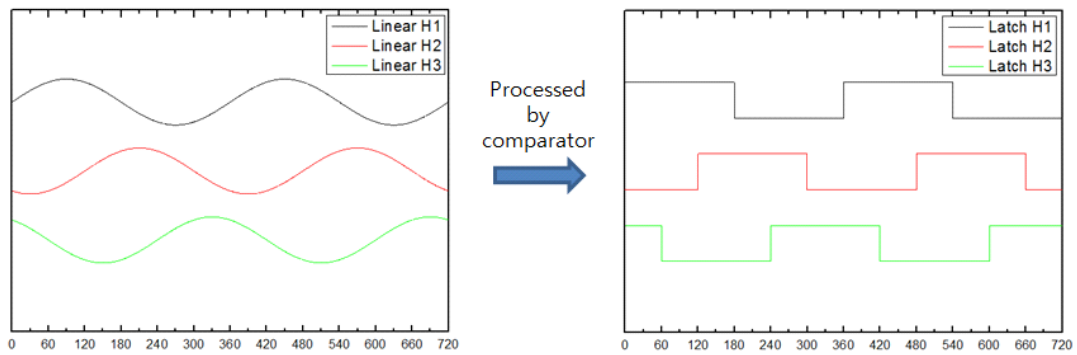
#### (가) 회전축 위치 감지기를 사용하는 경우

앞서 3.1.1.2절에서 살펴본 바와 같이 회전축 위치 감지기로 120도 간격을 가지는 3개의 선형 홀센서를 사용하는 경우 선형 홀센서 출력신호가 3상의 대칭 정현파를 이루게 된다. 따라서, 식 (3.16)과 같이 3상 선형

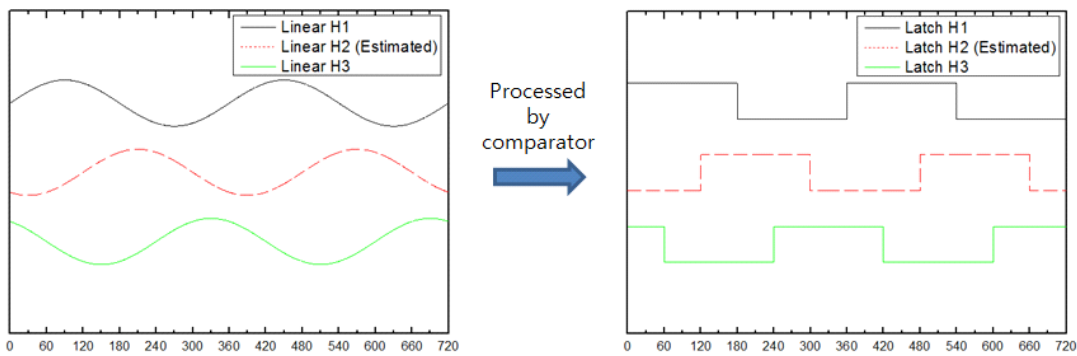


홀센서 출력신호의 순시합이 0인 특성을 이용하게 되면 1상이 단선에 의하여 고장이 발생한 경우 나머지 2상의 신호만으로 고장이 발생한 1상의 신호에 대한 유추가 가능하기 때문에 그림 3.8과 같이 사다리꼴 역기전압 영구자석 속도검출기의 회전축 위치 감지기에 대한 내고장성을 확보할 수 있게 된다.

$$\text{Linear H1} + \text{Linear H2} + \text{Linear H3} = 0 \quad (3.16)$$



(a) 3상 선형 홀센서 신호 계측이 정상인 경우



(b) 3상 선형 홀센서 신호 중 H2 신호에 고장이 발생한 경우

그림 3.8 선형 홀센서 신호에 대한 내고장성 구현

### (나) 회전축 위치 감지기를 사용하지 않는 경우

본 절에서는 회전축 위치 감지기를 사용하지 않는 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 운용 중 1상의 역기전압이 단선에 의한 고장이 발생한 경우, 센서 자체적으로 이를 극복하는 방법을 제안한다. A상, B상 및 C상의 3상 역기전압 중 C상이 단선된 경우를 가정하여 서술한다.

먼저, 사전시험을 통하여 A상, B상 및 C상 사다리꼴 역기전압을 측정하고, 이를 최대값이 1이 되도록 정규화한  $V_{A\_norm}$ ,  $V_{B\_norm}$  및  $V_{C\_norm}$ 을 구한 뒤, 회전각도에 대한 Look-up Table을 각각 작성한다. 또한, 추후 회전속도의 크기 결정을 위하여  $V_{A\_norm}$  및  $V_{B\_norm}$ 을 이용하여 정규화된 B/A 신호  $(B/A)_{norm}$  및 정규화된 A/B 신호  $(A/B)_{norm}$ 을 식 (3.17) 및 식 (3.18)과 같이 구한 후, 회전각도에 대한 Look-up Table을 각각 작성한다.

$$(B/A)_{norm} = V_{B\_norm} / V_{A\_norm}, \quad 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \quad (3.17)$$

$$(A/B)_{norm} = V_{A\_norm} / V_{B\_norm}, \quad 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \quad (3.18)$$

고장난 C상 역기전압을 제외하고 A상과 B상 역기전압만으로 회전속도의 크기 출력을 얻는 방법은 다음과 같다.

먼저 그림 3.9와 같이  $abs(V_A - V_B)$  및  $\max(abs(V_A), abs(V_B))$  수식을 이용하여 회전속도 계산 영역을 구간 1과 구간 2로 나누고, 다시 구간 2는 그림 3.10과 같이  $abs(V_A)$  및  $abs(V_B)$  수식을 이용하여 구간 2-1 및 구간 2-2의 두 구간으로 세분한다.

$$\text{구간 1} : abs(V_A - V_B) > \max(abs(V_A), abs(V_B)) \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \text{구간 2-1} : abs(V_A - V_B) \leq \max(abs(V_A), abs(V_B)) \\ \text{and } abs(V_A) > abs(V_B) \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \text{구간 2-2} : abs(V_A - V_B) \leq \max(abs(V_A), abs(V_B)) \\ \text{and } abs(V_A) \leq abs(V_B) \end{aligned} \quad (3.21)$$

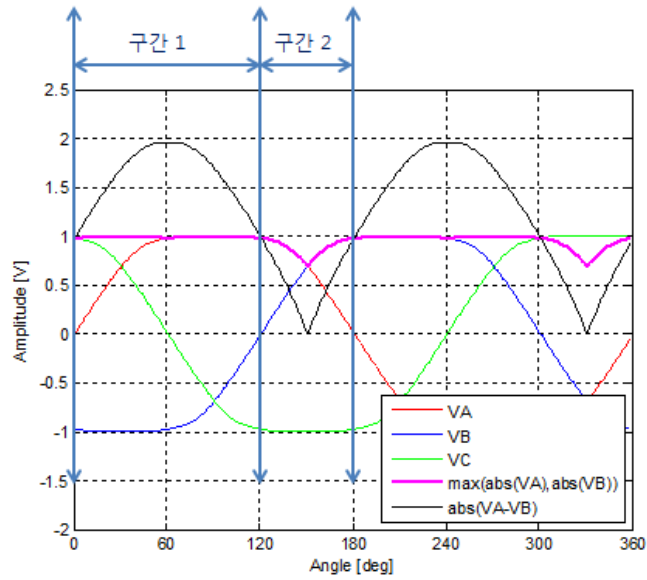


그림 3.9 회전속도 계산 영역 (구간 1 및 구간 2 판별 방법)

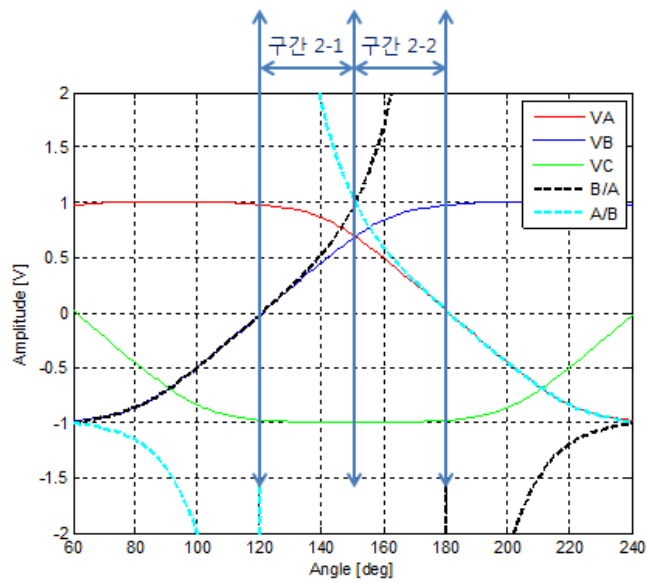


그림 3.10 회전속도 계산 영역 (구간 2-1 및 구간 2-2 판별 방법)

구간 1은 A상 및 B상 역기전압이 최대값을 가지는 구간이므로, 식 (3.22)와 같이 이 두 역기전압 절대값의 최대치를 회전속도의 크기로 취한다.

$$VEL_{amp} = \max(\text{abs}(V_A), \text{abs}(V_B)) \subset Region1 \quad (3.22)$$

구간 2에서는 먼저 입력된 A상 및 B상 역기전압 신호의 비율을 식 (3.23) 및 식 (3.24)와 같이 계산한다.

$$(B/A) = V_B / V_A \quad (3.23)$$

$$(A/B) = V_A / V_B \quad (3.24)$$

구간 2-1에서는 앞서 식 (3.23)에서 구한  $(B/A)$  비율 신호와 Look-up Table에 저장된  $(B/A)_{norm}$  비율 신호를 이용하여 식 (3.25)와 같이 최소 자승오차를 가지는 회전각도의 추정치  $\theta_{estimate}$ 를 계산한다.

$$\theta_{estimate} = \min((B/A)_{norm}(i) - (B/A))^2, \quad 0 \leq i \leq 360 \quad (3.25)$$

추정된 위치각  $\theta_{estimate}$ 에 해당되는 정규화된 비율 신호와 입력된 역기전압간의 비율 신호를 통해 식 (3.26)과 같이 진폭의 추정치를 계산한다.

$$ratio = V_A / V_{A\_norm}(\theta_{estimate}) \quad (3.26)$$

식 (3.26)에서 구한 진폭의 추정치  $ratio$ 와 Look-up Table에 저장된 정규화된 C상 역기전압을 이용하여 고장이 발생한 C상의 역기전압을 식 (3.27)과 같이 추정할 수 있으며, 이 값이 구간 2-1의 회전속도의 크기이다.

$$V_{C\_estimate} = ratio \cdot V_{C\_norm}(\theta_{estimate}) \quad (3.27)$$

$$VEL_{amp} = V_{C\_estimate} \subset Region\ 2-1 \quad (3.28)$$

구간 2-2에서는 앞서 식 (3.24)에서 구한  $(A/B)$  비율 신호와 Look-up Table에 저장된  $(A/B)_{norm}$  비율 신호를 이용하여 식 (3.29)와 같이 최소 자승오차를 가지는 회전각도의 추정치  $\theta_{estimate}$  를 계산한다.

$$\theta_{estimate} = \min((A/B)_{norm}(i) - (A/B))^2, \quad 0 \leq i \leq 360 \quad (3.29)$$

추정된 위치각  $\theta_{estimate}$  에 해당되는 정규화된 비율 신호와 입력된 역기전압간의 비율 신호를 통해 식 (3.30)과 같이 진폭의 추정치를 계산한다.

$$ratio = V_B / V_{B\_norm}(\theta_{estimate}) \quad (3.30)$$

식 (3.30)에서 구한 진폭의 추정치  $ratio$ 와 Look-up Table에 저장된 정규화된 C상 역기전압을 이용하여 고장이 발생한 C상의 역기전압을 식 (3.31)과 같이 추정할 수 있으며, 이 값이 구간 2-2의 회전속도의 크기이다.

$$V_{C\_estimate} = ratio \cdot V_{C\_norm}(\theta_{estimate}) \quad (3.31)$$

$$VEL_{amp} = V_{C\_estimate} \subset Region\ 2-2 \quad (3.32)$$

상기의 과정을 통하여 구해진 C상 고장시 A상과 B상으로 구현된 회전속도 크기의 추정값은 그림 3.11과 같다.

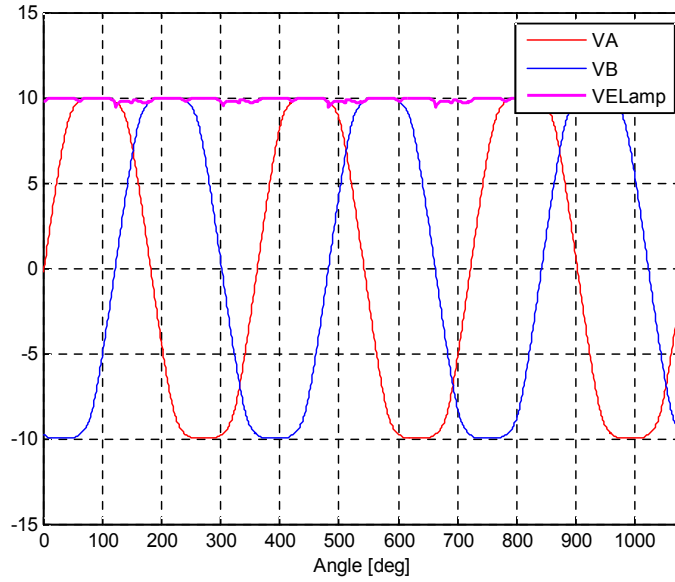


그림 3.11 C상 고장시 A상과 B상으로 구현한 회전속도의 크기

회전방향 결정 방법은 다음과 같다. 시험 시작 후 매 샘플링 시간마다 계측된 A상 및 B상 역기전압  $V_A$  및  $V_B$ 와 아래에 기술된 수식들을 이용하여 2상 사다리꼴 역기전압에 대한 회전각도  $\theta$ 를 계산한다.

A상 및 B상 역기전압  $V_A$  및  $V_B$ 는 다음과 같다.

$$V_A = V_m f_{trapez}(\omega t) \quad (3.33)$$

$$V_B = V_m f_{trapez}(\omega t - 120^\circ) \quad (3.34)$$

여기서  $V_m$ 은 사다리꼴 역기전압의 피크값이며,  $f_{trapez}$ 는 사다리꼴 형상 함수이다.

벡터 공간상에 A상 및 B상 역기전압에 대응되는 2개의 단위 벡터를 정의하면 식 (3.35) 및 식 (3.36)과 같이 표현된다.

$$\bar{u}_A = [0 \quad 1] \quad (3.35)$$

$$\bar{u}_B = [\cos(30^\circ) \sin(30^\circ)] \quad (3.36)$$

따라서, A상 및 B상 역기전압에 대응되는 변형된 페이지 벡터  $\bar{p}_A$  및  $\bar{p}_B$ 는 다음과 같다. 변형된 페이지 벡터 도출과 관련된 내용은 3.2.1.2절에서 상세하게 기술한다.

$$\bar{p}_A = V_A \bar{u}_A \quad (3.37)$$

$$\bar{p}_B = V_B \bar{u}_B \quad (3.38)$$

A상 및 B상 페이지 벡터의 합을  $\bar{p}_{AB}$ 라 하면  $\bar{p}_{AB}$ 의 위상은 식 (3.40)과 같이 표현되며, 이는 회전각도  $\theta$ 에 대응된다.

$$\bar{p}_{AB} = \bar{p}_A + \bar{p}_B \quad (3.39)$$

$$\angle \bar{p}_{AB} = \angle (\bar{p}_A + \bar{p}_B) \quad (3.40)$$

$$\theta = \angle \bar{p}_{AB} \quad (3.41)$$

위의 식 (3.40)과 식 (3.41)을 이용하여 계산된 회전각도  $\theta$ 는 그림 3.12와 같은 모양으로 나타나게 된다. 그림 3.12에서 알 수 있듯이  $\theta$ 의 기울기가 회전방향과 비례함을 알 수 있다. 현재 단계의 회전각도를  $\theta_n$ 이라 하고, 이전 단계의 회전각도를  $\theta_{n-1}$ 이라 하면 회전방향  $VEL_{dir}$ 은 다음과 같이 도출된다.

$$\theta_{del} = \theta_n - \theta_{n-1} \quad (3.42)$$

$$VEL_{dir} = sign(\theta_{del}) \quad (3.43)$$

좀 더 명확하게 회전방향을 결정하기 위해서는 구해진 현재 단계의

회전각도  $\theta_n$ 과 이전 단계의 회전각도  $\theta_{n-1}$ 의 증감량  $\theta_{del}$ 에 대하여 저역 통과필터를 적용한 후, 그 값에 대한 부호가 양인지 음인지를 판단하고, 이를 통하여 회전방향이 시계방향(CW)인지, 반시계방향(CCW)인지를 결정한다.

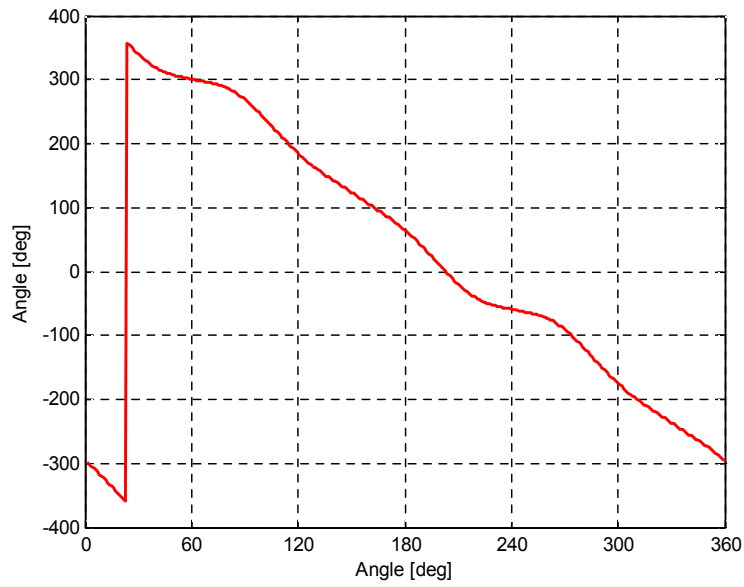


그림 3.12 C상 고장시 A상과 B상으로 구현한 회전각도 계산 파형



## 3.2 정현파 역기전력을 이용한 설계

본 절에서는 정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 구성하는 방법과 회전속도 및 회전방향을 생성하는 방법을 제안한다. 또한 발전기에서 생성된 3상의 역기전압 중 1상이 단선에 의하여 고장이 발생한 경우 이를 센서 자체적으로 극복하는 내고장성(Fault Tolerance) 구현 방법을 도출하고 이를 기술한다. 아울러, 발전기에서 생성된 정현파 역기전력이 이상적인 정현파에서 벗어나 왜곡이 있는 경우에 대처하는 방법에 대하여도 기술한다.

### 3.2.1 정현파 역기전력을 이용한 속도출력 구현

제안된 정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 브러쉬 없는 3상 정현파 역기전압 발전기와 회전속도 및 회전방향 생성기로 구성되며, 상세 개념도는 그림 3.13과 같다.

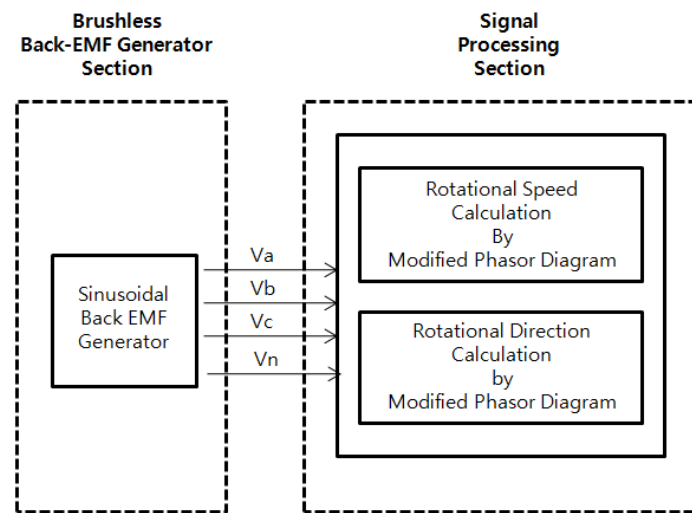


그림 3.13 정현파 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기 상세 개념도

### 3.2.1.1 정현파 역기전압 발전기

정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 역기전압이 이상적인 정현파에 가깝게 생성되도록 제작하여야 속도출력의 오차를 최소화할 수 있게 된다. 따라서, 실제 형상을 고려한 정확한 전자기장 해석이 가능한 유한요소법 및 최적 설계기법을 이용하여 브러쉬 없는 정현파 역기전압 발전기를 설계하였으며, 상세한 설계 내용은 4.3.2절에 기술하였다.

### 3.2.1.2 정현파 역기전압용 회전속도 및 회전방향 생성기

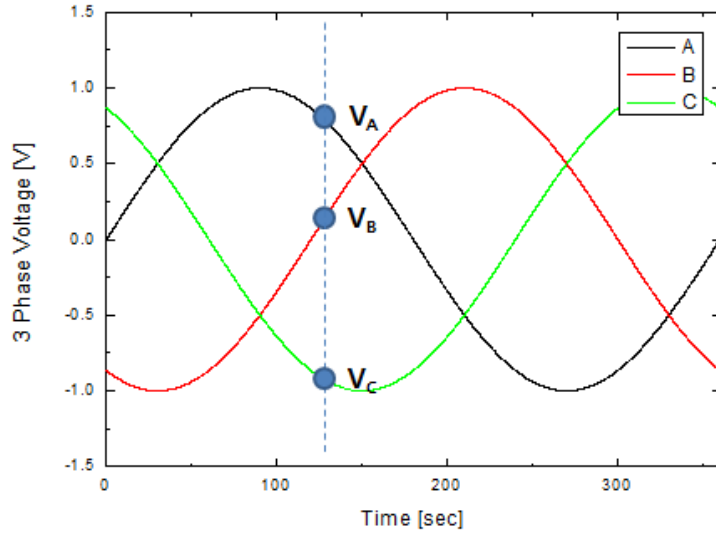
본 절에서는 발전기에서 생성된 3상의 정현파 역기전압을 기반으로 회전속도 및 회전방향을 생성하는 새로운 기법을 제안한다[19].

먼저, 회전속도를 생성하는 방법은 다음과 같다. 일반적으로 교류 정현파의 페이저는 정현파의 최대치와 크기가 같은 선분이 정현파의 위상에 따라 원점을 중심으로 회전하는 형식을 가진다. 이 일반적인 페이저를 변형하여 그림 3.14와 같이 3상의 정현파 역기전압이  $120^\circ$  간격을 유지하며 고정축을 이루고, 매순간 계측되어진 3상 역기전압 각각의 크기를 이 고정축에 대응시켜 주면, 3상 정현파의 최대치에 해당하는 선분이 원점을 중심으로 회전하는 변형된 페이저를 얻게 된다. 3상 정현파의 최대값을  $V_m$ 이라 하면 A상, B상 및 C상 역기전압  $V_A$ ,  $V_B$  및  $V_C$ 는 다음과 같이 표현된다.

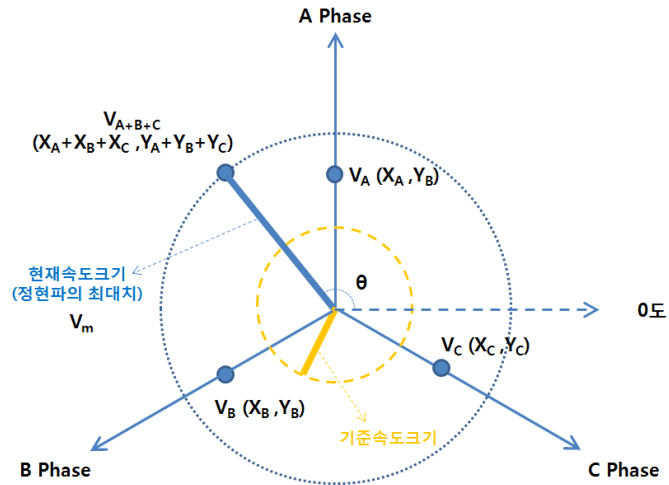
$$V_A = V_m \sin(\omega t) \quad (3.44)$$

$$V_B = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (3.45)$$

$$V_C = V_m \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (3.46)$$



(a) 3상 정현파 역기전압



(b) 회전속도 결정법

그림 3.14 3상 정현파 역기전압을 이용한 변형된 페이지도

벡터 공간상에 A상, B상 및 C상 역기전압에 대응되는 3개의 단위 벡터를 120도 간격으로 정의하면 식 (3.47), 식 (3.48) 및 식 (3.49)와 같이 표현된다.

$$\bar{u}_A = [0 \quad 1] \quad (3.47)$$

$$\bar{u}_B = [-\cos(30^\circ) \quad -\sin(30^\circ)] \quad (3.48)$$

$$\bar{u}_C = [\cos(30^\circ) \quad -\sin(30^\circ)] \quad (3.49)$$

따라서, A상, B상 및 C상 역기전압에 대응되는 변형된 페이저 벡터  $\bar{p}_A$ ,  $\bar{p}_B$  및  $\bar{p}_C$ 는 다음과 같다.

$$\bar{p}_A = V_A \bar{u}_A \quad (3.50)$$

$$\bar{p}_B = V_B \bar{u}_B \quad (3.51)$$

$$\bar{p}_C = V_C \bar{u}_C \quad (3.52)$$

A상, B상 및 C상 페이저 벡터의 합을  $\bar{p}_{ABC}$ 라 하면  $\bar{p}_{ABC}$ 의 크기는 회전속도의 크기에 비례하여 증가 또는 감소하게 되므로 이를 회전속도의 지표로 삼는다. 따라서,  $\bar{p}_{ABC}$ 의 크기는 회전속도의 크기  $VEL_{amp}$ 에 대응됨을 알 수 있다.

$$\bar{p}_{ABC} = \bar{p}_A + \bar{p}_B + \bar{p}_C \quad (3.53)$$

$$VEL_{amp} = \|\bar{p}_{ABC}\| = \|(\bar{p}_A + \bar{p}_B + \bar{p}_C)\| \quad (3.54)$$

회전방향을 결정하는 방법은 다음과 같다. A상, B상 및 C상 페이저 벡터의 합  $\bar{p}_{ABC}$ 의 위상은 식 (3.55)와 같이 표현되며, 이는 회전각도  $\theta$ 에 대응된다.

$$\angle \bar{p}_{ABC} = \angle (\bar{p}_A + \bar{p}_B + \bar{p}_C) \quad (3.55)$$

$$\theta = \angle \bar{p}_{ABC} \quad (3.56)$$

위의 식 (3.55)와 식 (3.56)을 이용하여 계산된 회전각도  $\theta$ 는 그림 3.15와 같은 모양으로 나타나게 된다. 그림 3.15에서 알 수 있듯이  $\theta$ 의 기울기가 회전방향과 비례함을 알 수 있다. 현재 단계의 회전각도를  $\theta_n$ 이라 하고, 이전 단계의 회전각도를  $\theta_{n-1}$ 이라 하면 회전방향  $VEL_{dir}$ 은 다음과 같이 도출되며, 이를 도식적으로 나타내면 그림 3.16과 같다.

$$\theta_{del} = \theta_n - \theta_{n-1} \quad (3.57)$$

$$VEL_{dir} = sign(\theta_{del}) \quad (3.58)$$

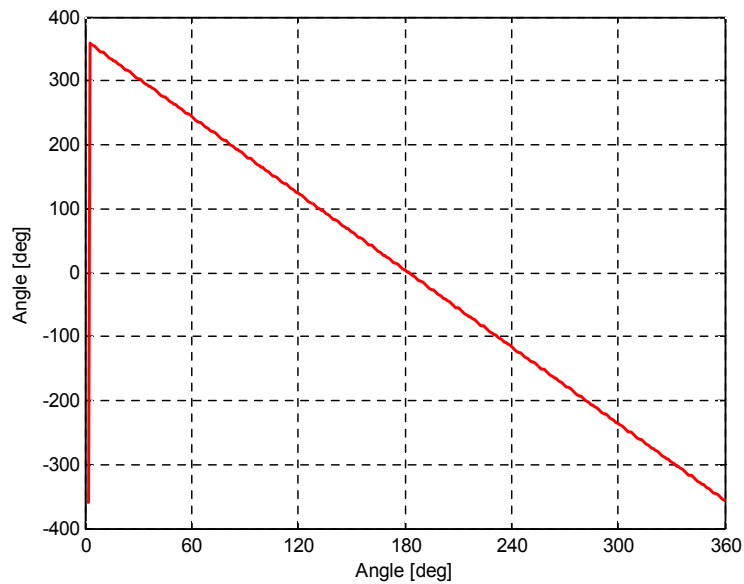


그림 3.15 3상 정현파 역기전압에 대한 회전각도 계산 파형

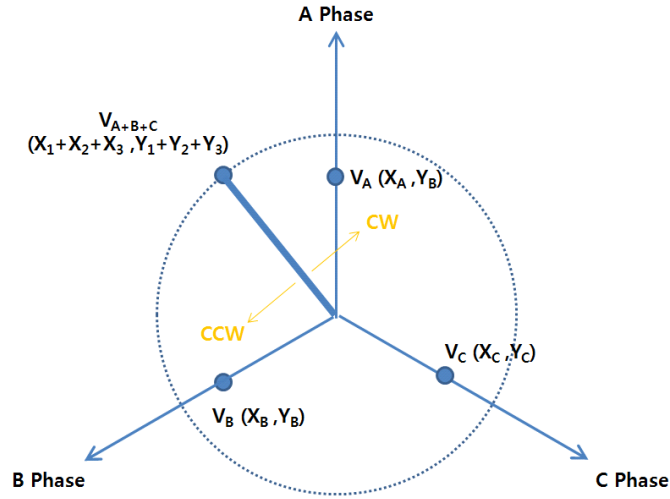


그림 3.16 회전방향 결정법

### 3.2.2 정현파 역기전력 이용 속도검출기 내고장성 구현

#### 3.2.2.1 3상 정현파 역기전력의 순시합이 0임을 이용하는 경우

정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 역기전력 신호는 3상의 순시합이 0이 된다. 따라서 이 관계를 이용하면 2상의 역기전압만으로 나머지 1상의 역기전압을 유추하는 것이 가능하므로, 속도 검출기 운용 중 1상의 역기전압이 단선에 의한 고장으로 계측이 불가능하더라도 센서 자체적으로 이를 극복하는 것이 가능하다.

$$V_A + V_B + V_C = 0 \quad (3.59)$$

그림 3.17은 정현파 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기 운용 중 B상의 역기전압 계측이 불가능해진 경우 나머지 A상 및 C상 역기전압으로 B상을 복구하는 절차에 대한 시뮬레이션 결과이다.

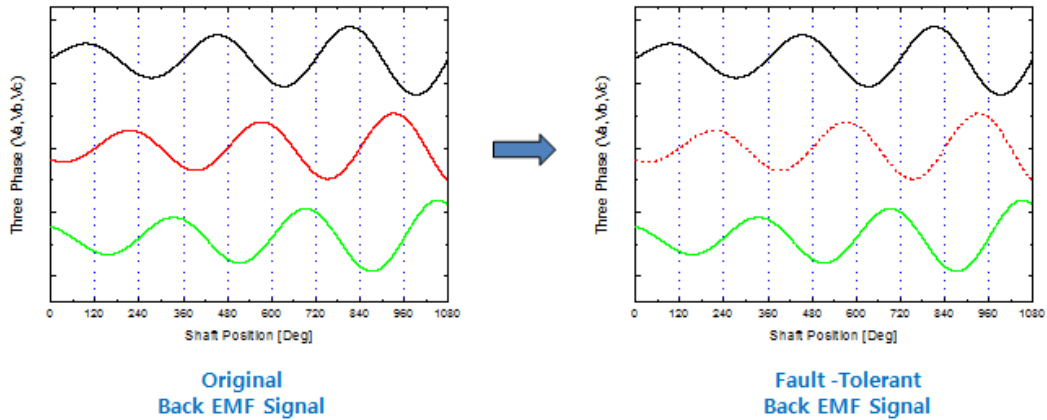


그림 3.17 B상 고장시 A상과 C상으로 구현한 B상 추정치  
(3상 정현파 역기전압의 순시합이 0임을 이용한 경우)

### 3.2.2.2 2상 정현파 역기전력의 페이저 벡터를 이용하는 경우

본 절에서는 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 운용 중 1상의 역기전압이 단선에 의한 고장이 발생한 경우, 나머지 2상의 정현파 역기전력 페이저 벡터를 이용하여 내고장성을 확보하는 방법에 대하여 기술한다. A상, B상 및 C상의 3상 역기전압 중 C상이 단선된 경우를 가정하여 서술한다.

먼저 회전속도를 결정 방법은 다음과 같다.  $V_m$ 을 정현파 역기전압의 피크값이라 정의하면 A상 및 B상 역기전압  $V_A$  및  $V_B$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$V_A = V_m \sin(\omega t) \quad (3.60)$$

$$V_B = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (3.61)$$

벡터 공간상에 A상 및 B상 역기전압에 대응되는 2개의 단위 벡터를 정의하면 식 (3.62) 및 식 (3.63)과 같이 표현된다.

$$\bar{u}_A = [0 \quad 1] \quad (3.62)$$

$$\bar{u}_B = [\cos(30^\circ) \quad \sin(30^\circ)] \quad (3.63)$$

따라서, A상 및 B상 역기전압에 대응되는 변형된 페이지 벡터  $\bar{p}_A$  및  $\bar{p}_B$ 는 다음과 같다.

$$\bar{p}_A = V_A \bar{u}_A \quad (3.64)$$

$$\bar{p}_B = V_B \bar{u}_B \quad (3.65)$$

A상 및 B상 페이지 벡터의 합을  $\bar{p}_{AB}$ 라 하면  $\bar{p}_{AB}$ 의 크기는 회전속도의 크기에 비례하여 증가 혹은 감소하게 되므로 이를 회전속도의 지표로 삼는다. 따라서  $\bar{p}_{AB}$ 의 크기는 회전속도의 크기  $VEL_{amp}$ 에 대응됨을 알 수 있다.

$$\bar{p}_{AB} = \bar{p}_A + \bar{p}_B \quad (3.66)$$

$$VEL_{amp} = \|\bar{p}_{AB}\| = \|\bar{p}_A + \bar{p}_B\| \quad (3.67)$$

회전방향을 결정하는 방법은 다음과 같다. A상 및 B상 페이지 벡터의 합  $\bar{p}_{AB}$ 의 위상은 식 (3.67)과 같이 표현되며, 이는 회전각도  $\theta$ 에 대응된다.

$$\angle \bar{p}_{AB} = \angle (\bar{p}_A + \bar{p}_B) \quad (3.67)$$

$$\theta = \angle \bar{p}_{AB} \quad (3.68)$$

위의 식 (3.67)과 식 (3.68)을 이용하여 계산된 회전각도  $\theta$ 는 그림 3.18



과 같은 모양으로 나타나게 된다. 그림 3.18에서 알 수 있듯이  $\theta$ 의 기울기가 회전방향과 비례함을 알 수 있다. 현재 단계의 회전각도를  $\theta_n$ 이라 하고, 이전 단계의 회전각도를  $\theta_{n-1}$ 이라 하면 회전방향  $VEL_{dir}$ 은 다음과 같이 도출된다.

$$\theta_{del} = \theta_n - \theta_{n-1} \quad (3.69)$$

$$VEL_{dir} = sign(\theta_{del}) \quad (3.70)$$

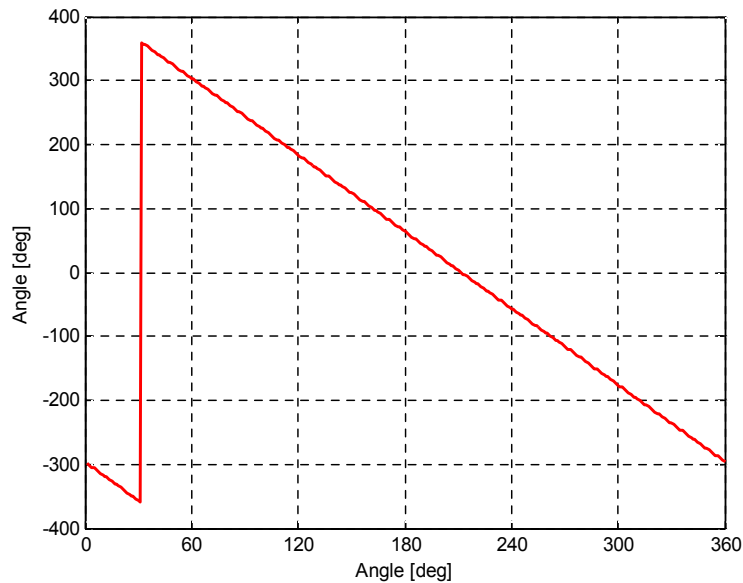


그림 3.18 C상 고장시 A상과 B상으로 구현한 회전각도 계산 파형

### 3.2.3 3상 정현파 역기전력에 왜곡이 있는 경우 대처 방안

이제까지는 영구자석 속도검출기에서 생성된 3상 역기전력 신호가 왜곡이 없이 이상적인 정현파라는 전제로 회전속도 및 회전방향을 구하였고, 또한 내고장성을 구현하였다. 하지만 실제 제작상의 오차 등을 고려하면, 얻어진 3상 역기전력 신호에 왜곡이 존재할 수 있다. 따라서, 이러

한 경우에도 이상적인 정현파를 복원하여 회전속도 및 회전방향을 도출하고, 내고장성을 구현할 수 있는 대처 방안이 필요하다.

먼저, 사전시험을 통하여 이상적인 정현파에 비하여 왜곡이 있는 실제의 A상, B상 및 C상 역기전압을 계측하고, 이를 최대값이 1이 되도록 정규화한  $V_{A\_normal}$ ,  $V_{B\_normal}$  및  $V_{C\_normal}$ 를 구한 다음, 정규화된 실제의 회전속도  $VEL_{amp\_normal}$  및 회전각도  $\theta_{normal}$ 을 아래의 수식과 같이 구한다.

$$V_{A\_normal} = V_{m\_normal} f_{distorted}(\omega t) \quad (3.71)$$

$$V_{B\_normal} = V_{m\_normal} f_{distorted}(\omega t - 120^\circ) \quad (3.72)$$

$$V_{C\_normal} = V_{m\_normal} f_{distorted}(\omega t - 240^\circ) \quad (3.73)$$

$$\bar{u}_A = [0 \quad 1] \quad (3.74)$$

$$\bar{u}_B = [-\cos(30^\circ) \quad -\sin(30^\circ)] \quad (3.75)$$

$$\bar{u}_C = [\cos(30^\circ) \quad -\sin(30^\circ)] \quad (3.76)$$

$$\bar{p}_{A\_normal} = V_{A\_normal} \bar{u}_A \quad (3.77)$$

$$\bar{p}_{B\_normal} = V_{B\_normal} \bar{u}_B \quad (3.78)$$

$$\bar{p}_{C\_normal} = V_{C\_normal} \bar{u}_C \quad (3.79)$$

$$\begin{aligned} VEL_{amp\_normal} &= \|\bar{p}_{ABC\_normal}\| \\ &= \|(\bar{p}_{A\_normal} + \bar{p}_{B\_normal} + \bar{p}_{C\_normal})\| \end{aligned} \quad (3.80)$$

$$\begin{aligned} \theta_{normal} &= \angle \bar{p}_{ABC\_normal} \\ &= \angle (\bar{p}_{A\_normal} + \bar{p}_{B\_normal} + \bar{p}_{C\_normal}) \end{aligned} \quad (3.81)$$

여기서,  $V_{m\_normal}$ 은 왜곡이 있는 역기전압의 최대값,  $f_{distorted}$ 는 왜곡이 있는 역기전압 형상 함수이다.

앞서 구해진 정규화된 실제의 회전속도  $VEL_{amp\_normal}$  및 회전각도  $\theta_{normal}$  을 가지고 이상적인 회전각도에 대하여 각각 Look-up Table을 작성한다. 이 두개의 Look-up Table을 기반으로 정현파 역기전압에 왜곡이 있는 경우에도 이상적인 정현파를 추정하는 방법에 대하여 아래에서 상세 기술한다.

시험 시작 후 매 샘플링 시간마다 A상, B상, C상 역기전압  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ 를 계측하고, 이를 이용하여 회전속도의 크기  $VEL_{amp}$ 와 회전각도  $\theta$ 를 계산한다. 구해진  $\theta$ 를 사전에 작성한 정규화된  $\theta_{normal}$  Look-up Table과 비교하여 최소자승 오차를 가지는  $\theta_{estimate}$ 를 추정한다.

$$\theta_{estimate} = \min(\theta_{normal}(i) - \theta)^2, \quad 0 < i < 360 \quad (3.82)$$

추정된 회전각도  $\theta_{estimate}$ 에 해당하는 회전속도  $VEL_{amp\_normal}$ 과 현재 계측된  $V_A$ ,  $V_B$  및  $V_C$ 를 기반으로 도출된 회전속도  $VEL_{amp}$ 와의 비율  $VEL_{amp\_estimate}$ 을 구한다.

$$VEL_{amp\_estimate} = VEL_{amp} / VEL_{amp\_normal}(\theta_{estimate}) \quad (3.83)$$

복원된 이상적인 정현파 역기전압은 앞서 구한  $VEL_{amp\_estimate}$ 와  $\theta_{estimate}$ 를 이용하여 아래와 같이 계산된다.

$$V_{A\_recoverd} = VEL_{amp\_estimate} \sin(\theta_{estimate}) \quad (3.84)$$

$$V_{B\_recoverd} = VEL_{amp\_estimate} \sin(\theta_{estimate} - 120^\circ) \quad (3.85)$$

$$V_{C\_recoverd} = VEL_{amp\_estimate} \sin(\theta_{estimate} - 240^\circ) \quad (3.86)$$

계산된  $V_{A\_recoverd}$ ,  $V_{B\_recoverd}$  및  $V_{C\_recoverd}$ 와 식 (3.54), 식 (3.56), 식 (3.58) 및 식 (3.59)를 이용하여 회전속도 및 회전방향을 도출하고, 내

고장성을 구현함으로써 왜곡이 존재하는 3상 역기전압 신호에 대처하는 것이 가능하다.

그림 3.19는 왜곡이 존재하는 3상 역기전압 신호와 상기의 절차에 의해 복원된 이상적인 정현파 신호를 나타낸다.

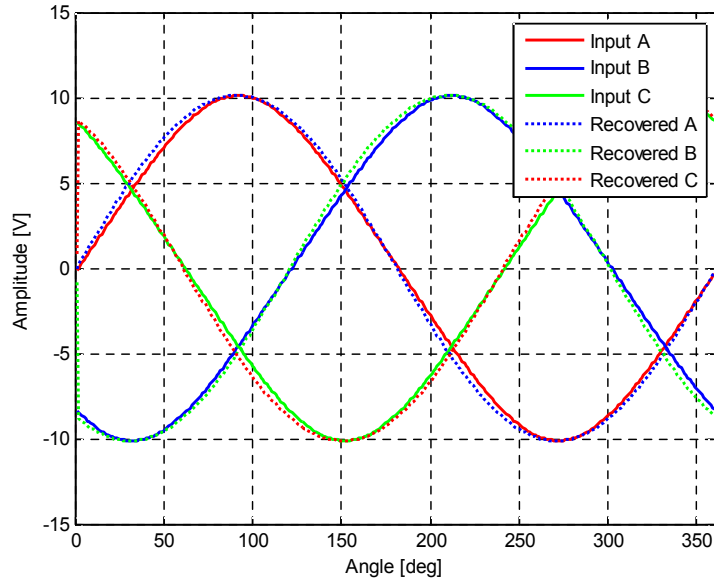


그림 3.19 왜곡이 존재하는 3상 역기전압 및 이의 복원 결과

## 제 4 장 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 최적 설계

브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 발전기에서 출력되는 역기전압의 형상이 이상적인 형태에 근접할수록 계측 오차의 범위를 축소시킬 수 있기 때문에 발전기의 역기전압에 대한 최적 설계가 매우 중요하다. 따라서 이를 위해서는 계산시간과 자원이 추가적으로 소요되더라도 유한요소법(Finite Element Method, FEM)과 같은 좀 더 정확한 전자기장 해석 방법의 도입이 필수적으로 요구된다[20].

본 장에서는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 포함하는 전기기기의 최적 설계에 적합한 새로운 최적화 기법을 제안하고, 제안된 최적화 기법이 기존의 최적화 기법들과 비교하여 우수한 성능을 가짐을 보인다.

브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 포함하는 전기기기 설계 문제는 결정해야 할 많은 설계 변수들을 가지고 있으며, 이 설계 변수들은 상호간에 연관성과 상충관계(Trade-off)를 가지고 있다. 또한, 신뢰성 있는 설계 결과를 도출하기 위해서는 전기기기의 비선형적 특성을 반드시 고려해 주어야 한다. 게다가, 최근의 전기기기들은 과거의 전형적인 전기기기들에 비하여 상대적으로 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 유한요소법과 같은 좀 더 정확한 전자기장 해석 방법이 절대적으로 필요하다 [21]-[30]. 그러므로, 전기기기 설계 최적화 문제는 비선형 및 다변수 최적화 문제이며, 계산에 소요되는 시간 및 자원은 목적함수 계산을 위한 함수 호출수에 따라 매우 급격히 증가하게 된다[31]-[33].

이러한 전기기기 설계 최적화 문제를 효과적으로 수행하기 위해서는, 탐색 공간내에서 전역 최적해 뿐만 아니라 국소 최적해들을 포함하는 다수의 최적해들을 동시에 탐색하는 멀티모달 최적화(Multimodal Optimization) 기법을 적용하는 것이 훌륭한 해결 수단이 될 수 있다 [34-54]. 이것은 문제 공간의 특성에 대한 깊은 이해를 제공해 줄 뿐만 아니라, 제한된 조건하에서 전역 최적해를 대체할 수 있는 훌륭한 해결

책을 제시한다.

본 장에서는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 포함하는 전기기기의 최적 설계에 적합한 새로운 멀티모달 최적화 기법을 제안한다. 제안된 멀티모달 최적화 기법은 압축 센싱(Compressed Sensing, CS) 이론을 이용하는 대리모델(surrogate model)과 빅뱅-빅크런치(Big Bang-Big Crunch, BB-BC) 기법을 기반으로 구성되며, 제안된 멀티모달 최적화 기법은 기존의 최적화 기법에 비하여 상대적으로 빠르고 정확하게 다수의 최적해를 동시에 탐색하는 우수한 특성을 보인다.

또한, 본 장에서는 제안된 멀티모달 최적화 기법을 이용하여 사다리꼴 역기전력 및 정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 최적설계를 수행함으로써, 제안하는 최적화 기법이 실제적인 전기기기 설계 문제에 효과적으로 적용 가능성을 보인다.

## 4.1 기존의 최적화 기법

기존의 전기기기 최적화를 위한 멀티모달 최적화 기법 중 하나인 니칭 유전 알고리즘(Niching Genetic Algorithm, NGA)은 자연계 진화의 법칙인 선택, 교배 및 돌연변이의 원리를 기반으로 하여 정립된 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)에 생태계의 니체(Niche) 개념을 도입함으로써 탐색공간에서 다수의 해를 병렬적으로 찾을 수 있도록 제안된 방법을 말한다[55]-[63]. 생태계에 있어서 니체란 유사한 특성을 가진 유기체들의 집합인 종(Species)들이 주어진 환경 속에서 살아남을 수 있도록 만들어 주는 독특한 생태학적 영역, 자원 혹은 역할을 의미하며, 이러한 니체에 기반한 주어진 환경의 세분화된 공유는 제한된 환경 자원에 대한 유기체들 간의 경쟁을 감소시킴으로써 유사한 특성을 가진 유기체들끼리 안정적으로 소규모 집단을 형성할 수 있도록 도와준다. 이러한 생물학의 니체와 종의 개념을 멀티모달 최적화 문제를 해결하기 위하여 유전 알고

리즘에 도입한 것이 니칭 유전 알고리즘이며, 니체는 멀티모달 특성을 가지는 탐색 공간 내에서의 각 피크점들의 위치에 대응되고, 좋은 전체 개체집단 중에서 일정한 거리, 즉 니체 반경(Niche Radius) 내에 있는 개체들에 해당된다. 일반적인 니칭 유전 알고리즘의 경우 니체 반경을 미리 설정해 주어야 하는데, 이는 해당 목적함수의 형태에 대한 유추가 어느 정도 가능하여야 적절한 니체 반경을 설정할 수 있다는 것을 뜻하며, 비대칭적인 형상을 갖는 문제 공간에서 대하여 최적점들을 탐색하는 경우 어려움이 발생할 수 있다. 또한, 니체 반경을 계속 갱신하는 니칭 유전 알고리즘의 경우에도 니체 반경 안으로 새로이 유입된 개체들에 대한 판단을 통하여 기존의 니체 반경을 유지하거나 혹은 갱신하는 작업들이 추가적으로 필요하며, 이는 비교적 많은 함수 호출수를 필요로 할 뿐만 아니라 알고리즘 자체 수행에 소요되는 계산량의 증가를 가져오게 된다. 특히 유한요소법과 같은 보다 정밀하고 계산시간을 요하는 최신의 기법들을 이용하여 목적함수 값을 계산해야 하는 전기기기 최적 설계 문제의 경우에는 함수 호출수가 많아질 경우 매우 불리한 조건이 된다.

한편, 수렴성과 정확성 측면에서 기존의 진화론적인 최적화 기법에 비해 우수한 성능을 가지는 대리모델을 기반으로 하는 멀티모달 최적화 기법이 최근에 활발히 연구되어지고 있다. 기존의 대리모델 생성 기법에는 여러가지 방법들이 있으나, 최근에는 반응 표면법(Response Surface Method, RSM) 및 크리깅 기법(Kriging Method)이 가장 널리 사용되고 있다. 반응 표면법은 일종의 2차 다항식 통계 모델로, 구현이 간단하고 소수의 측정점들로도 구현이 가능하지만, 멀티모달 함수의 피크점을 잘 탐색하지 못하는 경향이 있다[64]. 크리깅 기법은 가우시안 프로세스 모델(Gaussian Process Model)에 기반하고 있으며, 설계 공간에서 출력 변수들이 서로 연관되어 있다. 크리깅 기법은 좀 더 수학적으로 강건하지만, 정확한 계산을 위하여 다수의 측정점들이 필요하게 된다[65].

또한, 최근 들어 진화론적 기법에 기반을 둔 멀티모달 최적화 기법들이 널리 연구되고 있다[66]-[67]. 가장 전형적인 진화론적 최적화 기법인

유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA), 진화 전략(Evolutionary Strategies, ES) 및 입자 군집 최적화(Particle Swarm Optimization, PSO) 기법들은 단일 전역 최적해로만 수렴하는 소위 표류 현상(Drift Phenomenon)을 보인다. 따라서 다수의 해를 동시에 찾아야 하는 멀티모달 최적화 문제를 해결하기 위하여 기존 진화론적 알고리즘의 수정을 포함하는 많은 실제적인 연구들이 활발히 수행되어지고 있다[68]-[69].

빅뱅-빅크런치 알고리즘은 최근에 개발된 최적화 알고리즘으로써, 물리학의 우주 생성 이론에 기반을 두고 있다[70]-[72]. 빅뱅-빅크런치 알고리즘은 두개의 주요 단계로 구성되며, 상세한 순서도는 그림 4.1과 같다. 첫번째 단계는 빅크런치 단계로써, 식 (4.1)을 이용하여 후보 해집단의 무게 중심  $x_{cm}$ 으로 수렴하는 절차이다. 두번째 단계는 빅뱅 단계로써, 식 (4.2)를 이용하여 무게 중심 주변으로 후보해를 임의로 생성하는 팽창 단계이다. 이러한 연속적인 팽창과 수렴 단계는 종료 조건이 만족되어질 때까지 반복적으로 수행된다.

$$\text{빅크런치 단계 : } x_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i} x_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i}} \quad (4.1)$$

$$\text{빅뱅 단계 : } x_{new} = x_{cm} + \left( \frac{l \cdot r}{n_{iter}} \right) \quad (4.2)$$

여기서,  $x_i$ 는 해집단의  $i$ 번째 개체,  $f_i$ 는  $i$ 번째 샘플의 목적함수값,  $N$ 은 해집단의 개체수를 나타낸다. 또한  $x_{new}$ 는 생성된 새로운 개체,  $l$ 은 파라미터의 상한값,  $r$ 은 표준정규분포를 가지는 임의의 수,  $n_{iter}$ 는 반복 횟수를 의미한다.

빅뱅-빅크런치 알고리즘은 계산량이 적고 간단하며, 최적해로의 빠른 수렴속도를 가지기 때문에 최적화 변수가 많은 경우에 매우 효과적이다. 빅뱅-빅크런치 알고리즘은 현재 실질적인 다양한 공학적 문제에 적용되



어 우수한 성능을 보여 주고 있다. 하지만, 불행하게도 다른 진화론적인 최적화 기법들과 마찬가지로 빅뱅-빅크런치 알고리즘도 단지 전역 최적해로만 수렴하는 특성을 보인다. 따라서 전형적인 빅뱅-빅크런치 알고리즘은 멀티모달 문제에 대한 다수 최적해의 동시 탐색이 불가능하다.

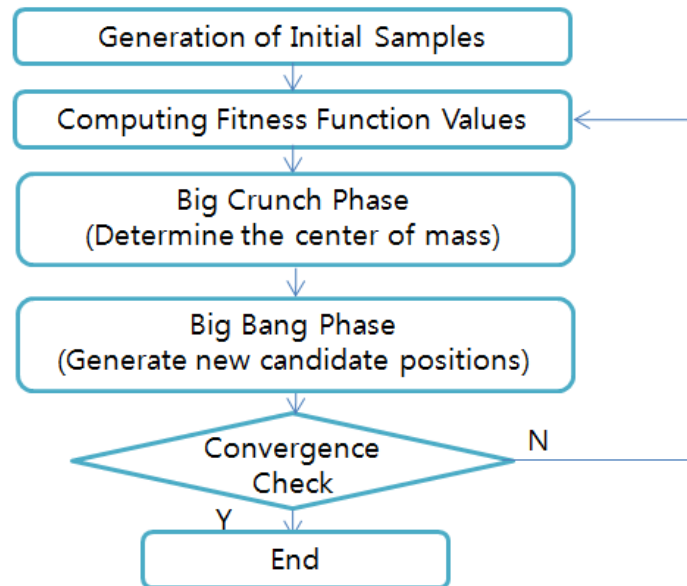


그림 4.1 빅뱅-빅크런치 알고리즘 순서도

## 4.2 제안된 최적화 기법

본 절에서는 빅뱅-빅크런치 알고리즘과 압축 센싱 기법을 이용한 대리모델에 기반을 둔 새로운 멀티모달 최적화 기법을 제안한다[73]-[74]. 현재까지 멀티모달 최적화 문제를 다루기 위한 빅뱅-빅크런치 알고리즘은 제안된 바가 없다. 제안된 최적화 알고리즘은 멀티모달 문제를 다루기 위하여 전형적인 빅뱅-빅크런치 알고리즘을 수정하여 적용한다. 다수의 최적해들을 동시에 탐색하기 위하여 빅뱅-빅크런치 알고리즘에 니칭 기법을 적용하였다. 일반적으로 멀티모달 최적화 문제에 있어서, 니체 혹은 종의 크기를 결정하는 니체 반경을 결정하는 것은 매우 어려운 일이다. 이는 니칭 파라미터가 해당되는 문제에 따라 다르게 결정되는 사실로부터 기인하며, 따라서 설계자는 최적화 문제 자체에 대한 약간의 선행적인 지식이 있어야만 한다. 이러한 문제를 해결하고 니체 및 니체 반경을 최적화 환경에 맞추어 자동적으로 결정하기 위하여, 제안된 멀티모달 최적화 알고리즘은 대리모델을 구축하고 이의 피크점들을 찾는다. 문제 영역에서의 니체와 니체 반경은 탐색된 피크점들을 기반으로 결정된다. 빅뱅-빅크런치 알고리즘은 니체 반경내에 있는 영역에서만 제한적으로 적용된다. 결론적으로 제안된 멀티모달 최적화 알고리즘은 반복적인 분석에 소요되는 노력을 경감시키고 계산 시간 및 자원을 효과적으로 감소시킬 수 있다.

최근 압축 센싱 이론이 제안되어 응용 수학, 전산 및 공학 분야에서 빠르게 주목을 받고 있다[75]-[82]. 압축 센싱의 원리를 이용하면 상대적으로 적은 양의 계측 샘플들로부터 원래의 신호를 복원하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 압축 센싱 이론을 기반으로 새로운 대리모델 생성 기법을 제안한다, 기존의 전형적인 대리모델 생성 기법과 달리 제안된 기법은 거의 0 값으로 구성된 압축 공간에서 목적 함수를 추정한다. 따라서, 제안된 기법은 다량의 목적함수 계산 요구를 효과적으로 감

소시킴으로써 최적화 과정에서 소요되는 계산량을 현저하게 줄인다. 압축 센싱을 이용한 대리모델 생성시 적응형 가중 함수를 도입하여 속도와 정확도를 향상시켰으며, 대리모델 격자 간격 또한 최적화 결과에 따라 가변적으로 조절된다. 결론적으로 제안된 압축 센싱을 이용한 대리모델 생성 기법은 전형적인 다른 기법들에 비하여 목적함수 계산량이 상대적으로 적게 되어 반복적인 분석 노력과 계산상의 복잡도를 좀 더 효과적으로 경감시킨다.

제안된 멀티모달 최적화 기법의 상세 절차는 다음과 같다.

Step 1 : 최적화 기본 조건 정의

최적화에 필요한 파라미터들을 초기화하고, 설계 변수들의 최대값 및 최소값을 정의한다.

Step 2 : 초기 후보해의 생성

미리 정의된 탐색 공간내에 초기 후보해들을 임의로 생성하고, 이들의 목적함수값을 계산한다.  $i$ 번째 후보해를  $x_i$ 라고 정의하며,  $N$ 이 후보해 집단의 크기라고 할 때  $i = 1, 2, \dots, N$ 이다.

Step 3 : 격자 간격 결정

대리모델에서 사용되어질 격자 간격을 결정한다. 만약 현재 단계에서의 니체 위치와 이전 단계에서의 니체 위치의 차이가 미리 정의된 미소 범위내에 있다면, 다음 단계의 격자 간격은 현 단계 격자 간격의 반으로 줄어든다. 따라서, 격자 간격은 최적화 결과에 따라 점진적으로 세분화되도록 식 (4.3)과 같이 가변적으로 조절된다.

$$\begin{aligned} & \text{If } \| (n-1 \text{ 단계의 피크값 위치}) - (n \text{ 단계의 피크값 위치}) \| < \varepsilon \\ & \quad n+1 \text{ 단계 격자 간격} = (1/2) * (n \text{ 단계 격자 간격}) \\ & \text{End (여기서, } \varepsilon \text{은 사전에 정의된 미소 범위 경계값)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

#### Step 4 : 압축 센싱 기법을 이용한 대리모델 생성

대리모델은 근사적으로 실제의 목적함수를 추정할 수 있다. 목적함수의 공간적 분포는 반응표면법(Response Surface Method) 혹은 크리깅 기법(Kriging Method) 등과 같은 다양한 대리모델 생성 기법에 의해 얻어질 수 있다. 최근 천이 영역(Transform Domain)에서 신호의 희소성(Sparse Nature)을 이용하여 제한된 수의 샘플로부터 원신호를 완벽히 재현하는 성능을 가진 압축 센싱 기법이 급속히 주목을 받고 있다. (그림 4.2 참조) 본 논문에서는 압축 센싱 기법을 기반으로 하는 대리모델 생성 기법을 새롭게 제안하며, 그 상세 내용은 아래와 같다.

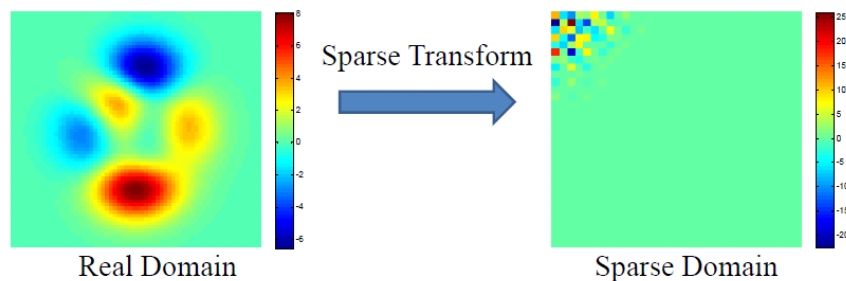


그림 4.2 벡터 이미지에 대한 희소 변환

본 논문에서는 새롭게 개발된 적응 가중형 압축 센싱(Adaptively Weighted Compressed Sensing, AWCS) 대리모델 생성 기법을 제안하고 이를 적용한다. 다른 대리모델 생성 기법과 비교하여 제안된 적응 가중형 압축 센싱 기법은 거의 0으로 구성된 압축 영역(Compressible Domain) 상에서 목적함수를 추정한다. 따라서, 제안된 기법은 단지 소수의 선정된 샘플만으로도 목적함수를 훌륭하게 재복원하는 것이 가능하게 된다. 결론적으로 계산의 복잡도를 매우 효과적으로 감소시키는 것이 가능하다.

수학적으로 압축 센싱의 원리는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 예를 들

어,  $s = Bx$ 을 만족하며,  $s \ll n$ 인  $s$ 개의 0이 아닌 원소들을 가지는  $R^{n \times n}$  차원 기저벡터  $B$ 상에서의 희소 신호  $s$ 와 함께,  $R^n$  차원 영역에서 원래의 벡터 신호  $x$ 와 추정된 복원 신호  $\hat{x}$ 을 고려하자. 선정된  $m$ 개의 샘플들을 나타내는  $R^{m \times n}$  차원의 샘플링 행렬을  $A$ 라 하면,  $R^m$  차원을 가지는 측정신호  $y$ 는  $y = Ax$ 로 표현된다. 원래의 벡터 신호는 다음의 제한된 최적화 문제를 풀어서 재구성될 수 있다.

$$\hat{x} = \min \| W_d s \|_1, \text{ such that } y = Ax \quad (4.4)$$

식 (4.4)는 계측값들을 만족하는 모든 해들 중에서, 원래의 신호  $x$ 는 희소 기저상에서 최소  $l_1$  노름(norm)을 가지는 단 하나, 즉  $B$ 의 최대 희소 신호를 나타낸다. 압축 센싱을 대리모델 생성 기법에 적용하면 샘플링 행렬  $A$ 의 원소는 샘플의 위치에 따라 0 혹은 1의 값을 가진다. 본 논문에서는 희소 기저  $B$ 로서 푸리에 행렬을 채용한다.  $W_d$ 는 그 대각 원소가 가중행렬  $W$ 로 구성된  $n \times n$  대각 행렬이다.

가중행렬  $W$ 는 그림 4.3에서 보여진 바와 같이 저주파 대역에 대한 가중치를 주도록 결정된다. 가중 행렬  $W$ 의 영역은 원점으로부터의 거리에 비례하여 결정된다. 따라서 각 영역의 경계 형상은 사분원이 된다. 추가적으로 각 영역의 가중치는 보간 샘플들의 증가율과 배치 척도에 따라 가변된다. 상세하게 설명하면, 그림 4.4에서와 보여진 바와 같이, 계산 영역을 일정한 간격으로 나누어 하위 영역을 구성하고, 이 하위 영역을 기반으로 샘플들의 증가율과 배치 척도를 분석한다. 일반적으로 고주파 대역보다 저주파 대역에 좀 더 큰 가중치를 준다. 초기 최적화 단계에서는 저주파 대역과 고주파 대역의 가중치 차이가 좀 더 크도록 선정하고, 이후 샘플수가 증가하고 샘플들이 계산 영역에 균일하게 분포하게 됨에 따라 가중치의 차이가 점진적으로 감소하도록 조절된다.

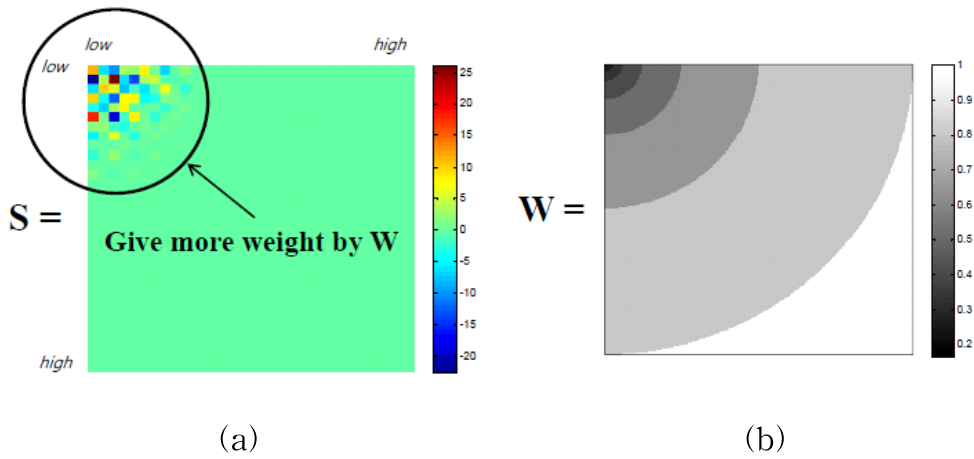


그림 4.3 희소 공간에서의 이미지 분포 및 가중함수 형상 :  
 (a) 희소 이미지 (b) 가중함수

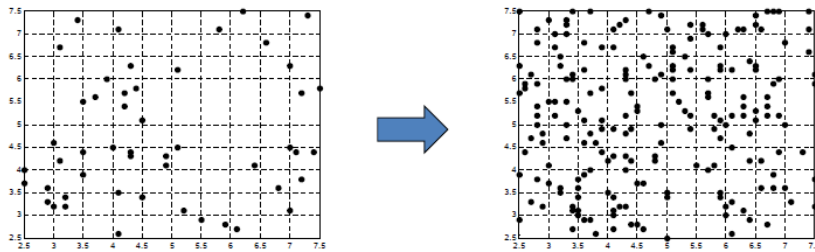
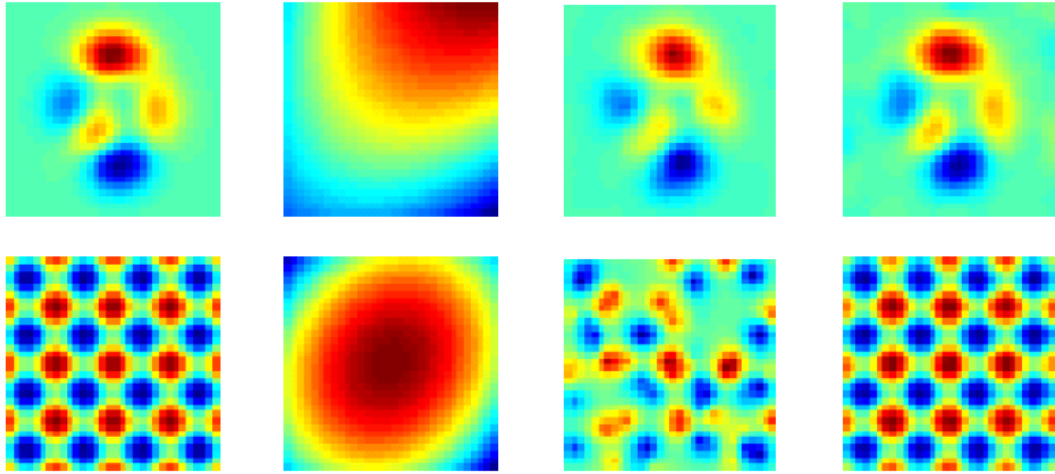


그림 4.4 가중치 가변 조정을 위한 샘플의 증가율과 분포 척도

제안된 기법의 효용성을 알아보기 위하여 100개의 랜덤 분포 샘플들로 구성된 2차원 대리모델 생성 문제에 제안된 기법을 적용하였다. 그림 4.5의 (a)는 시험 목적함수의 형상을 보여주고 있으며, 그림 4.5의 (b), (c) 및 (d)는 각각 반응표면법, 크리깅 기법 및 제안된 적응 가중형 압축 센싱 기법을 적용하여 얻어진 보간 목적 함수를 보여주고 있다. 기존의 방법에 비하여 제안된 대리모델 생성 기법이 단지 100개의 랜덤 선택 샘플만으로도 우수하게 목적함수를 재구성하는 것을 확인할 수 있다.



(a) (b) (c) (d)

그림 4.5 기존 기법과 제안된 기법의 비교 : (a) 시험 목적함수 (b) 반응 표면법 (c) 크리깅 기법 (d) 제안된 기법

#### Step 5 : 피크 탐색 및 니체 할당

이 단계에서는 지역 피크들의 위치가 대리모델을 기반으로 격자상에서 추정된다. 현재 단계의 피크 위치를 임시 니체로 할당한다.

$$x_{nck_k} \leftarrow x_{tp\_nch\_k} = x_{pk_k} \quad (4.5)$$

여기서,  $x_{nck_k}$ ,  $x_{tp\_nch\_k}$  및  $x_{pk_k}$ 는 각각 니체  $k$ , 임시 니체  $k$  및 피크  $k$ 의 위치이다.

#### Step 6 : 피크를 이용한 니체 반경 계산

각 니체 반경은 피크들, 즉 니체들 상호간의 거리에 기반하여 계산된다. 니체 반경은 임의의 니체 자신과 그것에 가장 가까운 이웃 니체 사이의 유클리드 거리의 함수로 결정되어진다.

$$NR_{nch_k} = f(\|x_{nch_k}, x_{nr\_nch_k}\|_2) \quad (4.6)$$

여기서,  $x_{nr\_nich\_k}$ 는 니체  $k$ 로부터 가장 가까운 이웃 니체의 위치이며,  $NR_{nich\_k}$ 는 니체  $k$ 의 니체 반경이다.

니체 반경을 계산하기 위해 사용되는 기법에는 두가지가 있다. 첫번째 방법은, 니체 자신과 가장 가까운 이웃 니체간의 상호 유클리드 거리의 반으로 니체 반경을 설정하는 방법이다. (그림 4.6 참조) 두번째 방법은 니체 자신과 니체 자신으로부터 가장 가까운 이웃 니체까지의 경로상에서 가장 작은 목적함수값을 가지는 위치를 찾은 후, 그 위치와 니체 자신 사이의 거리로 니체 반경을 결정하는 방법이다. (그림 4.7 참조) 첫번째 방법은 두번째 방법에 비하여 구현이 쉬운 반면, 두번째 방법이 첫번째 방법에 비해 수렴속도가 빠르다.

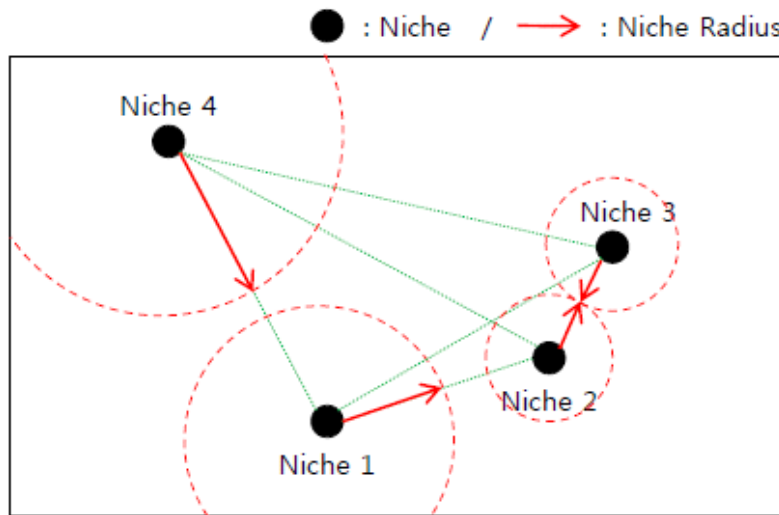


그림 4.6 니체 반경 계산 기법 1



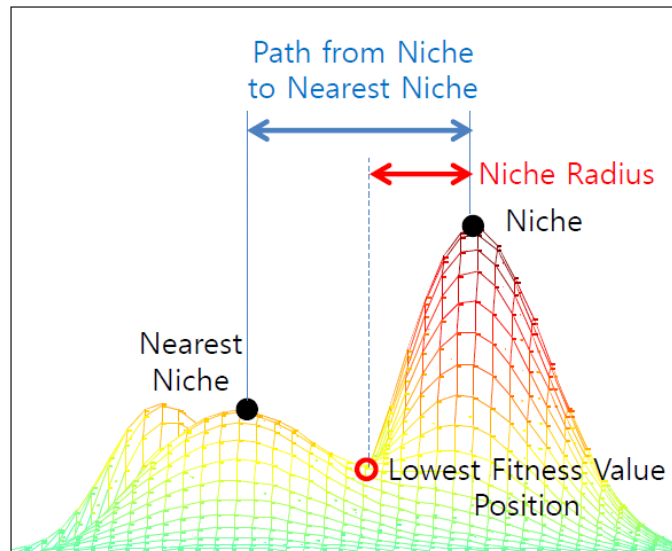


그림 4.7 니체 반경 계산 기법 2

Step 7 : 니체의 위치 변화 확인

Step 5에서 계산된 현재 단계의 니체 위치들을 한단계 이전의 니체 위치들 및 두단계 이전의 니체 위치들과 비교한다. 만약 세개의 단계에서의 니체 위치들의 차이가 모두 미리 정의된 미소 범위내에 존재하면, 제안된 최적화 알고리즘은 Step 11로 이동한다.

Step 8 : 빅크런치 단계

표준 빅뱅-빅크런치 알고리즘에서 빅크런치는 무게중심이라 불리는 단 하나의 출력만을 가지는 수렴 연산자이다. 제안된 최적화 기법에서 빅크런치 단계는 각 니체들에 대하여 자신의 니체 반경내에 있는 미리 정의된 수의 가장 가까운 이웃 샘플들에 대하여 적용된다. 그러므로, 니체 반경  $k$ 의 무게중심은 다음과 같이 구해진다.

$$x_{cm\_k} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{nearest}} \frac{1}{f_i} x_i}{\sum_{i=1}^{N_{nearest}} \frac{1}{f_i}} \quad (4.7)$$

여기서,  $N_{nearest}$  는 각 니체의 무게중심 계산에 참여하는 가장 가까운 샘플들의 최대 숫자를 나타내며,  $f_i$  는  $i$  번째 샘플의 목적함수값을 나타낸다.  $N_{nearest}$  는 알고리즘의 반복횟수가 증가할수록 감소한다.

만약 무게중심의 목적함수값이 기존 니체의 목적함수값보다 크다면, 각 니체의 위치는 무게중심의 목적함수값으로 업데이트된다. 이것은 기존 니체와 새로운 무게중심간의 엘리트 전략에 해당된다.

$$x_{nch\_k} = \begin{cases} x_{cm\_k}, & \text{if } f_{cm\_k} \geq f_{nch\_k} \\ x_{nch\_k}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.8)$$

여기서,  $f_{cm\_k}$  와  $f_{nch\_k}$  는 각각 현 단계의  $k$  번째 무게중심 및 니체의 목적함수값이다.

#### Step 9 : 빅뱅 단계

다음 반복 단계에서 사용될 새로운 샘플들을 생성한다. 제안된 기법에서는 식 (4.9)를 이용하여 니체 반경 안에 있는 니체 주변에 새로운 자식 해인  $x_{new\_i}$  를 퍼뜨린다.

$$x_{new\_i} = x_{nch\_i} + (r \cdot \alpha \cdot NR_{nch\_k} / n_{iter}) \quad (4.9)$$

여기서,  $r$  은 표준정규분포를 가지는 임의의 수이며,  $\alpha$  는 탐색영역의 크기를 제한하는 가중 파라미터이고,  $n_{iter}$  는 반복횟수이다.

여기서  $\alpha$  와 니체 주변의 새로운 자식해의 수는 최적화 결과에 따라

가변적으로 조정된다. 즉, 이들을 니체  $k$ 의 실제 목적함수값과 대리모델 상의 값의 차이에 비례하여 가변시킨다.

Step 10 : 추가적인 샘플 생성

탐색 공간 중에서 비어 있는 공간에 미리 정의된 수의 샘플들을 임의로 생성한다. 이 추가적인 샘플들은 해의 다양성을 보장하게 된다. 추가 샘플들을 생성하고 난 후, 제안된 알고리즘은 Step 3으로 돌아가게 된다.

Step 11 : 격자 간격내의 상세 니체 탐색

격자 간격내에서 정밀하게 니체를 찾기 위하여, 기존에 얻어진 니체들에 대하여 추가적인 탐색 절차를 수행한다.

제안된 최적화 기법의 전체 순서도는 그림 4.8과 같다.

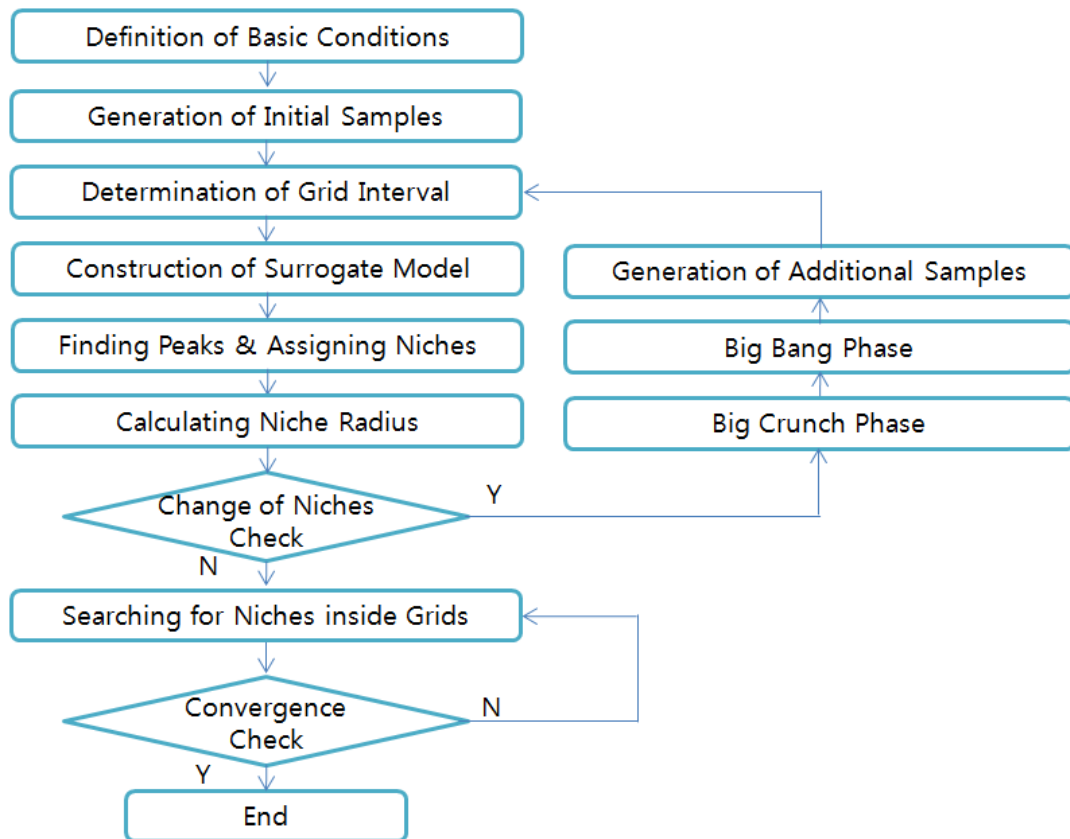


그림 4.8 제안된 최적화 기법의 전체 순서도

49개의 피크값을 가지는 식 (4.10)의 수학적 함수를 이용하여 제안된 최적화 기법의 성능을 검증하였다.

$$f(x,y) = 900 - (x-5)^2 + 10\cos(2\pi(x-5)) + (y-5)^2 + 10\cos(2\pi(y-5)), \quad 1.8 \leq x,y \leq 8.2 \quad (4.10)$$

제안된 최적화 기법은 멀티모달 최적화 기법에 널리 쓰이는 니칭 유전 알고리즘(Niching Genetic Algorithm, NGA) 및 오토튜닝 니칭 유전 알고리즘(Autotuning NGA)과 성능을 비교하였다. 표 4.1은 제안된 방법과 NGA 및 Autotuning NGA의 최적화 결과를 나타낸다. NGA 기법을 통하여 좋은 최적화 결과를 얻기 위해서는 최적화를 수행하기 이전에 최적의 니체 반경을 미리 설정해야만 한다. 만약 니체 반경이 적절하게 설정되지 않은 경우에는 정확한 국소 최적해들의 탐색에 실패할 수도 있게 된다. Autotuning NGA의 경우 니체 반경을 세대에 따라서 자동으로 조정하기는 하지만, 니체 반경을 업데이트하기 위해서는 문제영역 내에 있는 각각의 피크들에 대하여 모든 방향으로의 탐색 과정을 필요로 하기 때문에 추가적으로 많은 함수 호출을 요구하게 된다. 표 4.1의 결과로부터 알 수 있듯이 제안된 최적화 기법은 함수 호출 횟수를 효과적으로 감소시켜 목적함수의 피크값들을 빠르게 찾을 수 있다.

표 4.1 제안된 최적화 기법과 기존 최적화 기법의 비교

Symbol	NGA	Autotuning NGA	Proposed Algorithm
Number of searched peaks	49	49	49
Number of function calls	9848	6792	487
Convergence Rate [%]	92.7	98.3	99.2

추가적으로 최적화 문제의 수치 해석에 자주 사용되는 전형적인 수학적 함수들에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 4.2와 표 4.3은 해당되는 테스트 함수들과 최적화를 통해 얻어진 결과들을 나타낸다. 이를 통하여 제안된 최적화 기법이 기존 방법들에 비하여 우수한 결과를 보여줄 수 있다.

표 4.2 제안된 최적화 기법과 기존 최적화 기법의 비교

$$f(x,y) = 20 + x^2 + y^2 - 10(\cos 2\pi x + \cos 2\pi y), \quad -2.5 \leq x, y \leq 2.5$$

(Ackley Function)

Symbol	NGA	Autotuning NGA	Proposed Algorithm
Number of searched peaks	25	25	25
Number of function calls	8112	5011	329
Convergence Rate [%]	92.5	98.4	99.4

표 4.3 제안된 최적화 기법과 기존 최적화 기법의 비교

$$f(x,y) = -4[(4 - 2.1x^2 + x^4/3)x^2 + xy + (-4 + 4y^2)y^2], \quad 0 \leq x, y \leq 30$$

(Griewank Function)

Symbol	NGA	Autotuning NGA	Proposed Algorithm
Number of searched peaks	27	27	27
Number of function calls	8235	5932	384
Convergence Rate [%]	92.2	98.4	99.5

## 4.3 제안된 최적화 기법을 이용한 영구자석 속도검출기 최적 설계

본 절에서는 앞서 제안된 새로운 멀티모달 최적화 알고리즘을 이용하여 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 최적설계를 수행하였다.

4.3.1절에서는 사다리꼴 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 역기전력을 이상적인 사다리꼴에 가깝게 생성되도록 하기 위하여 발전기 역기전압 파형의 리플을 최소화하도록 최적화를 수행한다. 4.3.2절에서는 정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 역기전력을 이상적인 정현파에 가깝게 생성되도록 하기 위하여 발전기 역기전압 파형의 전체 고조파 왜곡률(Total Harmonic Distortion, THD)을 최소화하도록 최적화를 수행한다.

### 4.3.1 사다리꼴 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 역기전압 최적화

사다리꼴 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 역기전압이 이상적인 사다리꼴에 가깝게 생성되도록 제작하여야 속도출력의 오차를 최소화할 수 있게 된다. 이를 위하여 발전기로부터 생성된 사다리꼴 역기전압 파형의 리플을 최소화할 수 있도록, 그림 4.9와 같이 자석의 두개의 외경 중 큰 것에 해당하는  $R1$  및 두개의 외경간 차이값  $L1$ 을 최적화 설계변수로 선정하였다. 표 4.4는 초기 모델에 대한 주요 사양을 나타낸다.

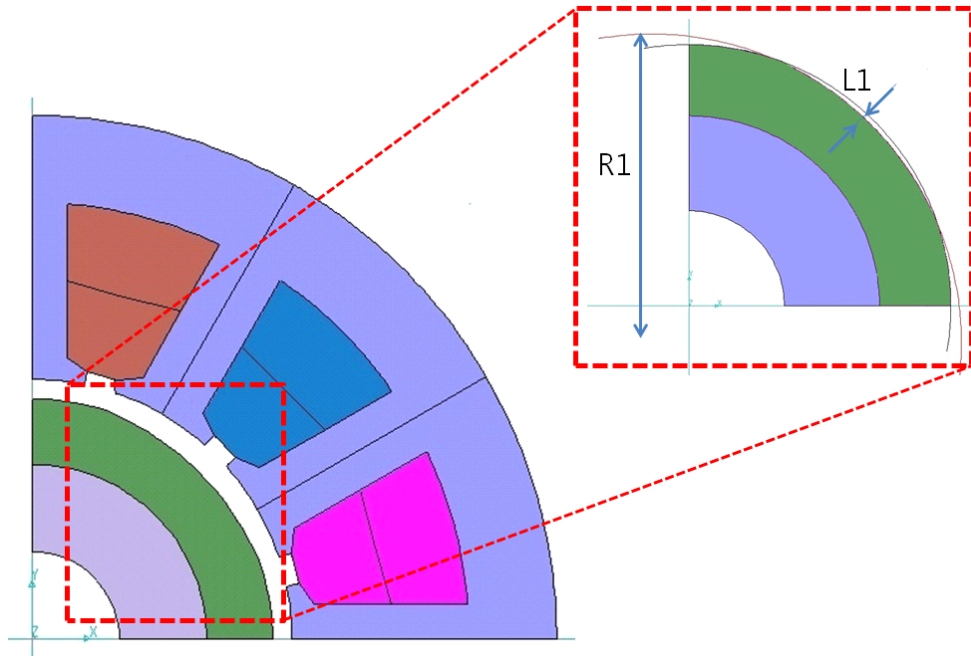


그림 4.9 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 설계 변수

표 4.4 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 초기 모델 사양

극수/슬롯수	4/12
자석 재질	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
코어 재질	35PN250
고정자 외경 [mm]	24
고정자 적층길이 [mm]	13
착자방향	Parallel
스큐	1.0



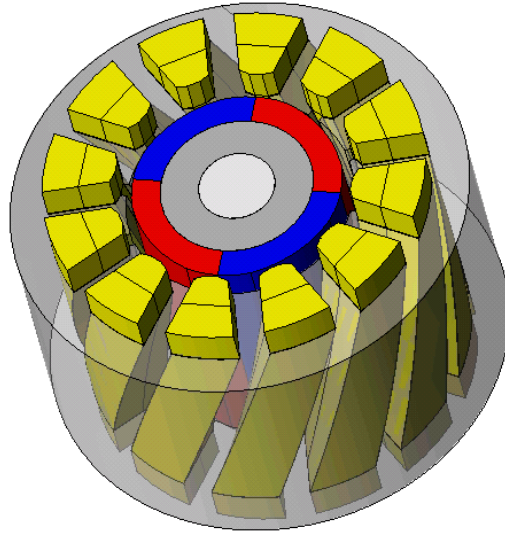
최적화 결과로부터 도출된 역기전압 리플이 서로 비슷하다면 발생하는 역기전압의 Kurtosis가 큰 값과 최대치가 큰 값을 선택한다. 역기전압의 Kurtosis는 사다리꼴 역기전압의 최대치 혹은 최소치 유지기간이 얼마나 넓은지를 나타내는 기준이며, 그 값이 클수록 유지기간이 길게 되어 속도검출에 유리하게 된다. 또한, 역기전압의 최대치는 속도 출력의 감도를 결정하는 척도가 되기 때문에 가능한 한 그 값이 클수록 좋다.

먼저 제안된 최적화 기법과 유한요소법을 이용한 해석을 통하여 역기전압 리플이 가장 작은 값들을 후보해로 선정한 뒤, 역기전압의 Kurtosis와 최대치 및 코깅 토크를 각각 비교하였다. 표 4.5는 3개의 후보해에 대한 결과를 나타낸다. 후보해 1이 역기전압 파형의 리플은 가장 작지만 Kurtosis와 최대치가 가장 작다. 후보해 2는 후보해 1보다 역기전압 파형의 리플은 다소 크지만, 그 차이가 미미하며, Kurtosis와 최대치는 후보해 1보다 크다. 코깅 토크는 고정자 슬롯에 스큐를 적용하였기 때문에 3개의 후보해 모두 전반적으로 작은 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과들을 종합하여 후보해 2를 최종해로 선정하였다.

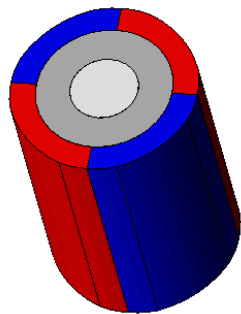
표 4.5 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 최적화 결과

	후보 1	후보 2	후보 3
R1 [mm]	13.52	6.50	12.53
L1 [mm]	0.33	0.79	0.15
역기전압 리플 [V]	0.191	0.212	0.324
Kurtosis	1.693	3.856	2.353
코깅 토크 [Nm]	$4.672 \times 10^{-4}$	$3.969 \times 10^{-4}$	$2.297 \times 10^{-4}$
역기전압 최대치 [V]	9.195	10.01	10.211

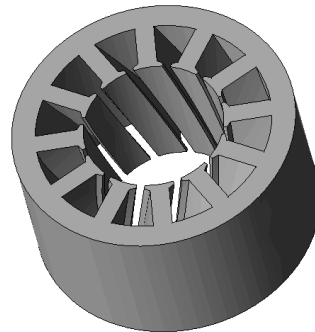
사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 설계안으로 최종 선정된 후보해 2의 해석 모델 형상은 그림 4.10과 같다.



(a) 전체 조립 형상



(b) 회전자



(c) 고정자

그림 4.10 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 해석 모델 형상

최종해로 선정된 후보해 2에 대하여 실제 제작 및 적용에 대한 타당성을 사전 검증하기 위하여 공극 변화에 의한 영향, 온도 변화에 의한 영향 및 부하 변동에 의한 영향을 유한요소법을 이용한 해석을 통하여 추가 검증하였다.

공극 변화에 의한 영향 검토 결과는 다음과 같다. 속도검출기 회전자

회전축에는 베어링이 앞뒤로 2개 장착되어 있으며, 이 베어링의 방사방향 최대 유격은  $10^{-3}$  [mm]이다. 따라서, 제작시 발생할 수 있는 기타 가공 오차 등을 최대 고려하여 회전축이 0.1 [mm]까지 편심이 가능하다고 가정한 후, 이에 대하여 유한요소법을 적용한 해석을 실시하였다. 사다리꼴 역기전압 속도검출기에 적용된 편심을 그림으로 나타내면 그림 4.11과 같으며, 해석된 역기전압 파형 및 코깅 토크 해석 결과는 그림 4.12 및 그림 4.13과 같다.

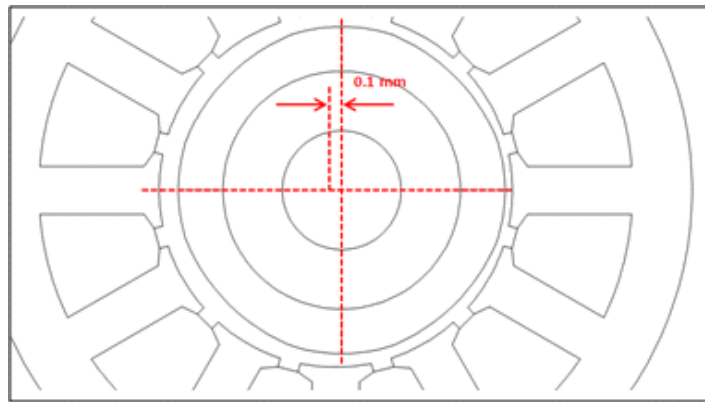


그림 4.11 사다리꼴 역기전압 속도검출기 편심 적용

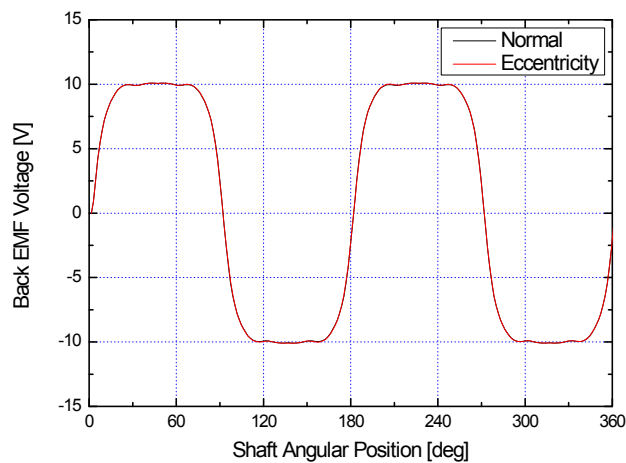


그림 4.12 사다리꼴 역기전압 속도검출기 편심 적용시 역기전압 해석 결과

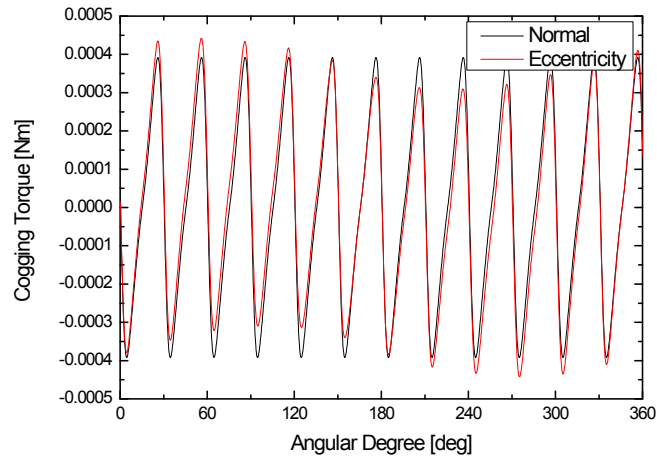


그림 4.13 사다리꼴 역기전압 속도검출기 편심 적용시 코깅 토크 해석 결과

이상의 해석 결과들을 종합하면, 회전축에 0.1 [mm]까지의 편심이 발생하더라도 역기전압 파형에는 거의 영향을 주지 않으며, 코깅 토크의 변동량도 매우 적기 때문에, 설계된 사다리꼴 역기전압 영구자석 속도검출기는 회전축의 편심에 의한 영향을 고려하여도 안정적으로 정상 동작이 가능함을 알 수 있다.

온도 변화에 의한 영향 검토 결과는 다음과 같다. 해석에 필요한 온도 변화 범위는 미 군사 환경 규격인 MIL-STD-810 “Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests” 및 국내의 육군 및 해군 운용 유도무기 환경 규격을 모두 비교하여 선정하였으며, 이들 중 최저 온도 규격은 국내 육군 유도무기 환경 규격의  $-32$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]이고, 최고 온도 규격은 국내 해군 유도무기 환경규격인  $71$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]로 파악되었다. 하지만, 고온 규격의 경우 주변 환경에 의한 추가 온도상승 요인이 있을 수 있으므로 최종 온도 변화 범위는  $-32 \sim 100$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]로 선정하였다. 그림 4.14는 상온 조건에서 사다리꼴 영구자석 속도검출 발전기를 11,600 [rpm]으로 12분간 연속으로 실제 운용하면서 상승 온도를 측정한 결과

이며, 이를 통하여 피검출 대상체인 전동기의 온도는 급격히 상승하지만 영구자석 속도검출기 자체의 온도 변화는 3.5 [°C] 수준으로 자체 발열은 거의 미미한 것으로 파악되었다. 따라서, 앞서 선정된 온도 변화 범위인 -32 ~ 100 [°C] 조건으로 해석을 수행하면, 거의 모든 운용 환경 조건을 고려하는 것임을 알 수 있다. 온도 변화에 의한 영향성 검토를 위하여 속도검출기에 사용된 Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> 자석 성능곡선의 온도변화율을 적용하여 유한요소법을 이용한 해석을 실시하였으며, 해석 결과는 표 4.6과 같다. 표 4.6을 통하여 사다리꼴 역기전압 속도검출기의 상온에 대한 최저 및 최고 온도시 역기전압의 최대치 변화율이 2.5 [%] 이내로 안정적으로 나타나는 것을 알 수 있으며, 역기전압의 리플은 저온에서는 증가하는 방향 및 고온에서는 감소하는 방향으로 나타나나, 그 변화량은 매우 작음을 알 수 있다. 따라서, 군사 운용 온도 규격을 감안한 온도 변화를 고려하여도 설계된 사다리꼴 역기전압 속도검출기가 안정적으로 동작이 가능함을 알 수 있다.

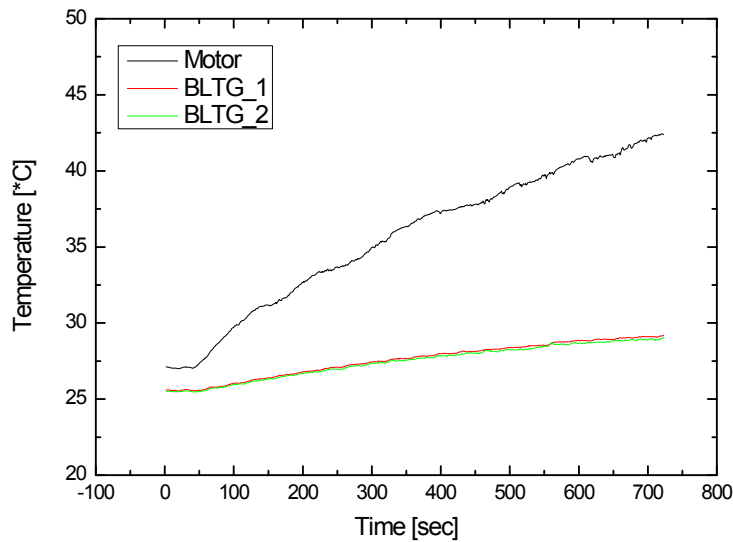


그림 4.14 사다리꼴 역기전압 속도검출기 상온 운용시 온도 변화량

표 4.6 사다리꼴 역기전압 속도검출기 온도변화 해석 결과

	-32 [°C]	20 [°C]	71 [°C]	100 [°C]
역기전압 최대치 [V]	10.148 (+1.379 [%])	10.010	9.847 (-1.628 [%])	9.763 (-2.468 [%])
역기전압 리플 [V]	0.220	0.212	0.207	0.203

부하 변동에 의한 영향 검토 결과는 다음과 같다. 적용 대상인 전기식 유도탄 날개 구동장치에 사용된 전동기의 최대 운용속도인 11,000 [rpm]으로 사다리꼴 역기전압 속도검출기를 회전시킬 때, 속도검출기에 흐르는 전류는 그림 4.15와 같다. 그림 4.15는 속도검출기 계측단의 입력저항이 100 [kΩ]인 경우 및 일반적인 연산 증폭기(Operational Amplifier) 입력저항에 해당하는  $10^9$  [kΩ]인 경우에 대한 속도검출기 전류 계측 결과이다. 일반적인 센서 계측회로의 입력저항은 임피던스 매칭 문제를 고려하여 높게 유지하므로, 100 [kΩ]을 계측단의 최소 입력저항으로 선정하였다. 그림 4.15로부터 알 수 있는 바와 같이 사다리꼴 역기전압 속도검출기에 흐르는 전류는 최대 0.3 [mA]를 초과하지 않는 것으로 계측되었으나, 여유분을 고려하여 3배정도의 전류인 1.0 [mA]를 기준으로 사다리꼴 역기전압 속도검출기에 대하여 부하 변동에 대한 유한요소법을 이용한 해석을 실시한 결과, 부하 토크는  $4.007 \times 10^{-3}$  [Nm] 이하의 작은 값을 가지는 것으로 파악되었다. 이상의 결과를 종합하면, 사다리꼴 역기전압 속도검출기의 부하 변동에 의한 역토크의 영향은 매우 작음을 알 수 있다. 또한, 설계 단계에서부터 사다리꼴 역기전압 속도검출기의 회전자 관성을 작게 설계함으로써, 부가적인 회전자 관성의 영향을 최소화하였으며, 최종 설계된 사다리꼴 역기전압 속도검출기 회전자 관성 설계치는  $1.977 \times 10^{-7}$  [kgm<sup>2</sup>]이다.

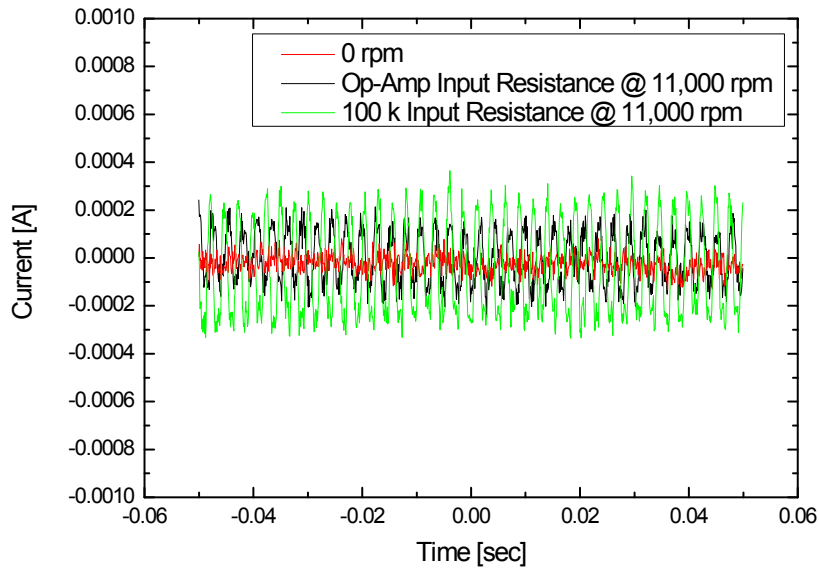


그림 4.15 사다리꼴 역기전압 속도검출기 전류 계측 결과  
(11,000 [rpm] 회전시)

#### 4.3.2 정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 역기전압 최적화

정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 역기전압이 이상적인 정현파에 가깝게 생성되도록 제작하여야 속도출력의 오차를 최소화 할 수 있다. 따라서, 발전기로부터 생성된 정현파 역기전압 파형의 THD를 최소화할 수 있도록 자석의 외경 반지름  $R_2$  및 자석의 내경 중심으로부터 외경 중심까지의 거리  $L_2$ 를 최적화 설계변수로 선정하였다. 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기의 THD 최소화를 위한 설계변수를 그림 4.16에 나타내었으며, 표 4.7은 초기 모델에 대한 주요 사양을 나타낸다.

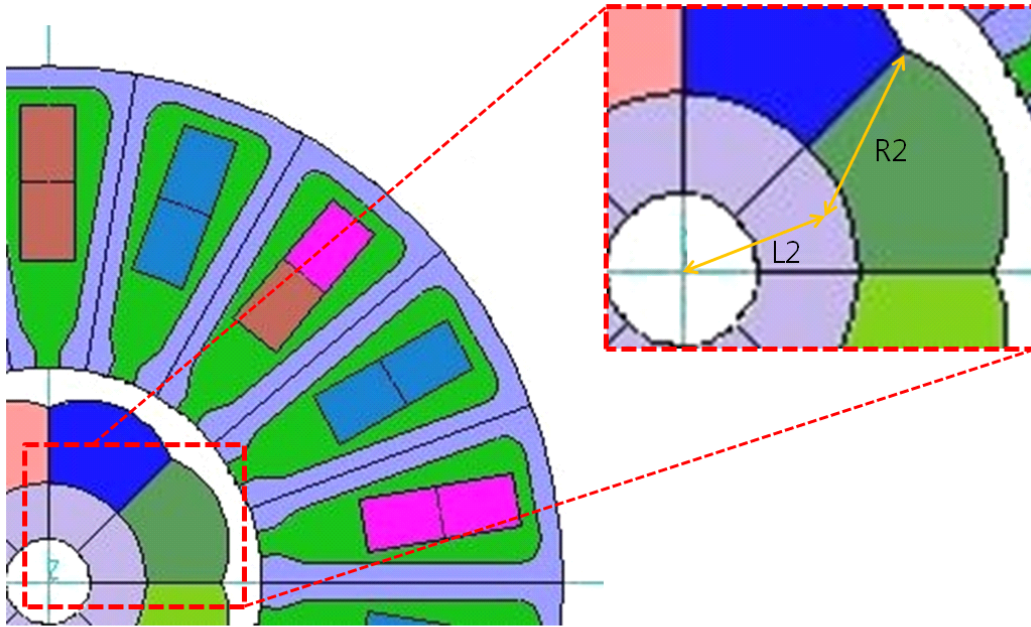


그림 4.16 정현과 역기전력 영구자석 속도검출기 설계 변수

표 4.7 정현과 역기전력 영구자석 속도검출기 초기 모델 사양

극수/슬롯수	8/18
자석 재질	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
코어 재질	35PN250
고정자 외경 [mm]	24
고정자 적층길이 [mm]	10
착자방향	Parallel
스큐	1.0



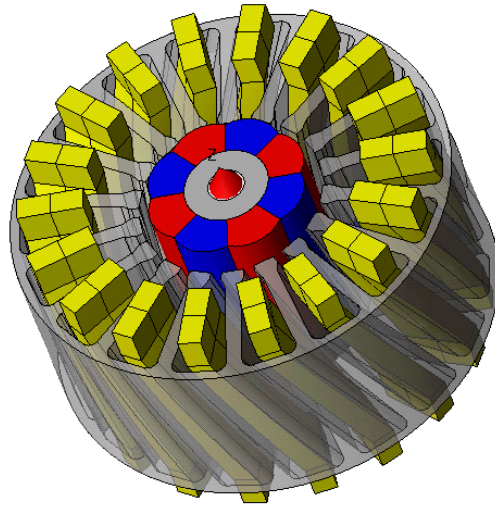
최적화 결과로부터 도출된 THD가 서로 비슷하다면 발생하는 역기전압의 최대치가 큰 값을 선택한다. 역기전압의 최대치는 속도 출력의 감도를 결정하는 척도가 되기 때문에 가능한 한 그 값이 클수록 좋다.

먼저 제안된 최적화 기법과 유한요소법을 이용한 해석을 통하여 역기전압의 THD가 가장 작은 값들을 후보해로 선정한 뒤, 역기전압의 최대치 및 코깅 토크를 비교하였다. 표 4.8은 3개의 후보해에 대한 결과를 나타낸다. 후보해 1이 역기전압 파형의 THD가 가장 작고 최대치가 가장 크기 때문에 후보해 1을 최종해로 선정하였다. 코깅 토크는 고정자 슬롯에 스큐를 적용하였기 때문에 3개의 후보해 모두 전반적으로 작은 값을 유지하고 있음을 알 수 있다.

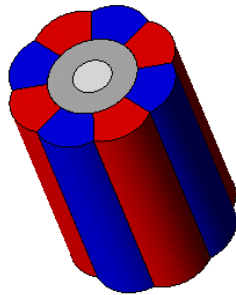
표 4.8 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 최적화 결과

	후보 1	후보 2	후보 3
R2 [mm]	2.20	2.60	3.88
L2 [mm]	2.20	1.74	0.44
THD	0.974	1.140	1.905
코깅 토크 [Nm]	$2.114 \times 10^{-6}$	$2.050 \times 10^{-6}$	$3.404 \times 10^{-6}$
역기전압 최대치 [V]	10.408	10.011	10.24

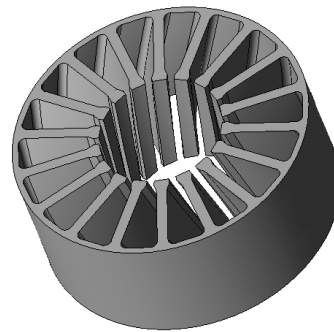
정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 설계안으로 최종 선정된 후보해 1의 해석 모델 형상은 그림 4.17과 같다.



(a) 전체 조립 형상



(b) 회전자



(c) 고정자

그림 4.17 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 해석 모델 형상

최종해로 선정된 후보해 1에 대하여 실제 제작 및 적용에 대한 타당성을 사전 검증하기 위하여 공극 변화에 의한 영향, 온도 변화에 의한 영향 및 부하 변동에 의한 영향을 유한요소법을 이용한 해석을 통하여 추가 검증하였다.

공극 변화에 의한 영향 검토 결과는 다음과 같다. 4.3.1절과 마찬가지로 이유로 정현파 역기전압 속도검출기의 회전축이 0.1 [mm]까지 편심이 가능하다고 가정한 후, 이에 대하여 유한요소법을 적용한 해석을 실시하였다. 정현파 역기전압 속도검출기에 적용된 편심을 그림으로 나타

내면 그림 4.18과 같으며, 해석된 역기전압 파형 및 코깅 토크 해석 결과는 그림 4.19 및 그림 4.20과 같다.

이상의 해석 결과들을 종합하면, 회전축에 0.1 [mm]까지의 편심이 발생하더라도 역기전압 파형에는 거의 영향을 주지 않으며, 코깅 토크의 변동량도 매우 적기 때문에, 설계된 정현파 역기전압 영구자석 속도검출기는 회전축의 편심에 의한 영향을 고려하여도 안정적으로 정상 동작이 가능함을 알 수 있다.

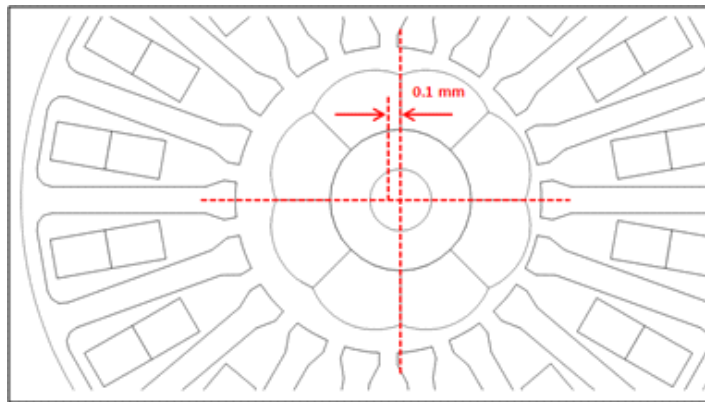


그림 4.18 정현파 역기전압 속도검출기 편심 적용

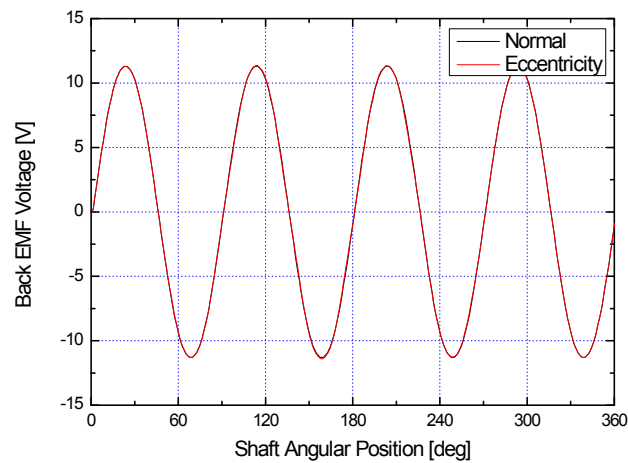


그림 4.19 정현파 역기전압 속도검출기 편심 적용시 역기전압 해석 결과

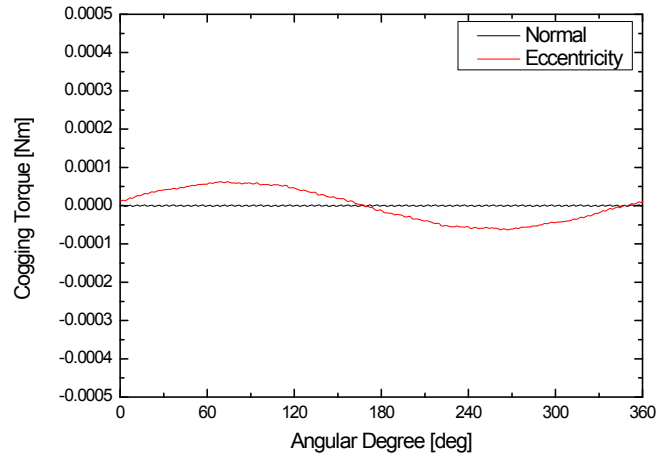


그림 4.20 정현파 역기전압 속도검출기 편심 적용시 코깅 토크 해석 결과

온도 변화에 의한 영향 검토 결과는 다음과 같다. 해석에 필요한 온도 변화 범위는 4.3.1절과 마찬가지로 이유로  $-32 \sim 100$  [°C]로 선정하였다. 온도 변화에 의한 영향성 검토를 위하여 속도검출기에 사용된  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  자석 성능곡선의 온도변화율을 적용하여 유한요소법을 이용한 해석을 실시하였으며, 해석 결과는 표 4.9와 같다. 표 4.9를 통하여 정현파 역기전압 속도검출기의 상온에 대한 최저 및 최고 온도시 역기전압의 최대치 변화율이 2.4 [%] 이내로 안정적으로 나타나는 것을 알 수 있으며, 역기전압의 THD는 저온에서는 증가하는 방향 및 고온에서는 감소하는 방향으로 나타나나, 그 변화량은 매우 작음을 알 수 있다. 따라서, 군사 운용 온도 규격을 감안한 온도 변화를 고려하여도 설계된 정현파 역기전압 속도검출기가 안정적으로 동작이 가능함을 알 수 있다.

표 4.9 정현파 역기전압 속도검출기 온도변화 해석 결과

	-32 [°C]	20 [°C]	71 [°C]	100 [°C]
역기전압 최대치 [V]	10.562 (+1.480 [%])	10.408	10.254 (-1.480 [%])	10.166 (-2.325 [%])
THD	0.991	0.974	0.966	0.963

부하 변동에 의한 영향 검토 결과는 다음과 같다. 적용 대상인 전기식 유도탄 날개 구동장치에 사용된 전동기의 최대 운용속도인 11,000 [rpm]으로 정현파 역기전압 속도검출기를 회전시킬 때, 속도검출기에 흐르는 전류는 그림 4.21과 같다. 사다리꼴 역기전압 속도검출기의 경우와 마찬가지로 그림 4.21은 속도검출기 계측단의 입력저항이 100 [kΩ]인 경우 및 일반적인 연산 증폭기(Operational Amplifier) 입력저항에 해당하는  $10^9$  [kΩ]인 경우에 대한 속도검출기 전류 계측 결과이다. 그림 4.21로부터 알 수 있는 바와 같이 정현파 역기전압 속도검출기에 흐르는 전류는 최대 0.3 [mA]를 초과하지 않는 것으로 계측되었으나, 여유분을 고려하여 3배정도의 전류인 1.0 [mA]를 기준으로 정현파 역기전압 속도검출기에 대하여 부하 변동에 대한 유한요소법을 이용한 해석을 실시한 결과, 부하 토크는  $2.144 \times 10^{-5}$  [Nm] 이하의 작은 값을 가지는 것으로 파악되었다. 이상의 결과를 종합하면, 정현파 역기전압 속도검출기의 부하 변동에 의한 역토크의 영향은 매우 작음을 알 수 있다. 또한, 설계 단계에서부터 정현파 역기전압 속도검출기의 회전자 관성을 작게 설계함으로써, 부가적인 회전자 관성의 영향을 최소화하였으며, 최종 설계된 정현파 역기전압 속도검출기 회전자 관성 설계치는  $6.113 \times 10^{-8}$  [kgm<sup>2</sup>]이다.

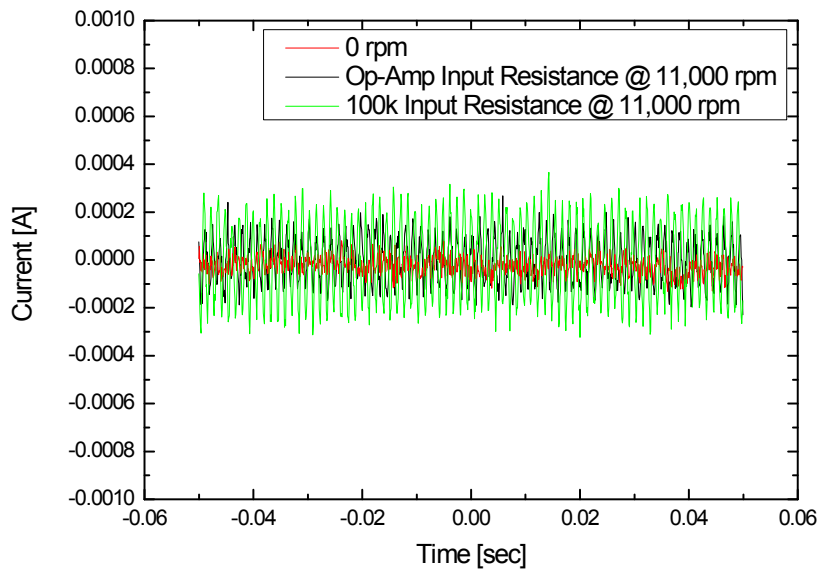


그림 4.21 정현파 역기전압 속도검출기 전류 계측 결과  
(11,000 [rpm] 회전시)

그림 4.22는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 최적화 과정을 나타낸다. 제안된 설계 과정에서는 종료 조건을 만족할 때까지 최적화 알고리즘을 반복하면서 획득된 모든 정보들이 목적함수 대리모델의 품질을 향상시키는데 기여함으로써, 최적화 과정의 수렴 속도를 효율적으로 증가시킨다.

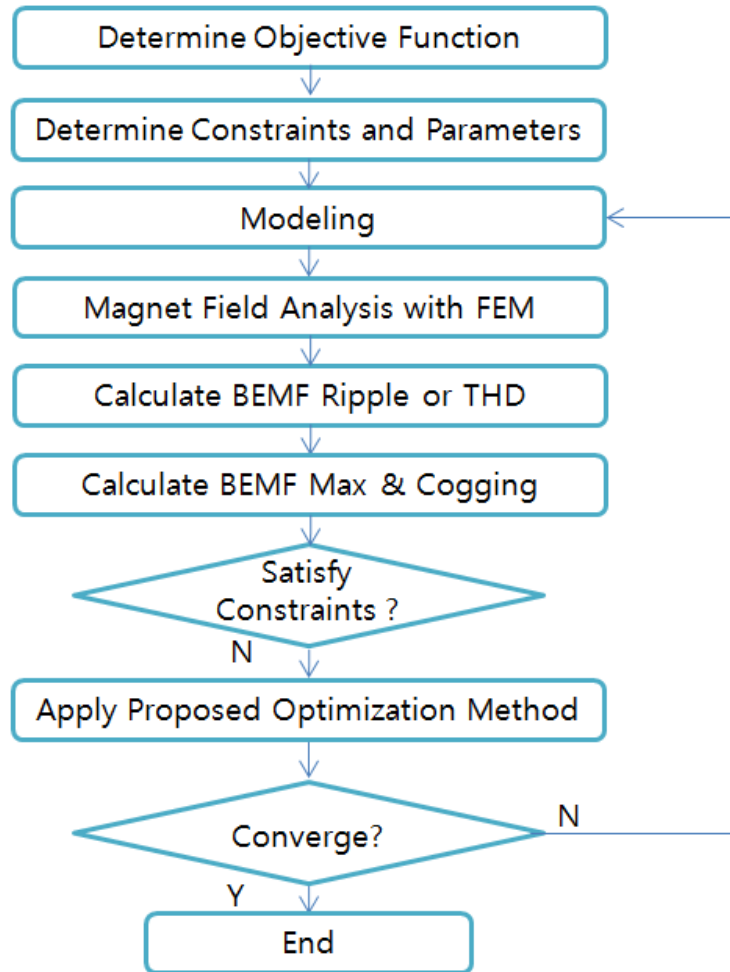
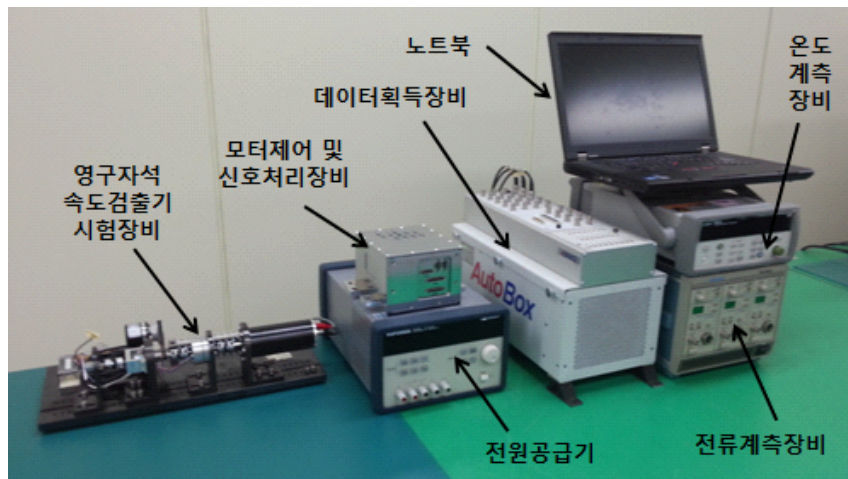


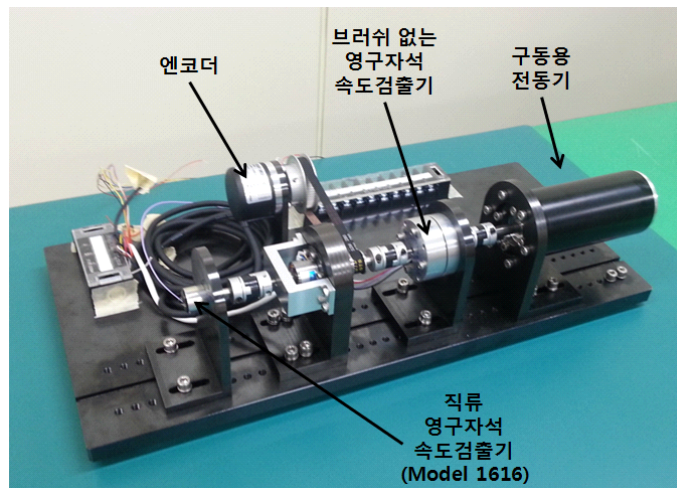
그림 4.22 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 최적화 과정

## 제 5 장 시제품 설계, 제작 및 평가

본 연구에서 제안된 사다리꼴 역기전압 및 정현파 역기전압을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 설계 기법 및 최적화 알고리즘과 결합된 설계 절차를 검증하기 위하여 시제품을 설계, 제작하여 시험 평가를 수행하였다. 그림 5.1은 시험 구성도를 보여 준다.



(a) 전체 구성도



(b) 영구자석 속도검출기 시험장비

그림 5.1 시험 구성도



## 5.1 사다리꼴 역기전력을 이용한 속도검출기 시제품

사다리꼴 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기 시제품의 단면도 및 실물 사진을 그림 5.2 및 그림 5.3에 나타내었다.

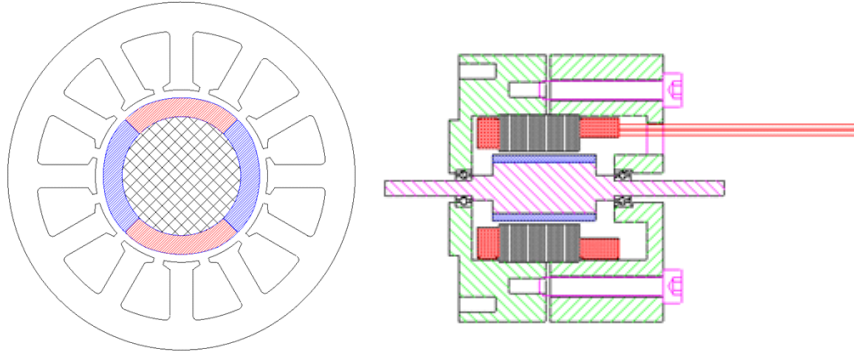
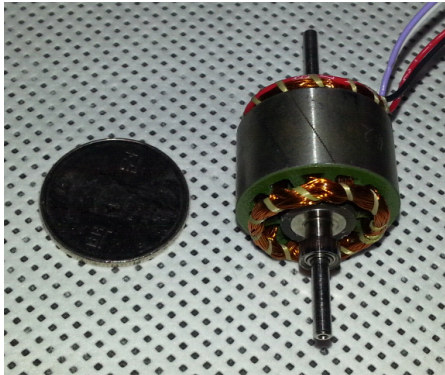
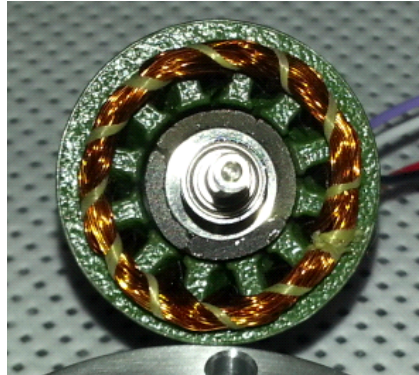


그림 5.2 사다리꼴 역기전압 이용 영구자석 속도검출기 시제품 단면도



(a) 전체 조립사진 1



(b) 전체 조립사진 2



(c) 회전자



(d) 고정자

그림 5.3 사다리꼴 역기전압 이용 영구자석 속도검출기 실물 사진

### 5.1.1 역기전압

본절에서는 사다리꼴 역기전압을 이용한 영구자석 속도검출기 시제품의 역기전력에 대한 해석결과와 시험결과를 비교하고자 한다.

그림 5.4는 11,000 [rpm] 구동시 발전기 역기전압 파형의 해석결과와 실험결과를 비교하여 보여 준다. 설계시 적용했던 재질 특성과 동일한 철심과 자석을 시제품에 적용하였으며, 해석결과와 실험결과가 오차 없이 매우 유사함을 알 수 있다.

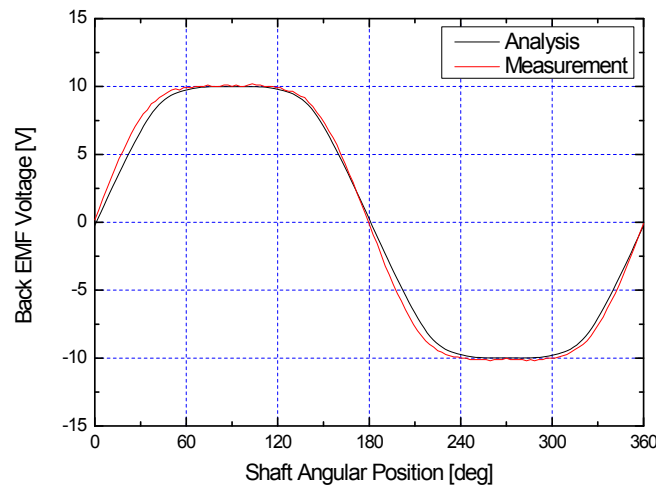


그림 5.4 역기전압 해석결과 및 실험결과

### 5.1.2 속도출력

사다리꼴 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기의 동작특성을 확인하기 위하여 100 [rpm], 1,000 [rpm] 및 10,000 [rpm]에 대하여 속도출력 계측시험을 수행하였으며, 그 결과는 각각 그림 5.5, 그림 5.6 및 그림 5.7과 같다. 100 [rpm] 및 1,000 [rpm] 시험에 대하여 모두 독일의 Faulhaber사에서 군사용으로 제작되어 현재 타 유도탄 구동장치에 적용

되고 있는 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기와 성능 비교를 수행하였다. Faulhaber사의 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기는 브러쉬를 가지고 있는 타입이어서, 최대 5,000 [rpm]까지 연속동작 운용이 가능하며, 피크간 리플은 7 [%]이고,  $\pm 2$  [%]의 선형성을 가진다. 참고를 위하여 비록 크기가 크고 군사용 규격을 만족하도록 제작되지는 않았지만, 속도출력값이 영구자석 속도검출기보다 좀 더 정확한 엔코더 신호도 함께 비교하였다. 그림 5.5 및 그림 5.6의 시험결과를 통하여 본 연구에서 제작된 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 시제품이 Faulhaber사 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기보다 속도 출력 신호의 리플이 작고, 좀 더 정확한 속도계측이 가능함을 확인할 수 있다. 10,000 [rpm] 동작에 대한 시험결과는 그림 5.7과 같으며, 제작된 시제품은 고속에서도 원활히 동작함을 확인할 수 있었다. Model 1616 직류 영구자석 속도검출기는 운용범위에서 벗어나므로, 비교시험을 수행하지는 않았다.

사다리꼴 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기의 동적인 특성을 확인하기 위하여 정지에서부터 5,000 [rpm]까지의 스텝 입력을 인가하고 특성을 확인하였으며, 그 결과는 그림 5.8과 같다. 역시 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기와 비교 시험을 수행하였으며, 그 결과 본 연구에서 제작된 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기가 더 정확하고 빠른 동적 특성을 보여줌을 확인하였다.

제작된 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 시제품의 속도 출력 선형성을 확인하기 위하여 -11,000 [rpm] ~ +11,000 [rpm] 영역에 대하여 선형성 계측시험을 수행하였으며, 그 결과는 표 5.1 및 그림 5.9와 같다. 상기의 시험결과로부터 제작된 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 시제품은 광범위한 속도영역에 걸쳐  $\pm 0.6$  [%] 이내의 매우 우수한 선형성을 가지고 있음을 알 수 있다.

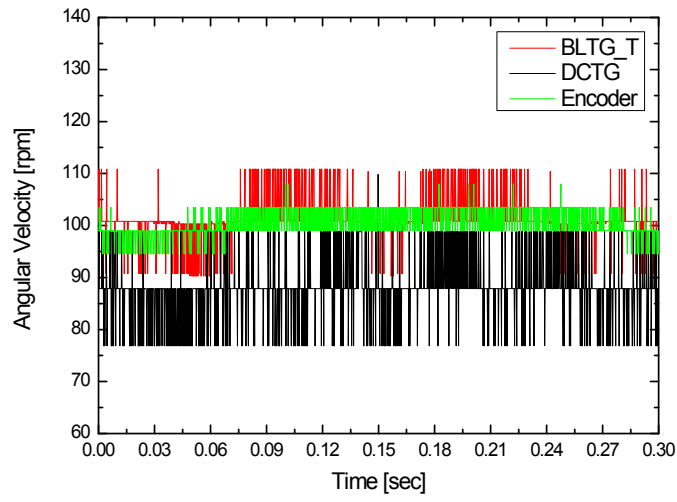


그림 5.5 속도 출력 비교 (100 [rpm])

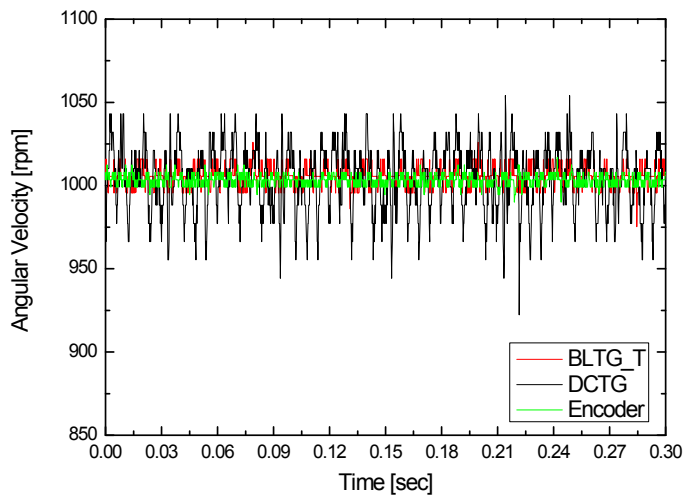


그림 5.6 속도 출력 비교 (1,000 [rpm])

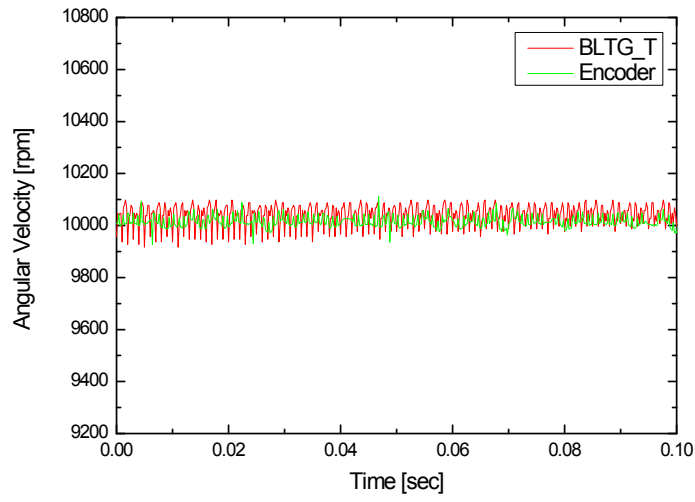


그림 5.7 속도 출력 비교 (10,000 [rpm])

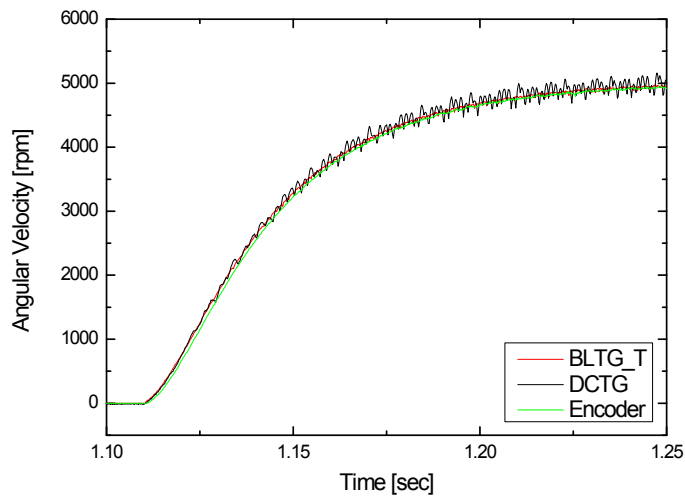


그림 5.8 속도 출력 비교 (0 ⇒ 5,000 [rpm])

표 5.1 사다리꼴 역기전압 속도검출기 선형성 확인시험

기준속도 [rpm]	시제품 속도출력 [rpm]	오차 [%]
-11,000	-11,017.60	0.16
-10,000	-10,028.90	0.29
-9,000	-9,019.05	0.21
-8,000	-8,015.48	0.19
-7,000	-7,013.10	0.19
-6,000	-6,009.52	0.16
-5,000	-5,011.90	0.24
-4,000	-4,005.36	0.13
-3,000	-3,007.62	0.25
-2,000	-2,005.83	0.29
-1,000	-1,005.60	0.56
0	0.00	0.00
1,000	1,004.11	0.411
2,000	2,005.71	0.29
3,000	3,005.24	0.17
4,000	4,007.02	0.18
5,000	5,016.07	0.32
6,000	6,025.90	0.43
7,000	7,007.14	0.10
8,000	8,009.52	0.12
9,000	9,014.58	0.16
10,000	10,035.30	0.35
11,000	11,014.60	0.13

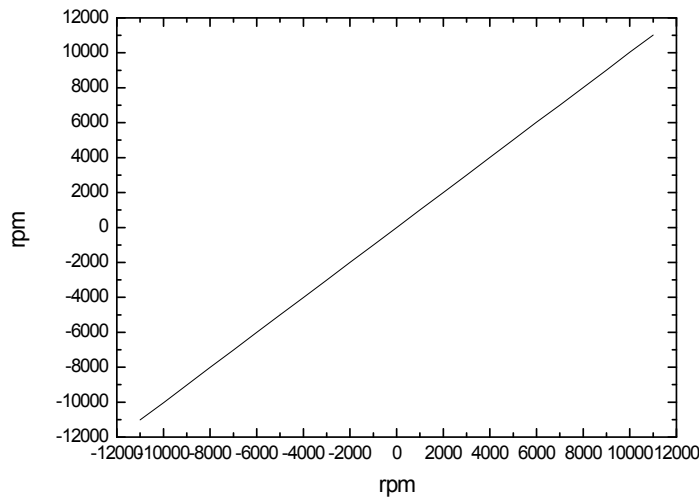


그림 5.9 사다리꼴 역기전압 속도검출기 선형성 그래프

### 5.1.3 초저속 영역 운용 특성

제안된 사다리꼴 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기에 대한 초저속 영역에서의 동작특성을 확인하기 위하여 5 [rpm], 및 10 [rpm]에 대한 속도출력 계측시험을 수행하였다.

초저속 영역에서는 영구자석 속도검출기의 역기전압이 매우 작게 나타나기 때문에 Analog Devices사의 Instrumentation Amplifier AD624를 이용하여 하드웨어적으로 역기전압을 증폭시킨 후, 이를 신호처리함으로써 초저속 영역에서의 속도검출 정확도를 높였다.

그림 5.10 및 그림 5.11은 초저속 영역에 대하여 본 연구에서 제안된 사다리꼴 역기전력 이용 영구자석 속도검출기와 Faulhaber사 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기 및 엔코더를 이용하여 속도를 계측한 시험결과를 나타낸다. 시험결과로부터 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기의 분해능은  $\pm 10$  [rpm]이고, 엔코더의 분해능은  $\pm 4.5$  [rpm]으로 계측되었으며, 제안된 사다리꼴 역기전압 이용 영구자석 속도검출기는 이

보다 훨씬 더 미세한 분해능을 보여줄 수 있다. 또한 제안된 사다리꼴 역기전압 이용 영구자석 속도검출기가 타 속도 센서들에 비하여 가장 우수한 정확도를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

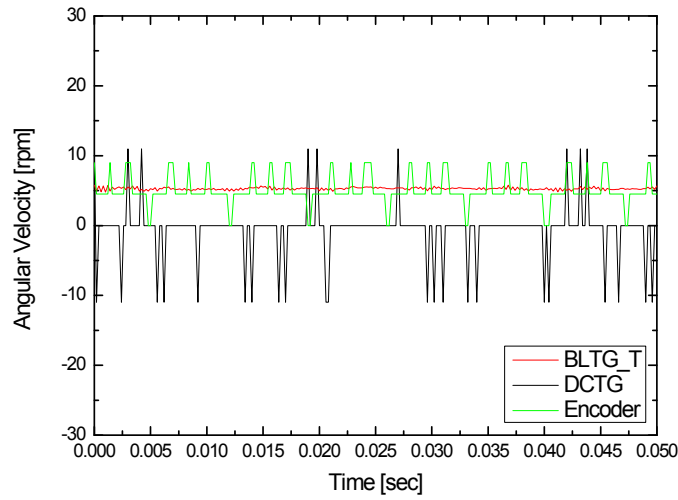


그림 5.10 초저속 영역 속도 출력 비교 (5 [rpm])

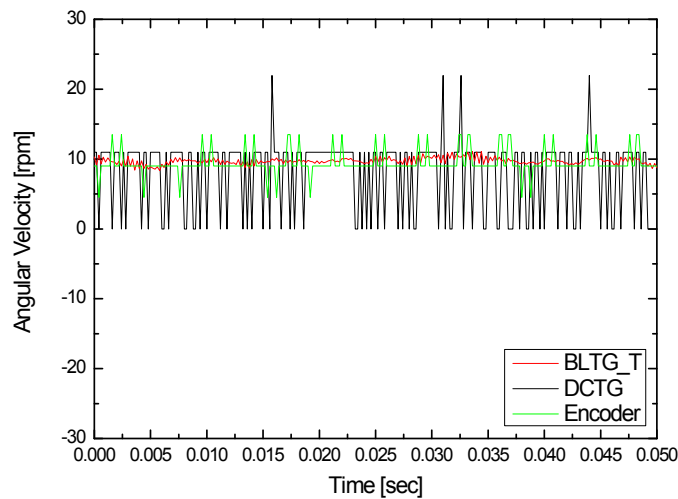


그림 5.11 초저속 영역 속도 출력 비교 (10 [rpm])



### 5.1.3 내고장성

제작된 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기 시제품에 C상 역기전압이 단선에 의해 고장이 발생하였다고 가정한 후, 본 논문에서 제안한 내고장성 확보 기법을 적용하여 C상을 복원한 결과는 그림 5.12와 같다. 그림 5.12에서 알 수 있는 바와 같이, 본 논문에서 제안한 내고장성 확보 기법이 잘 동작하고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 제안된 내고장성 확보 기법의 효용성을 잘 나타내고 있다.

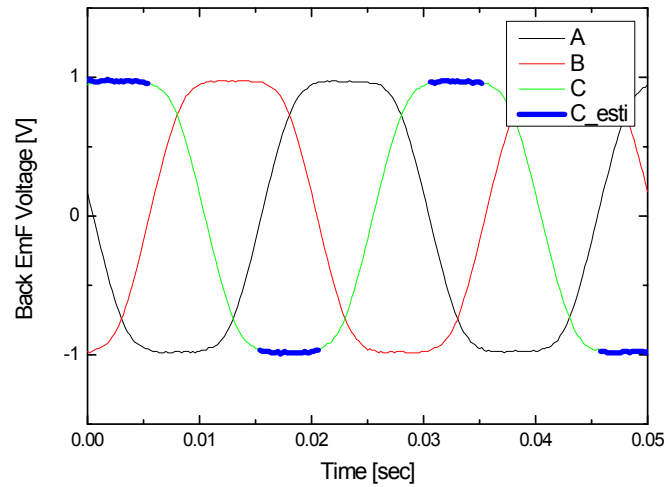


그림 5.12 사다리꼴 역기전압 속도검출기 내고장성

## 5.2 정현파 역기전력을 이용한 속도검출기 시제품

정현파 역기전압을 이용한 영구자석 속도검출기 시제품의 단면도 및 실물 사진을 그림 5.13 및 그림 5.14에 나타내었다.

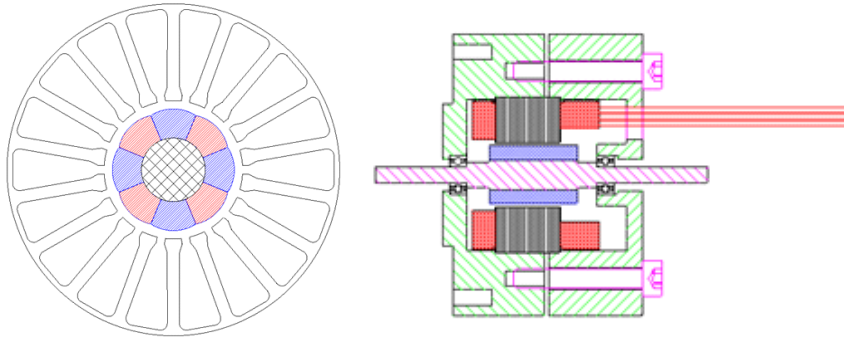
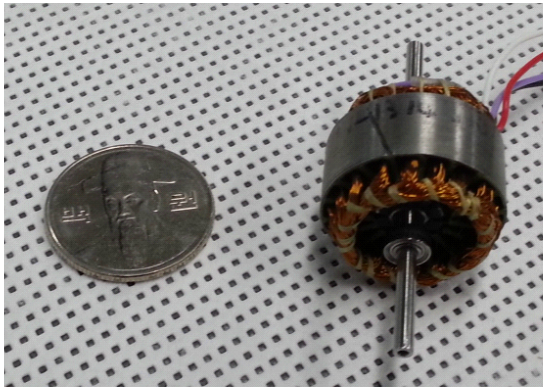


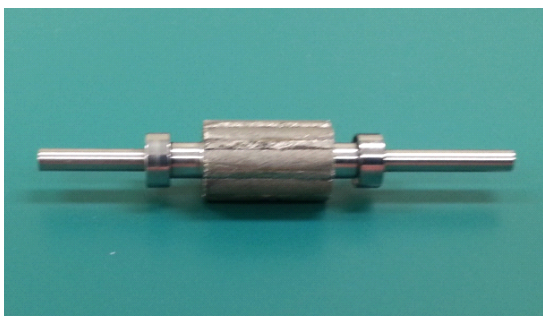
그림 5.13 정현파 역기전압 이용 영구자석 속도검출기 시제품 단면도



(a) 전체 조립사진 1



(b) 전체 조립사진 2



(c) 회전자



(d) 고정자

그림 5.14 정현파 역기전압 이용 영구자석 속도검출기 실물 사진

### 5.2.1 역기전압

그림 5.15는 11,000 [rpm] 구동시 발전기 역기전압 파형의 해석결과와 실험결과를 비교하여 보여 준다. 해석결과와 실험결과가 오차가 거의 없이 매우 유사함을 알 수 있다.

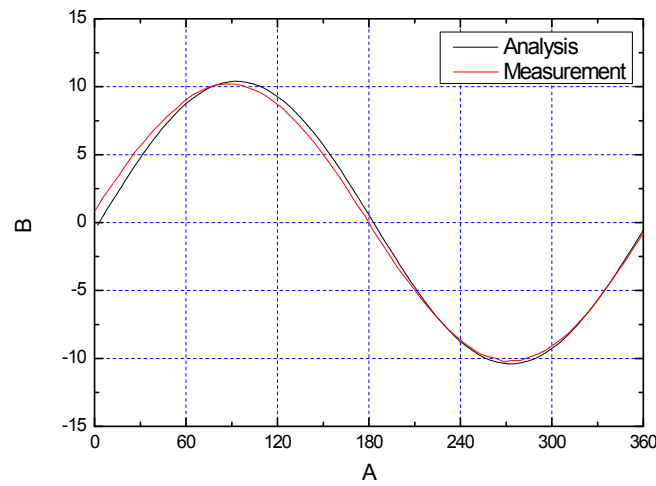


그림 5.15 역기전압 해석결과 및 실험결과

### 5.2.2 속도출력

정현파 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기의 동작특성을 확인하기 위하여 100 [rpm], 1,000 [rpm] 및 10,000 [rpm]에 대하여 시험을 수행하였으며, 그 결과는 각각 그림 5.16, 그림 5.17 및 그림 5.18과 같다. 100 [rpm] 및 1,000 [rpm] 시험에 대하여 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기와 동일하게 모두 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기와 성능 비교를 수행하였다. 참고를 위하여 사이즈가 크고 군용 규격을 가지고 있지는 않지만, 속도출력값이 영구자석 속도검출기보다 좀 더 정확한 엔코더 신호도 함께 비교하였다. 그림 5.16 및 그림 5.17의 시험결과

를 통하여 본 연구에서 제작된 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 시제품이 Faulhaber사 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기보다 속도 출력 신호의 리플이 작고, 좀 더 정확한 속도계측이 가능함을 확인할 수 있다. 10,000 [rpm] 동작에 대한 시험결과는 그림 5.18과 같으며, 제작된 시제품은 고속에서도 원활히 동작함을 확인할 수 있었다. 앞서 사다리꼴 역기전력 영구자석 속도검출기의 경우와 마찬가지로 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기는 운용범위에서 벗어나므로, 비교시험을 수행하지는 않았다.

정현파 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기의 동적인 특성을 확인하기 위하여 정지에서부터 5,000 [rpm]까지의 스텝 입력을 인가하고 특성을 확인하였으며, 그 결과는 그림 5.19와 같다. 역시 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기와 비교 시험을 수행하였으며, 그 결과 본 연구에서 제작된 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기가 더 정확하고 빠른 동적 특성을 보여줌을 확인하였다.

제작된 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 시제품의 속도 출력 선형성을 확인하기 위하여 -11,000 [rpm] ~ +11,000 [rpm] 영역에 대하여 선형성 계측시험을 수행하였으며, 그 결과는 표 5.2 및 그림 5.20과 같다. 상기의 시험결과로부터 제작된 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 시제품은 광범위한 속도영역에 걸쳐  $\pm 0.5$  [%] 이내의 매우 우수한 선형성을 가지고 있음을 알 수 있다.

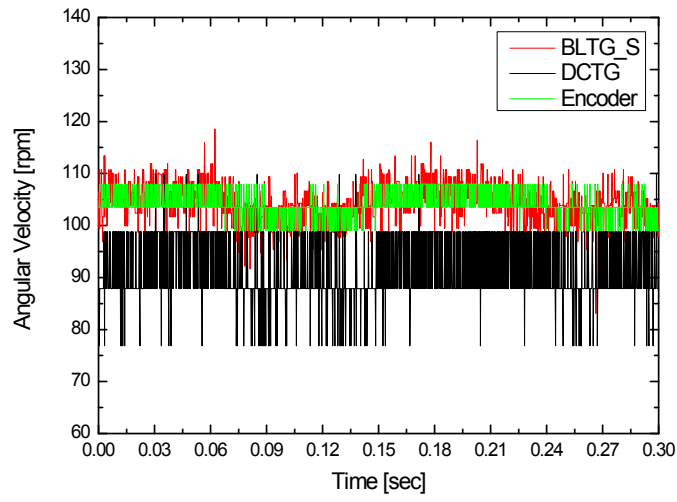


그림 5.16 속도 출력 비교 (100 [rpm])

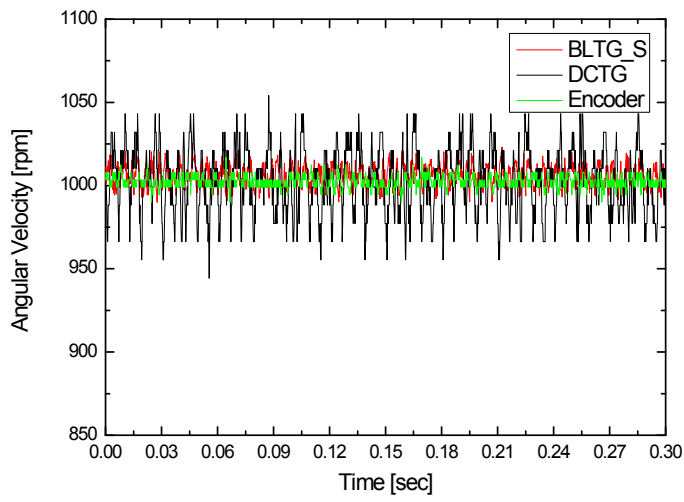


그림 5.17 속도 출력 비교 (1,000 [rpm])

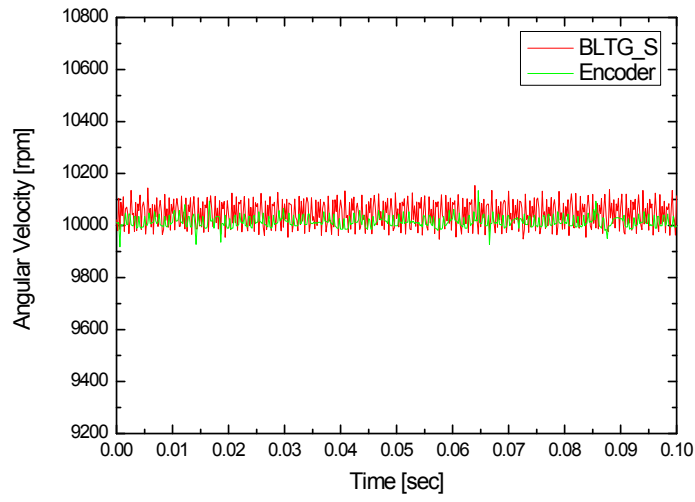


그림 5.18 속도 출력 비교 (10,000 [rpm])

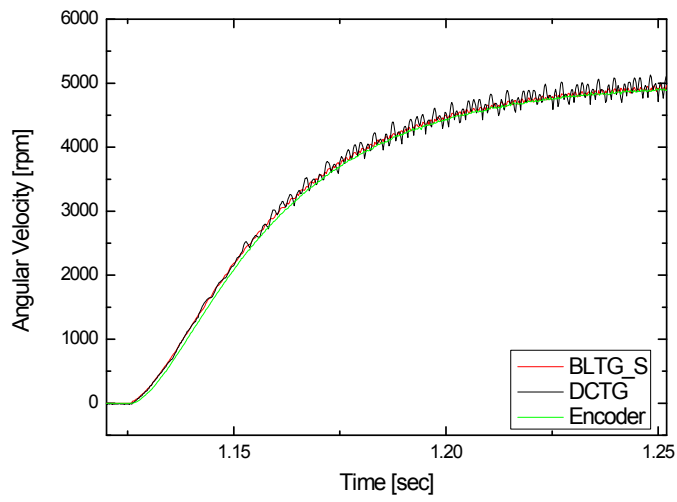


그림 5.19 속도 출력 비교 (0 ⇒ 5,000 [rpm])

표 5.2 정현파 역기전압 속도검출기 선형성 확인시험

기준속도 [rpm]	시제품 속도출력 [rpm]	오차 [%]
-11,000	-11,009.50	0.09
-10,000	-10,004.20	0.04
-9,000	-9,002.68	0.03
-8,000	-8,008.63	0.11
-7,000	-7,010.71	0.15
-6,000	-6,008.33	0.14
-5,000	-5,009.10	0.18
-4,000	-4,006.72	0.17
-3,000	-3,006.22	0.21
-2,000	-2,005.74	0.29
-1,000	-1,002.79	0.28
0	0.00	0.00
1,000	1,004.39	0.44
2,000	2,005.58	0.28
3,000	3,004.10	0.14
4,000	4,002.44	0.06
5,000	5,011.71	0.23
6,000	6,019.17	0.32
7,000	7,018.38	0.26
8,000	8,018.26	0.23
9,000	8,995.61	-0.05
10,000	10,015.20	0.15
11,000	11,023.60	0.21

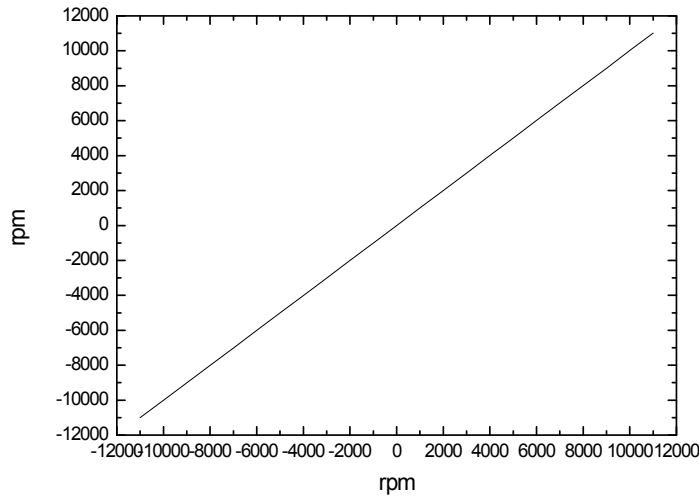


그림 5.20 정현파 역기전압 속도검출기 선형성 그래프

### 5.2.3 초저속 영역 운용 특성

제안된 정현파 역기전력을 이용한 영구자석 속도검출기에 대한 초저속 영역에서의 동작특성을 확인하기 위하여 5 [rpm] 및 10 [rpm]에 대한 속도출력 계측시험을 수행하였다.

초저속 영역에서는 영구자석 속도검출기의 역기전압이 매우 작게 나타나기 때문에 사다리꼴 역기전압 이용 영구자석 속도검출기의 경우와 마찬가지로 Analog Devices사의 Instrumentation Amplifier AD624를 이용하여 하드웨어적으로 역기전압을 증폭시킨 후, 이를 신호처리함으로써 초저속 영역에서의 속도검출 정확도를 높였다.

그림 5.21 및 그림 5.22는 초저속 영역에 대하여 본 연구에서 제안된 정현파 역기전력 이용 영구자석 속도검출기와 Faulhaber사 Model 1616 직류 영구자석 속도검출기 및 엔코더를 이용하여 속도를 계측한 시험결과를 나타낸다. 시험결과로부터 사다리꼴 역기전압 이용 영구자석 속도검출기의 경우와 마찬가지로 제안된 정현파 역기전압 이용 영구자석 속



도검출기가 타 속도 센서들에 비하여 훨씬 더 미세한 분해능을 보여주는 것을 알 수 있으며, 또한 가장 우수한 정확도를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

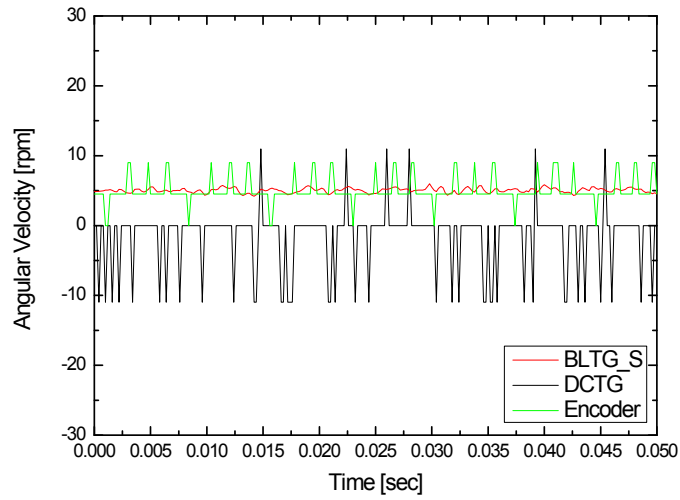


그림 5.21 초저속 영역 속도 출력 비교 (5 [rpm])

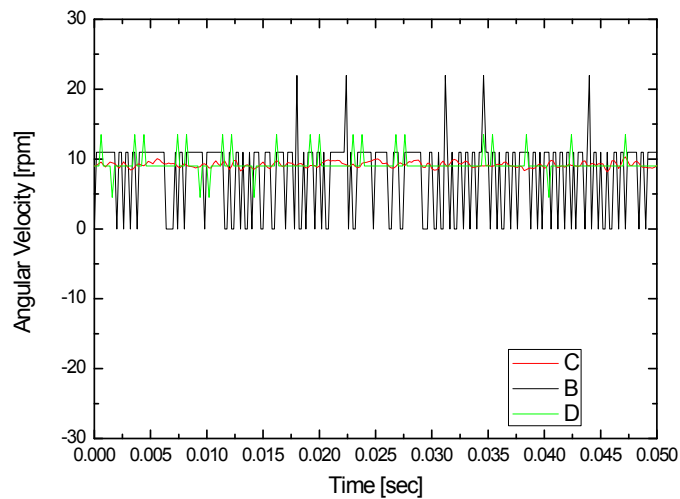


그림 5.22 초저속 영역 속도 출력 비교 (10 [rpm])

### 5.2.3 내고장성

제작된 정현파 역기전력 영구자석 속도검출기 시제품에 C상 역기전압이 단선에 의해 고장이 발생하였다고 가정한 후, 본 논문에서 제안한 내고장성 확보 기법을 적용하여 C상을 복원한 결과는 그림 5.23과 같다. 그림 5.23에서 알 수 있는 바와 같이, 본 논문에서 제안한 내고장성 확보 기법이 잘 동작하고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 제안된 내고장성 확보 기법의 효용성을 잘 나타내고 있다.

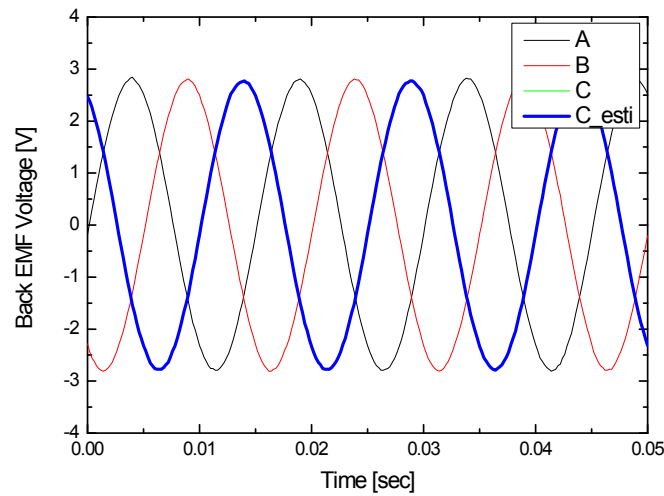


그림 5.23 정현파 역기전압 속도검출기 내고장성

## 제 6 장 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 이용한 유도탄 날개 구동장치 공탄성 진동 억제 제어

본 장에서는 제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 이용하여 유도탄 날개 구동장치에 발생한 공기역학적 간섭에 의한 공탄성 진동을 효과적으로 억제하는 제어 기법을 제안하고, 그 시험결과를 기술한다.

### 6.1 유도탄 날개 공탄성 진동 현상

전동기에 의해 구동되는 전기식 유도탄 날개 구동장치는 비행 중에 기계적인 백래쉬와 같은 자기 자신의 비선형적인 특성과 공기역학적 부하와의 상호작용을 겪게 된다. 또한 최근 개발되는 유도탄은 좀 더 복잡하고 확장된 임무 수행을 위하여, 감소된 무게를 가지면서도 공기역학적으로 효율적인 기체 구조물을 요구하게 되고, 이는 날개 구동장치가 상대적으로 유연한 기체 구조물에 장착되는 결과를 낳는다. 이러한 날개 구동장치에 불리한 여러가지 요인들이 복합적으로 상호 작용하여 날개 구동장치에 과도한 공기역학적 공탄성 진동이 외란의 형태로 인가되게 되고, 이는 비행 성능의 저하 뿐만 아니라, 영구적인 구조 손상으로 인해 구동장치 혹은 날개가 파손되는 결과를 도출할 수 있다. 따라서 유도탄 날개 구동장치의 설계 과정에서 공탄성 진동으로 인한 불안정성에 대한 정확한 예측과 효과적인 능동 제어가 필수적으로 고려되어야만 한다 [83]-[87].

최근 들어 이러한 공탄성 진동을 Linear Quadratic Regulator(LQR), 신경 회로망 제어 및 적응제어 등의 최신 제어 기법을 이용하여 능동적으로 제어하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 이러한 연구는 상대적으로 큰 구조물인 항공기의 날개 문제에 집중되고 있으며, 현

재까지 유도탄 날개 구동장치의 공탄성 진동에 대한 능동 제어를 다루는 문헌은 보고되고 있지 않다. 또한 현재까지 진행된 항공기 날개의 공탄성 진동 억제를 위한 대부분의 제어기법들이 복잡한 고차의 공기역학 모델을 포함하고 있어 계산시간이 오래 걸리고, 고성능의 병렬 프로세서를 요구하게 되어 실제 문제에 적용시 하드웨어적인 실장이 어려우며, 공탄성 진동에 대한 반응시간이 늘어나는 등의 문제점들을 가지고 있다 [88]-[96].

따라서 본 논문에서는 복잡한 공기역학 모델의 사용을 배제하고, 진동 및 충격 등과 같은 가혹한 군사환경에 대한 내환경성이 우수한 제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기에서 생성된 날개 구동기 속도신호를 이용하여 공탄성 진동을 추정함으로써, 계산상의 효율성 및 단순한 제어 루프 구조를 가지는 공탄성 능동 제어 기법을 제안하고, 이에 대한 시험을 수행하여, 제안된 제어 기법의 타당성을 검증한다.

## 6.2 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 이용한 공탄성 진동 억제 제어

본 논문에서 제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 진동 및 충격 등과 같은 가혹한 군사환경 상황 하에서도 정상동작이 보장되는 강건한 구조를 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 유도탄 날개 구동장치에 적용하고, 이로부터 측정되는 속도신호를 이용하여 유도탄 날개 구동장치에 발생한 공탄성 진동을 추정함으로써, 공탄성 진동을 효과적으로 억제하는 제어 기법을 제안한다. 제안된 공탄성 진동 능동 억제 제어 기법은 공기역학 모델과 같은 복잡한 계산을 사용하지 않기 때문에 기존의 기법들에 비해 계산량이 월등히 줄어들어 유도탄 실물 제어기에 하드웨어적인 실장이 용이하며, 공탄성 진동에 대한 반응시간이 짧아지는 장점을 가진다.

본 절에서 사용된 기호의 설명 및 해당 단위는 표 6.1과 같다.

표 6.1 기호 설명 및 단위

기호	설명	단위
$u(t)$	전동기 입력전압	[V]
$y(t)$	날개 회전각도	[deg]
$\theta_m(t)$	전동기 회전각도	[deg]
$\omega_m(t)$	전동기 회전각속도	[deg/sec]
$N$	정규 기어비	-
$\tau_m$	기계적 시상수	sec
$b_m$	입력 이득	-
$R_m$	전동기 저항	[ $\Omega$ ]
$J_e$	전동기 관성	lb-in-sec <sup>2</sup>
$B$	전동기 점성 감쇠 계수	lb-in/deg/sec
$K_T$	전동기 토오크 상수	lb-in/A
$K_B$	전동기 역기전압 상수	volt/deg/sec
d	외란 토오크	lb-in
$\xi$	계측 노이즈	[V]

### 6.2.1 전기식 유도탄 날개 구동장치 구조 및 모델링

제어 기법의 상세 설명에 앞서, 먼저 시험대상물인 전기식 유도탄 날개 구동장치의 구성과 수학 모델을 살펴본다.

전기식 유도탄 날개 구동 시스템의 세부 구성도는 그림 6.1과 같다. 전기식 구동장치는 전동기, 기어 메카니즘, 회전각도 센서 및 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기로 구성된다. 전자제어부는 마이크로 프로세서로

제어되는 펄스폭 제어 방식의 서보 증폭기로 구성된다. 유도탄 날개는 공간 활용성을 높이기 위하여 접는 날개 방식으로 설계되어 있다. 따라서, 유도탄 날개는 제작 공차와 힌지 구조로 인하여 구조적인 비선형성을 가지게 되며, 이는 공탄성 진동에 불리한 조건으로 작용하게 된다.

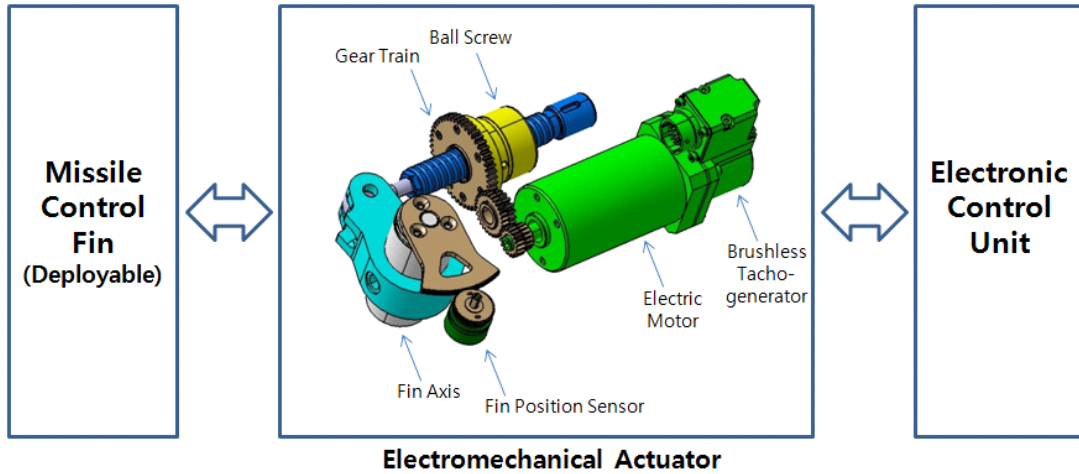


그림 6.1 유도탄 날개 구동 시스템 세부 구성도

전동기로 구동되는 전기식 유도탄 날개 구동장치의 수학 모델은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_m(t) \\ \dot{\omega}_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1/\tau_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_m \end{bmatrix} u(t) \quad (6.1)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1/N & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$\tau_m = R_m J_e / (R_m B + K_T K_B) \quad (6.3)$$

$$b_m = K_T / R_m J_e \quad (6.4)$$

여기서,  $u(t)$ 는 전동기 입력전압,  $y(t)$ 는 날개 회전각도,  $\theta_m(t)$ 는 전동기 회전각도,  $\omega_m(t)$ 는 전동기 회전각속도,  $N$ 은 정규 기어비,  $\tau_m$ 은 기계

적 시상수,  $b_m$ 은 입력 이득,  $R_m$ 은 전동기 저항,  $J_e$ 는 전동기 관성,  $B$ 는 전동기 점성 감쇠 계수,  $K_T$ 는 전동기 토크 상수,  $K_B$ 는 전동기 역기전압 상수이다.

입력  $u(t)$ 에서 출력  $y(t)$ 로의 플랜트 전달함수  $P(s)$ 는 식 (6.5)와 같다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = P(s) = \frac{b_m/N}{s(s+a)}, \quad a = 1/\tau_m \quad (6.5)$$

### 6.2.2 제안된 제어 기법 설계

제안된 공탄성 진동 제어 기법의 상세 구조는 그림 6.2와 같다.

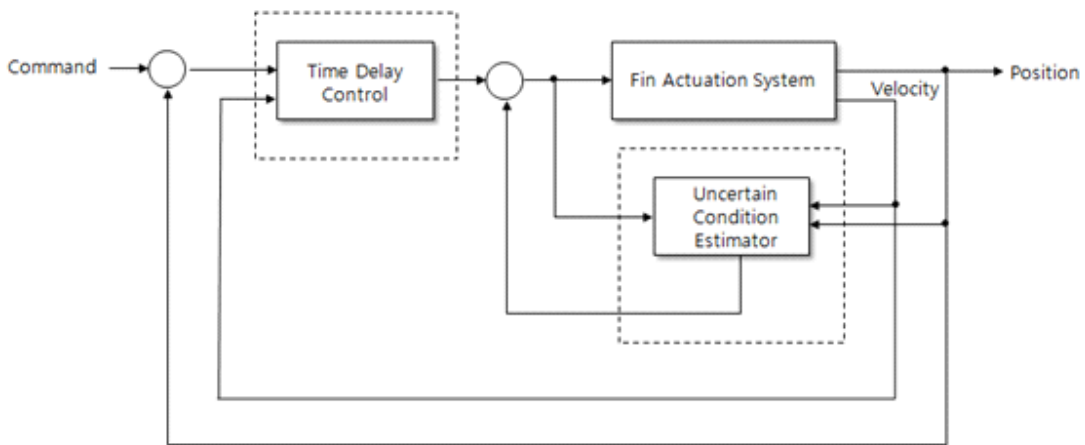


그림 6.2 제안된 공탄성 진동 능동 억제 기법의 상세 구조

설계된 제어 알고리즘은 시간지연 제어 기법(Time Delay Control, TDC) 및 새롭게 제안된 불확실 조건 추정기(Uncertain Condition Estimator, UCE)로 구성된 2 자유도 구조를 가진다. TDC 보상기는 명령 추종 성능의 향상과 파라미터 변동 및 측정 노이즈에 강인한 성능을 보장하도록 설계된다. UCE를 기반으로 하는 보상기는 외부 환경으로부터 인가된 외란 및 날개 구동장치에 대한 내부적인 기계 동력 전달 기구

의 비선형성을 보상하도록 설계된다.

### 6.2.2.1 TDC 보상기

TDC는 미지의 동특성 및 예기치 않은 외란을 보상하기 위하여 설계자가 구현하고자 하는 기준 동특성과 시간 지연 정보를 이용한다. 따라서, TDC는 비선형 동특성에 대한 계산을 필요로 하지 않는다[97]-[102].

TDC 알고리즘에 대하여 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

일반적인 비선형 시스템의 동적 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\dot{x} = f(x,t) + h(x,t) + B(x,t)u + d(t) \quad (6.6)$$

여기서,  $x$ 는 상태 벡터,  $u$ 는 제어입력 벡터,  $B$ 는 제어분산 행렬,  $f$ 는 확인된 시스템 동특성 행렬,  $h$ 는 미확인된 시스템 동특성 행렬,  $d$ 는 외란 벡터이다.

아래와 같이 기준 명령  $r$ 에 대하여 원하는 응답을 갖는 선형 시불변 시스템 기준 모델을 정의한다.

$$\dot{x} = A_m x_m + B_m r \quad (6.7)$$

여기서,  $x_m$ 은 기준 모델의 상태 벡터,  $A_m$ 은 기준 모델의 동특성 행렬,  $B_m$ 은 명령상수 행렬,  $r$ 은 명령 벡터이다. 오차벡터  $e$ 는 시스템 상태 벡터와 기준 모델 상태 벡터 사이의 오차이며, 아래와 같다.

$$e = x_m - x \quad (6.8)$$

제어의 목적은 시스템이 원하는 동특성을 갖도록 오차  $e$ 를 영으로 만드는 것이다.



$$\dot{e} = A_e e \quad (6.9)$$

여기서  $A_e$ 는 오차 시스템 모델이며 식 (6.7) 및 식 (6.8)로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e} = A_m e + [-f - h - d + A_m x + B_m r - Bu] \quad (6.10)$$

이제 아래의 식 (6.11)을 만족하도록  $u$ 를 결정하면 식 (6.9)는 아래의 식 (6.12)와 같이 표현된다.

$$-f - h - d + A_m x + B_m r - Bu = Ke \quad (6.11)$$

$$\dot{e} = A_e e = (A_m + K)e \quad (6.12)$$

식 (6.11)을  $u$ 에 관한 식으로 정리하면 식 (6.13)과 같다.

$$u = B^+[-f - h - d + A_m x + B_m r - Ke] \quad (6.13)$$

식 (6.6)에서 현재의  $h(x,t) + d(t)$  값과 아주 작은 시간 지연값  $L$ 이 지난 후의 값이 거의 같다고 가정하면 다음 식과 같이 근사화 된다.

$$\hat{h}(x,t) + \hat{d}(t) \cong h(x,t-L) + d(t-L) \quad (6.14)$$

식 (6.6)과 식 (6.14)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\hat{h}(x,t) + \hat{d}(t) \cong \dot{x}(t-L) - f(x,t-L) - B(x,t-L)u(t-L) \quad (6.15)$$

식 (6.13)과 식 (6.15)로부터 다음의 시간지연 제어법칙이 도출된다.

$$u = B^+(t)[-f(t) - \dot{x}(t-L) + f(t-L) + B(t-L)u(t-L) + A_m x(t) + B_m r(t) - Ke(t)] \quad (6.16)$$

이제, 전기식 구동장치에 대한 TDC 제어 법칙을 설계한다. 식 (6.7)로부터 TDC는 원하는 동특성을 가지는 기준 모델을 필요로 함을 알 수 있다. 본 논문에서는 시스템의 기준 모델을 아래와 같은 2차 시스템으로 정의한다.

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m r = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} x_m + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix} r \quad (6.17)$$

여기서  $\omega_n$ 은 고유 주파수이고,  $\zeta$ 는 댐핑비이다. 결론적으로 전기식 구동장치에 대한 TDC 제어 법칙은 다음과 같이 주어진다.

$$u(t) = u(t-L) + (1/b_m) [-\dot{\omega}_m(t-L) - 2\zeta\omega_n\omega_m(t) - \omega_n^2\theta(t) + \omega_n^2r(t)] \quad (6.18)$$

### 6.2.2.2 UCE 보상기

UCE는 전동기에 인가되는 외부 외란에 의한 효과를 제거하고, 전동기와 유도탄 날개 사이에 존재하는 기계적 동력전달기구의 프리 플레이에 의한 비선형성의 영향을 제거하기 위하여 제안되었다.

제안된 UCE는 크게 두개의 부분으로 구성되어 있다. 하나는 전동기 자체의 외란을 추정하는 부분이고, 나머지는 기어 및 볼스크류를 포함하는 기계적 연결부의 비선형성을 추정하는 부분이다. 기계적 연결부의 비선형성은 기계적 동력전달기구에서 발생하는 백래쉬, 마찰, 히스테리시스 및 데드존 등이다.

UCE의 한부분인 전동기에 대한 외란 추정부는 다시 시간지연 추정

기, 필터링 효과 상쇄 보상기(Filtering Effect Cancellation Compensator, FECC) 및 제어 게인 G1의 세부분으로 구성되어 있다. (그림 6.3 참조)

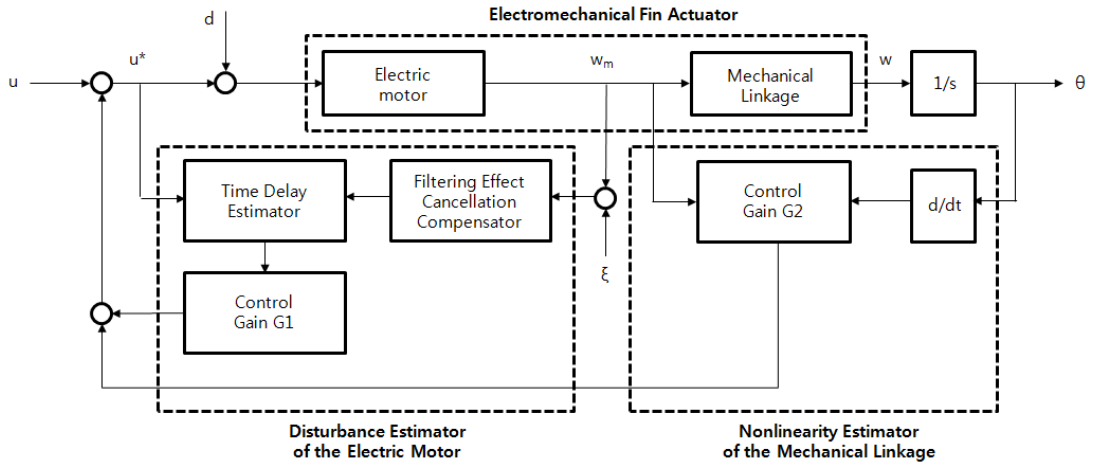


그림 6.3 제안된 UCE의 상세 구조

UCE 외란 추정부의 시간지연 추정기는 시스템의 불확실성이 시간지연 정보로부터 추정된다는 개념에 기반하고 있다. 이 개념은 시간지연 제어기법으로부터 도입된 개념이다. 즉, 만약 샘플링 시간이 충분히 짧다면, 현재 스텝에서의 플랜트 불확실성  $h(x,t)$  및  $d(t)$ 는 이전 단계의 제어 입력과 상태변수의 시간지연 정보로부터 추정이 가능하다는 개념이다. 플랜트 불확실성  $h(x,t)$  및  $d(t)$ 를 보상하는 추가적인 제어 입력을  $\Delta u(t)$ 라 정의한다.  $h(x,t)$ 와  $d(t)$ 를 추정값인  $\hat{h}(x,t)$ 와  $\hat{d}(t)$ 로 바꾸어 적용하면 보상 제어입력  $\Delta u(t)$ 는 식 (6.6)과 식 (6.15)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta u(t) &= - \frac{\hat{h}(x,t) + \hat{d}(t)}{B(x,t)} & (6.19) \\ &= - \frac{\dot{x}(t-L) - f(x,t-L) - B(x,t-L)u(t-L)}{B(x,t)} \end{aligned}$$

유도탄 날개 구동장치의 제어입력  $u(t)$ 로부터 모터 각속도  $\omega_m(t)$ 까지의 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\omega}_m(t) = -\frac{1}{\tau_m}\omega_m(t) + b_m u(t) \quad (6.20)$$

식 (6.19) 및 식 (6.20)으로부터  $h(x,t)$ 와  $d(t)$ 에 대응하여 추가적으로 소요되는 보상 제어입력  $\Delta u(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta u(t) = \frac{1}{b_m}\dot{\omega}_m(t-L) + \frac{1}{b_m\tau_m}\omega_m(t-L) - u(t-L) \quad (6.21)$$

UCE 외란 추정부의 FECC 블록은 필터링 효과 상쇄 보상기이다. 일반적으로 센서신호 계측시 측정잡음의 영향을 줄이기 위하여 적절한 전단필터(Anti-Aliasing Filter)를 사용한다. 이러한 전단필터는 추가적인 모델링되지 않은 동특성으로 작용하여 원래의 센서신호 동특성이 변화한다. 전단필터 회로의 동특성은 사용자가 정하는 것이므로 전달함수를 미리 알 수 있다. 따라서, 필터 회로의 영향을 상쇄시키기 위하여 관측기를 이용하여 추가적인 보상기를 설계할 수 있으며, 이것이 FECC이다. FECC의 세부 블록선도는 그림 6.4와 같다.

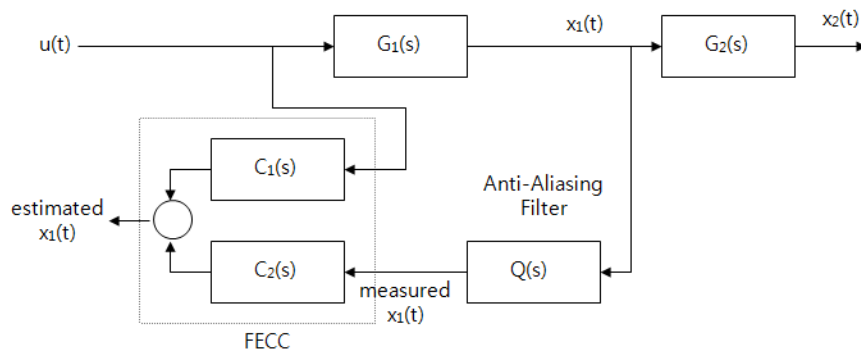


그림 6.4 FECC의 상세 구조

전단필터  $Q(s)$ 의 영향을 상쇄시키기 위한 FECC는 다음을 만족시켜야 한다.

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{\hat{X}(s)}{U(s)} \quad (6.22)$$

식 (6.22)의 조건을 만족시키도록  $C_1(s)$ 와  $C_2(s)$ 를 설계하는 방법은 무수히 많다. 본 논문에서는  $u(t)$ 와 실제 측정된  $x_1(t)$ 를 입력으로 사용하는 감소차수 관측기(Reduced Order Observer)를 사용하여 FECC를 설계하였다.

UCE의 나머지 부분인 기계적 연결기구의 비선형성 추정부는 두가지의 센서 신호를 이용하여 구성하며, 이는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 출력인 전동기 회전속도 신호와 유도탄 날개에 연결된 날개 회전각도 센서 신호이다. 기계적 연결기구 비선형성 추정부의 상세 구조는 그림 6.3에 나타나 있다. 유도탄 날개의 회전각도 신호는 미분되어 제어 계인 G2 블록으로 전달되고, 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 회전속도 신호도 제어 계인 G2 블록으로 전달된다. G2 블록으로 전달된 날개 회전각도 신호는 G2 블록 안에서 다시 기어비(기어비는 구동기 구조상 날개 각도에 따라 가변됨)가 곱해지고, 이후 영구자석 속도검출기의 회전속도와 비교하여 두 신호간의 오차를 계산한다. 기계적인 동력전달기구의 비선형성은 이 오차 신호를 기반으로 보상된다. G2 블록 안에서 계산된 오차 신호는 비례 계인이 곱해진 후 다시 대역통과필터를 거치게 된다. 대역통과 필터의 최소 및 최대 주파수 대역은 예상되는 공탄성 진동 주파수 및 날개 구동장치의 주파수 반응 대역폭을 고려하여 결정된다. 경험상, 대역통과 필터의 최대 주파수 대역은 최대 공탄성 공진 주파수보다 1.2~1.5배 정도 높게 선정하고, 최소 주파수 대역은 날개 구동장치의 위상 주파수 응답이 45도가 되는 지점의 주파수로 선정하면 좋은 결과를 얻을 수 있다.

### 6.2.2.3 제안된 제어 기법 시험 결과

제안된 제어 기법의 효용성을 확인하기 위하여, 전기식 유도탄 날개 구동 시스템에 제안된 기법을 적용하여 일련의 시험을 실시하였다. 상세 시험구성은 그림 6.5와 같다.

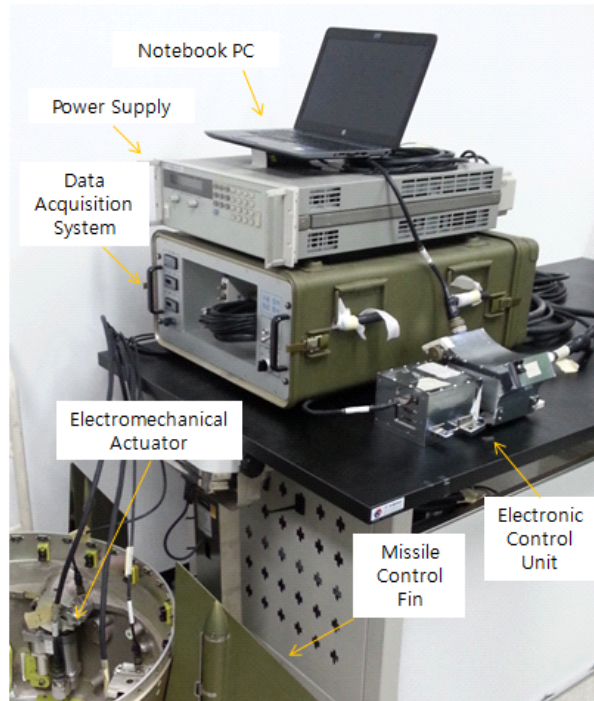
그림 6.6은 인가된 스텝 구동명령에 대한 PID 제어 기법, TDC 제어 기법 및 제안된 제어 기법의 명령추종성능을 비교한 결과이다. 세가지 제어 기법 모두 양호하고 빠른 응답특성을 보여 주며, 충분히 작은 정상상태 오차를 가진다.

그림 6.6의 (b)는 (a)에서 점선으로 된 원으로 둘러싸인 영역을 확대한 그림이다. PID 제어 기법의 경우 상대적으로 큰 오버슈트를 보여 주지만, 제안된 제어 기법은 오버슈트를 충분히 감소시켜 빠르고 안정적인 응답을 보여주는 것을 확인할 수 있다. 반면, TDC 제어 기법의 경우는 작은 언더슈트를 보여 준다.

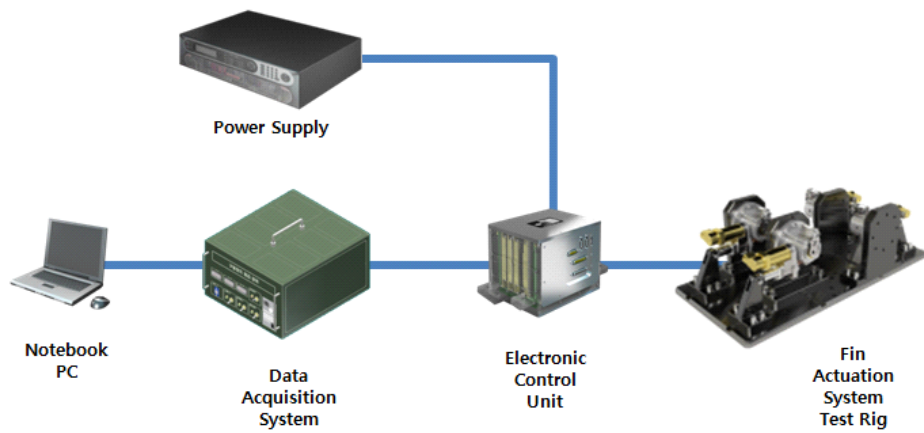
추가적으로 제안된 제어 기법과 TDC 제어기법은 빠른 정상상태 도착 시간을 가짐을 알 수 있다. 여기서 정상상태 도착시간이란 스텝 구동명령이 인가되었을 때, 구동장치가 인가된 명령 최종값에 도달하는데 까지 걸리는 시간으로 정의된다.

그림 6.7은 0.5 Hz 정현파 구동명령 인가에 따른 세가지 제어 기법의 명령추종성능을 보여 준다. 그림 6.7의 (a)로부터 세가지 제어 기법 모두 우수한 명령추종성능을 보여줌을 확인할 수 있으며, 또한 추종오차가 매우 작게 나타남을 알 수 있다.

그림 6.7의 (b)는 (a)에서 점선으로 된 원으로 둘러싸인 영역을 확대한 그림으로, 제안된 제어 기법과 TDC 제어 기법이 PID 제어 기법보다 좀 더 우수한 추종성능을 보여줌을 알 수 있다. 날개 구동 시스템이 반대 방향으로 전환할 때, 제안된 제어 기법 및 TDC 제어기법은 PID 제어 기법보다 정현파 구동명령을 좀 더 정확히 추종함을 알 수 있다.

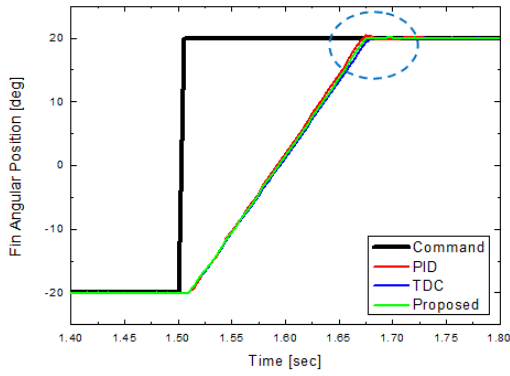


(a) 구동장치 및 계측장비

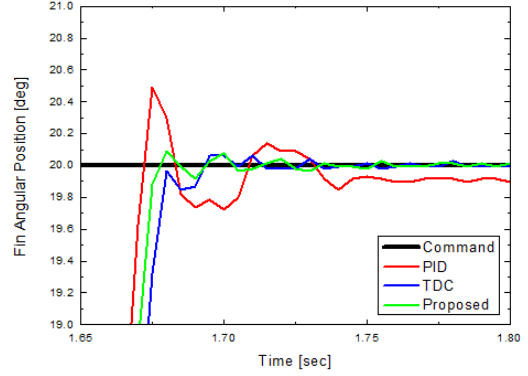


(b) 시험구성 인터페이스

그림 6.5 시험구성

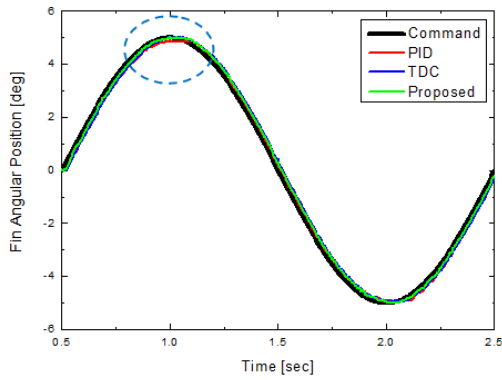


(a) 전체 동적응답

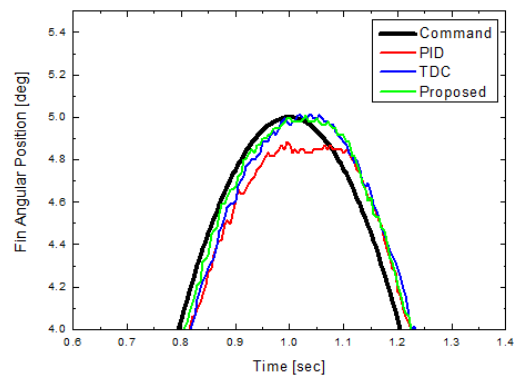


(b) 확대 그림

그림 6.6 스텝 구동명령에 대한 동적 응답 비교



(a) 전체 동적응답



(b) 확대 그림

그림 6.7 정현파 구동명령에 대한 동적 응답 비교



그림 6.8, 그림 6.9 및 그림 6.10은 각각 PID 제어 기법, TDC 제어 기법 및 제안된 제어 기법을 날개 구동장치에 적용하여 획득한 주파수 응답을 나타낸다. 그림 6.8에서 PID 제어 기법은 약 38 Hz로부터 60 Hz에 이르는 구간에서 불안정한 동작 영역을 가지며, 이 영역에서의 피크 크기도 세가지 제어 기법 중 가장 크다. 그림 6.9에서 TDC 제어 기법은 45 Hz로부터 60Hz에 이르는 구간에서 불안정한 동작 영역을 가지지만, 이 영역에서의 피크 크기는 PID 제어 기법보다는 상대적으로 작음을 알 수 있다. 상기의 결과들로 유추하여 볼 때 PID 제어 기법 및 TDC 제어 기법은 유도탄 날개에 공탄성 진동이 발생하였을 경우 위와 같은 불안정한 동작 영역에서 큰 진폭으로 오실레이션을 일으켜 구동 시스템을 불안정하게 할 수 있는 가능성을 가지고 있음을 알 수 있다. 마지막으로 그림 6.10에서 제안된 제어 기법은 시험구간 전체에 대하여 불안정한 영역 없이 이상적인 완만한 기울기를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 제안된 제어 기법은 공탄성 진동과 같은 불안정한 외부 외란이 인가되어도 이를 효과적으로 억제할 수 있음을 알 수 있다.

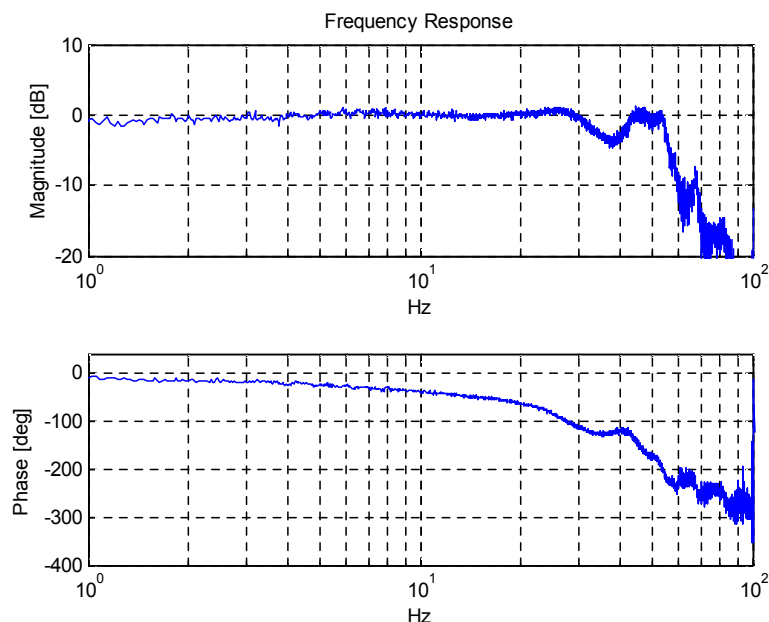


그림 6.8 PID 제어 기법 주파수 응답 결과

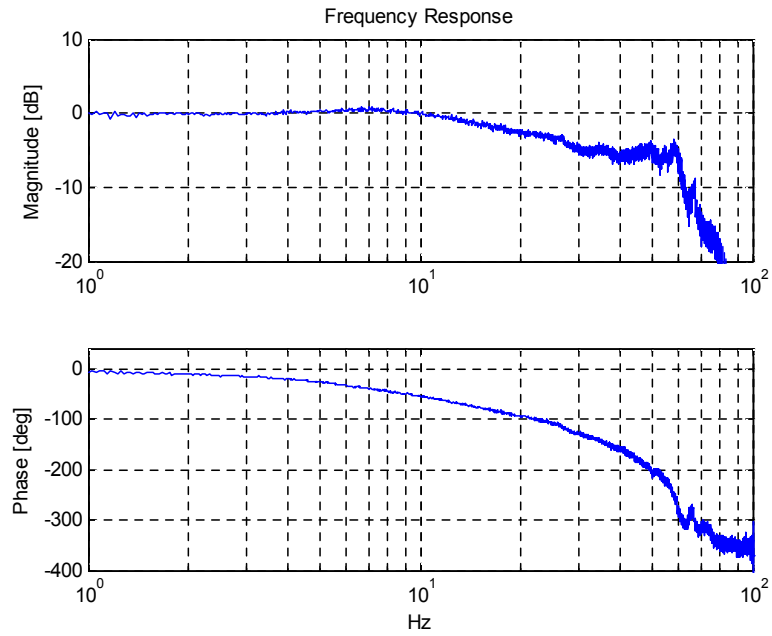


그림 6.9 TDC 제어 기법 주파수 응답 결과

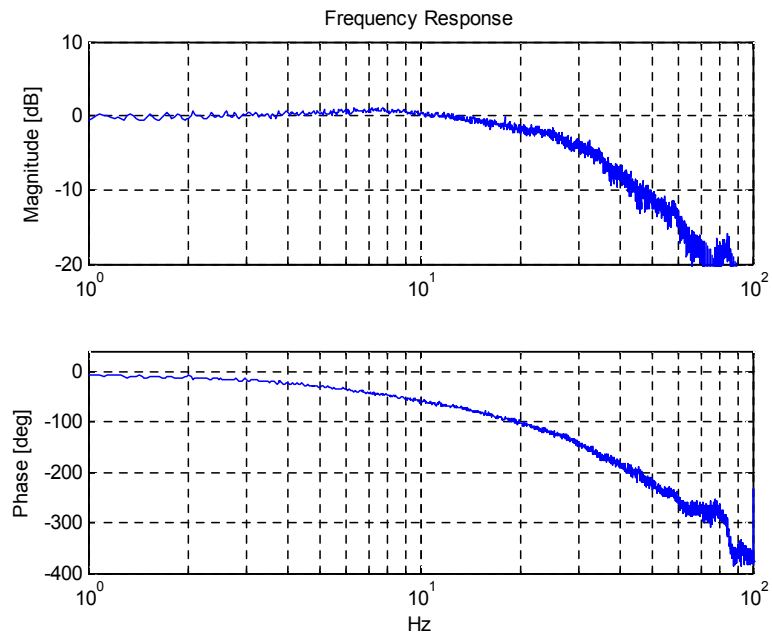


그림 6.10 제안된 제어 기법 주파수 응답 결과

그림 6.11, 그림 6.12 및 그림 6.13은 각각 PID 제어 기법, TDC 제어 기법 및 제안된 제어 기법에 대한 유도탄 비행 조건에서의 동적 응답에 대한 시험결과이다. 유도탄 부스터 로켓의 번 아웃과 같은 외부 진동 유발 요인이 있는 경우, 날개 구동장치에 공탄성 진동이 쉽게 발생할 수 있으며, 그림 6.11, 그림 6.12 및 그림 6.13은 이 조건에 대한 날개 구동 장치의 동적 응답 결과이고, 오른쪽에 있는 그림들은 각각 왼쪽에 있는 그림들의 점선으로 된 원 안의 영역을 확대한 그림들이다. 시험결과들을 통해 알 수 있듯이 PID 제어 기법 및 TDC 제어 기법은 공탄성 진동으로 인한 Limit Cycle Oscillation을 보이는 것을 확인할 수 있다. PID 제어 기법이 가장 큰 크기의 Limit Cycle Oscillation을 보이며 주파수는 약 59 Hz이다. 반면 TDC 제어 기법은 PID 제어 기법보다 Limit Cycle Oscillation의 크기가 상대적으로 줄어들기는 하지만 이를 완전히 억제하지는 못하고 있으며, 그 주파수는 약 60 Hz이다. 반면에 제안된 제어 기법은 공탄성 진동으로부터 유기된 Limit Cycle Oscillation을 효율적으로 억제하고 있음을 알 수 있으며, 제안된 제어 기법의 우수함을 이를 통하여 확인할 수 있다.

그림 6.14는 비행 중 발생한 공탄성 진동에 의하여 유도탄 날개 구동 시스템이 파손된 실제의 예를 보여 준다. 따라서, 제안된 제어 기법을 유도탄 날개 구동장치에 적용하는 경우, 탄 자세제어의 안정성 확보 뿐만 아니라, 비행 임무 자체의 성공에 결정적 기여를 할 것으로 기대된다.

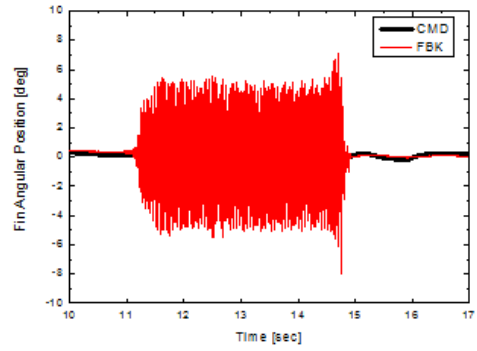
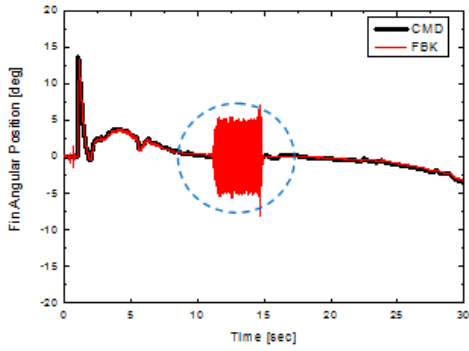


그림 6.11 PID 제어 기법의 비행 조건에 대한 동적응답

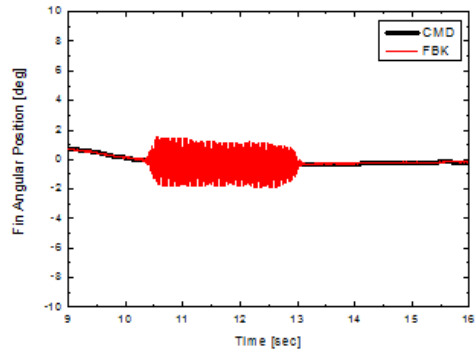
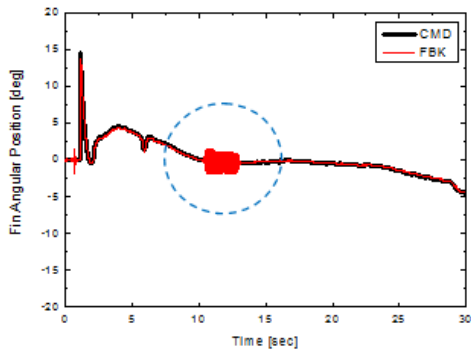


그림 6.12 TDC 제어 기법의 비행 조건에 대한 동적응답

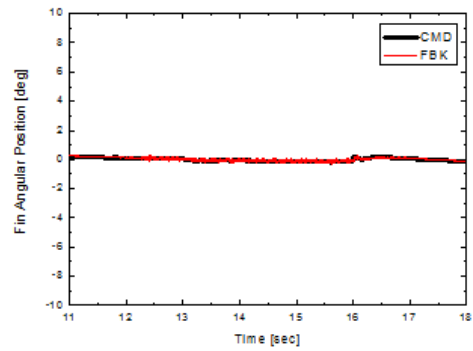
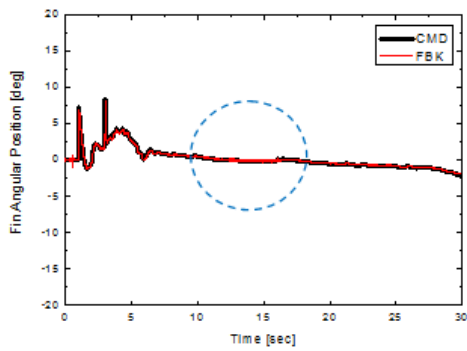
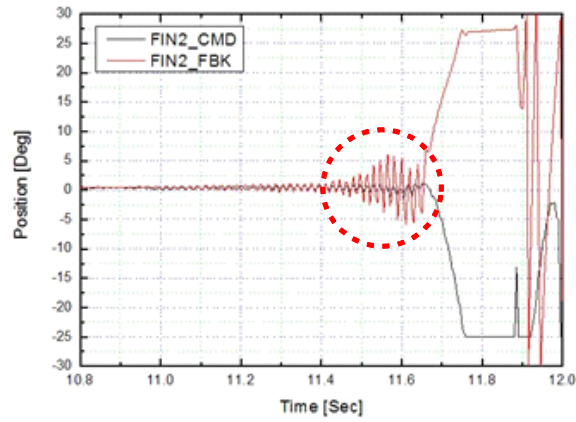
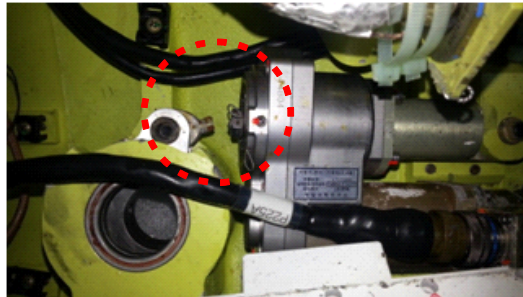


그림 6.13 제안된 제어 기법의 비행 조건에 대한 동적응답



(a) 공탄성 진동에 의한 날개의 과도 진동



(b) 공탄성 진동에 의한 구동기 파손 부위

그림 6.14 공탄성 진동에 의한 날개 구동장치 파손 예

## 제 7 장 결론 및 향후 연구계획

### 7.1 결론

본 논문에서는 유도무기용 구동장치에 적용 가능한 고신뢰성 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 최적 설계 기법에 대하여 기술하였다.

먼저, 사다리꼴 및 정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 각각 구성하고, 발전기에서 생성된 역기전압만으로 회전속도 및 회전방향을 도출하는 방법을 제안하였다. 또한 사다리꼴 및 정현파 역기전력을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기에 단선에 의한 고장이 발생한 경우 이를 센서 자체적으로 극복할 수 있는 내고장성을 가지도록 설계를 수행하였다. 이를 통하여 제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기가 유도무기용으로 사용가능한 안전성과 신뢰성을 가질 수 있도록 설계를 수행하였다.

브러쉬 없는 영구자석 속도검출기는 발전기에서 생성되는 역기전압 파형이 얼마나 이상적인 사다리꼴 혹은 정현파 파형에 가깝게 생성되는가에 따라 속도검출 정확도를 높일 수 있게 되므로, 역기전압 파형에 대한 최적 설계가 필요하다. 본 논문에서는 다수의 최적해를 동시에 탐색하면서도 계산시간을 효과적으로 줄일 수 있는 새로운 멀티모달 최적화 기법을 제안하여 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 설계에 적용함으로써, 효율적이면서도 정확한 설계가 가능한 최적설계 절차를 수립하였다.

제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 성능을 입증하기 위하여 사다리꼴 및 정현파 역기전압을 이용한 영구자석 속도검출기 시제품을 각각 제작하고 시험을 수행하였다. 다양한 실험결과로부터 본 연구에서 제안된 설계 방법들의 정확성과 타당성이 검증되었다.

마지막으로 제안된 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 이용하여 유도탄 날개 구동장치에 발생한 공기역학적 공탄성 진동을 효과적으로 억

제할 수 있는 제어 기법을 제시하고, 이에 대한 시험을 수행함으로써, 제안된 기법이 외부로부터 유도탄 날개 구동장치로 유입된 공탄성 진동을 효과적으로 억제하는 우수한 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 유도무기에 사용 가능한 높은 신뢰성과 안정성을 가지는 사다리꼴 및 정현파 역기전압을 이용한 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 각각 설계하였다. 사다리꼴 역기전압을 이용한 속도검출기는 생성된 3상의 역기전압을 직접 조합하여 회전속도 신호를 출력하기 때문에 정현파 역기전압을 이용한 속도검출기에 비하여 계측 노이즈 대처에 상대적으로 유리한 특성을 가지며, 정현파 역기전압을 이용한 속도검출기는 연속적으로 변하는 신호에 대한 수학적 계산에 의하여 회전속도 출력을 생성하기 때문에 정확도가 상대적으로 높은 특성을 가진다.

본 논문에서 제안된 최적 설계 기법들은 향후 고신뢰성을 요하는 유사 무기체계의 전기식 구동장치 개발에 많은 도움을 줄 수 있으리라 판단된다.

## 7.2 향후 연구계획

본 논문에서 제시한 연구 내용들 이외에도 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기의 설계와 정확한 성능 예측을 위해서는 다양한 연구가 진행되어야 할 것이다.

본 논문에서는 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기 최적 설계를 위하여 대리모델을 이용하는 새로운 멀티모달 최적화 기법을 제안하였으며, 대리모델은 가변 조정형 가중함수를 이용하여 정확도를 높이게 된다. 현재 적용 중인 샘플 배치 영역 기반 가중함수 가변 조정법 외에 추가적으로 최적화 과정 중의 중간 결과를 다양하게 종합하여 실시간으로 반영 가능한 새로운 가중함수 가변 조정법에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 홀센서와 같은 회전축 위치 감지기 없이 발전기에서 생성된 역기전압만으로 회전속도 및 회전방향을 도출하는 방법을 제시함으로써 센서 자체운용을 위한 역기전압이 필요 없도록 브러쉬 없는 영구자석 속도검출기를 설계하였다. 따라서 회전속도가 매우 낮은 초저속 영역에서는 발전기에서 생성되는 역기전압이 매우 낮게 되어 회전방향 추정이 쉽지 않게 된다. 이와 관련하여 초저속 영역에서의 회전방향 추정 방법에 대한 추가적인 개선 방안이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 Instrumentation Amplifier AD624를 이용하여 하드웨어적으로 초저속 영역에 대처하고 있으나, 이를 소프트웨어적인 방법으로 대처하는 새로운 기법의 개발이 필요해 보인다.

본 연구에서는 3상의 역기전압 중 1상의 역기전압이 단선 등의 이유로 고장이 발생할 경우 이를 센서 자체적으로 극복하는 기법에 대하여 제시하였다. 향후 연구에서는 영구자석 속도검출기에서 발생할 수 있는 다양한 고장 유형에 대한 검토 및 이의 극복 방법에 대한 연구가 수행된다면 보다 효과적인 내고장성 확보가 가능할 것으로 판단된다. 또한 고장의 발생 유무 및 고장 유형에 대한 판단을 자동적으로 수행하는 기법에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 브러쉬 없는 속도검출 발전기에 대하여 전자계 특성을 정확하게 고려할 수 있는 최적설계를 수행하였다. 하지만 속도검출 발전기의 소형화 및 고효율화를 고려할 때 전자기적 특성과 함께 열해석 및 진동해석 등과 같은 기계적 특성을 동시에 고려할 수 있는 다중 물리 (Multiphysics) 최적설계 기법에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.



## 참 고 문 헌

- [1] S. De, M. Rajne, S. Poosapati, C. Patel, and K. Gopakumar, "Low-inductance axial flux BLDC motor drive for more electric aircraft," *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 124-133, 2012.
- [2] P. Stewart, and V. Kadiramanathan, "Commutation of Permanent-Magnet Synchronous AC Motors for Military and Traction Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 3, pp. 629 - 630, Jun. 2003.
- [3] Y. Gao and M. Ehsani, "Parametric design of the traction motor and energy storage for series hybrid off-road and military vehicles," *IEEE Trans. Power. Electron.*, vol. 21, no. 3, pp. 749 - 755, Dec. 2010.
- [4] J. S. Thongam, M. Tarbouchi, A. F. Okou, D. Bouchard, and R. Beguenane, "Trends in Naval Ship Propulsion Drive Motor Technology," *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, pp.1-5, 2013.
- [5] M.J.J. Cronin, "The all-electric aircraft," *IEE Review*, vol. 36, no. 8, pp. 309-311, 1990.
- [6] W. Lord, R. B. Chatto, "Alternatives to analog DC tachogenerators," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 11, no. 5, pp. 470-478, 1975.
- [7] Guo-Qiang Wu, Shu-Nan Wu, Yu-Guang Bai,, "Experimental Studies on Model Reference Adaptive Control with Integral Action Employing a Rotary Encoder and Tachometer Sensors," *SENSORS* vol. 13, no. 4, pp.4742-4759, Apr. 2013.
- [8] Syed Javed Arif, Mohammad S. Jamil Asghar, Adil Sarwar, "Measurement of Speed and Calibration of Tachometers Using

- Rotating Magnetic Field,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 4, pp.848–858, Apr. 2014.
- [9] B. Longden, S. E. Spriggs, “AC and DC servomotor and tachogenerator features and design,” *Control and Instrumentation*, vol. 4, no. 10, 1972.
- [10] Jae Sik Lim, “Detection of Absolute Position of Robot Joint Using Incremental Encoders,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 21, no. 6, pp 577–582, 2015.
- [11] P. A. Merono Perez, F. C. Gomez de Leon, L. Zaghar, “Characterisation of parallel misalignment in rotating machines by means of the modulated signal of incremental encoders,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333 no. 21, pp. 5229–5243, Oct. 13 2014.
- [12] J. D. Rairan Antolines, “An optimal algorithm for estimating angular speed using incremental encoders,” *Ingenieria E Investigación*, vol. 33, no. 2, pp56–62, Aug. 2013.
- [13] N. K. Boggarpu, R. C. Kavanagh, “New Learning Algorithm for High-Quality Velocity Measurement and Control When Using Low-Cost Optical Encoders,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 3, pp. 565–574, Mar. 2010.
- [14] S. I. Park, K. C. Kim, “Study on the Optimal Design of a Novel Slotless Resolver by FEM,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 11, Art ID 8001904, Nov. 2014.
- [15] C. C. Hou, Y. H. Chiang, C. P. Lo, “DSP-based resolver-to-digital conversion system designed in time domain,” *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 9, pp. 2227–2232, Sep. 2014.
- [16] S. H. Hwang, H. J. Kim, J. M. Kim, “Compensation of Amplitude Imbalance and Imperfect Quadrature in Resolver Signals for PMSM Drives,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, pp. 134–143, Jan.–Feb. 2011.

- [17] R. Hoseinnezhad, A. Bab-Hadiashar, P. Harding, "Calibration of resolver sensors in electromechanical braking systems: A modified recursive weighted least-squares approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 1052-1060, Apr. 2007.
- [18] C. H. Yoo, I. S. Song, H. K. Jung, "Design and Analysis of a Novel Brushless DC Tachogenerator for Weapon Systems," *IEEE CEFC*, June 2014.
- [19] C. H. Yoo, J. H. Gu, H. K. Jung,, "Design of Angular Velocity Sensors Using Sinusoidal Back-EMF Waveforms," *The Korea Institute of Military Science and Technology Annual Conference*, Jun. 2016
- [20] L. D. S. Coelho, H. V. H. Ayala, and P. Alotto, "A multiobjective Gaussian particle swarm approach applied to electromagnetic optimization," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 8, pp. 3289 - 3292, Aug. 2010.
- [21] J. S. Chun, H. K. Jung, and J. S. Yoon, "Shape optimization of closed slot type permanent magnet motors for cogging torque reduction using evolution strategy," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 2, pp. 1912-1915, Mar. 1997.
- [22] G. Bakarar, T. El-Meslouhi, and B. Dakyo, "Analysis of the cogging torque behavior of a two-phase axial-flux permanent magnet synchronous machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2803-2805, Jul. 2001.
- [23] D. Wu, Z. Q. Zhu, "Influence of Slot and Pole Number Combinations on Voltage Distortion in Surface-Mounted Permanent Magnet Machines With Local Magnetic Saturation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 4, pp. 1460-1471, Dec. 2015.
- [24] J. Wanjiku, M. A. Khan, P. S. Barendse, *et al.*, "Influence of Slot

Openings and Tooth Profile on Cogging Torque in Axial-Flux PM Machines,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 12, pp. 7578–7589, Dec. 2015.

[25] P. Lazari, J. Wang, B. Sen, “3-D Effects of Rotor Step-Skews in Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Machines,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 11, Art. ID 8112704, Nov. 2015.

[26] F. G. Capponi, G. De Donato, G. A. Rivellini, *et al.*, “Fractional-Slot Concentrated-Winding Axial-Flux Permanent-Magnet Machine With Tooth-Wound Coils.” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 4, pp. 2446–2457, Jul.–Aug. 2014.

[27] A. Mahmoudi, S. Kahourzade, N. A. Rahim, *et al.*, “Design, Analysis, and Prototyping of an Axial-Flux Permanent Magnet Motor Based on Genetic Algorithm and Finite-Element Analysis,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 4, pp. 1479–1492, Apr. 2013.

[28] T. M. Jahns, W. L. Soong, “Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives—a review,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.43, no.2, pp. 321–330, 1996.

[29] Z. Q. Zhu, M. L. Mohd Jamil, L. J. Wu, “Influence of Slot and Pole Number Combinations on Unbalanced Magnetic Force in PM Machines With Diametrically Asymmetric Windings,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 1, pp. 19–30, Jan.–Feb. 2013.

[30] T. Li, and G. Slemon, “Reduction of cogging torque in permanent magnet motors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 6, pp. 2901–2903, Nov. 1988.

[31] C. Stoean, M. Preuss, R. Stoean, and D. Dumitrescu, “Multimodal optimization by means of a topological species conservation algorithm,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 14, no. 6, pp. 842 - 864, Dec. 2010.

- [32] X. Li, "Niching without niching parameters: Particle swarm optimization using a ring topology," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 14, no. 1, pp. 150 - 169, Feb. 2010.
- [33] G. Lei, K. R. Shao, Y. Guo, J. Zhu, and J. D. Lavers, "Improved sequential optimization method for high dimensional electromagnetic device optimization," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3993 - 3996, Oct. 2009.
- [34] S. Behbahani, S. W. de Silva, "Niching Genetic Scheme With Bond Graphs for Topology and Parameter Optimization of a Mechatronic System," *IEEE-ASME Trans. Mechatronics*, vol. 19, no. 1, pp. 269-277, Feb. 2014.
- [35] D. K. Lim, D. K. Woo, I. W. Kim, *et al.*, "Cogging Torque Minimization of a Dual-Type Axial-Flux Permanent Magnet Motor Using a Novel Optimization Algorithm," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 9, pp. 5106-5111, Sep. 2013.
- [36] D. K. Woo, I. W. Kim, D. K. Lim, *et al.*, "Cogging Torque Optimization of Axial Flux Permanent Magnet Motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 5, pp. 2189-2192, May 2013.
- [37] D. K. Woo, J. H. Choi, M. Ali, *et al.*, "A Novel Multimodal Optimization Algorithm Applied to Electromagnetic Optimization," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 6, pp. 1667-1673, Jun. 2011.
- [38] Y. J. Ahn, J. S. Park, C. G. Lee, *et al.*, "Novel Memetic Algorithm implemented With GA (Genetic Algorithm) and MADS (Mesh Adaptive Direct Search) for Optimal Design of Electromagnetic System," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 1982-1985, Jun. 2010.
- [39] K. Idir, L. C. Chang, H. P. Dai, "Error-based global optimization approach for electric motor design," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, no. 5, pp. 2861-2864, Sep. 1998.

- [40] J. H. Seo, S. M. Kim, H. K. Jung “Rotor-Design Strategy of IPMSM for 42 V Integrated Starter Generator,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 2458-2461, Jun. 2010.
- [41] K. Li, K. Deb, Q. Zhang, *et al.*, “An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Based on Dominance and Decomposition.” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 19, no. 5, pp. 694-716, Oct. 2015.
- [42] S. Biswas, S. Kundu, S. Das, “Inducing Niching Behavior in Differential Evolution Through Local Information Sharing,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 19, no. 2, pp. 246-263, Apr. 2015.
- [43] L. Li, K. Tang, “History-Based Topological Speciation for Multimodal Optimization,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 19, no. 1, pp. 136-150, Feb. 2015.
- [44] M. K. Islam, M. Chetty, “Clustered Memetic Algorithm With Local Heuristics for Ab Initio Protein Structure Prediction,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 17, no. 4, pp. 558-576, Aug. 2013.
- [45] W. N. Chen, J. Zhang, Y. Lin, *et al.*, “Particle Swarm Optimization with an Aging Leader and Challengers,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 17, no. 2, pp. 241-258, Apr. 2013.
- [46] W. Gao, G. G. Yen, S. Liu, “A Cluster-Based Differential Evolution With Self-Adaptive Strategy for Multimodal Optimization,” *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 44, no. 8, pp. 1314-1327, Aug. 2014.
- [47] B. Y. Qu, P. N. Suganthan, S. Das, “A Distance-Based Locally Informed Particle Swarm Model for Multimodal Optimization,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 17, no. 3, pp. 387-402, Jun. 2013.
- [48] C. Magele, A. Koestinger, M. Jaindl *et al.*, “Niching Evolution Strategies for Simultaneously Finding Global and Pareto Optimal Solutions,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 8, pp. 2743-2746, Aug.

2010.

[49] X. Li, "Niching Without Niching Parameters: Particle Swarm Optimization Using a Ring Topology," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 14, no. 1, pp. 150–169, Feb. 2010.

[50] X. Li, "Niching Without Niching Parameters: Particle Swarm Optimization Using a Ring Topology," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 14, no. 1, pp. 150–169, Feb. 2010.

[51] L. Yang, S. L. Ho, W. N. Fu, *et al.*, "Design Optimization of a Permanent Magnet Motor Derived From a General Magnetization Pattern," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 11, Art. ID 7209704, Nov. 2015.

[52] K. Li, X. Zhang, H. Chen, "Design Optimization of a Tubular Permanent Magnet Machine for Cryocoolers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 5, Art. ID 8202708, May 2015

[53] X. Li, X. Yao, "Cooperatively Coevolving Particle Swarms for Large Scale Optimization," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 16, no. 2, pp. 210–224, APR 2012.

[54] S. He, Q. H. Wu, J. R. Saunders, "Group Search Optimizer: An Optimization Algorithm Inspired by Animal Searching Behavior," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 13, no. 5, pp. 973–990, Oct. 2009.

[55] S. Biswas, S. Kundu, S. Das, "Inducing Niching Behavior in Differential Evolution Through Local Information Sharing." *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 19, no. 2, pp. 246–263, Apr. 2015.

[56] K. A. De Jong, *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*, Doctoral dissertation, Univ. of Michigan, 1975.

[57] 김재광, 차량용 다층 매입형 영구자석 회전기의 해석 및 설계, 박사학위논문, 서울대학교, 2006.

[58] 조동혁, Auto-Tuning 니칭 유전 알고리즘을 이용한 매입형 영구자

- 석 전동기의 설계, 박사학위논문, 서울대학교, 2001.
- [59] 우동균, 오버행 효과를 고려하는 영구자석 전동기의 특성 해석 및 최적 설계, 박사학위논문, 서울대학교, 2014.
- [60] 심동준, 수정된 유전 알고리즘을 이용한 매입형 영구자석 전동기의 다목적 최적설계, 박사학위논문, 서울대학교, 1997.
- [61] W. Sheng, S. Chen M. Fairhurst, *et al.*, “Multilocal Search and Adaptive Niching Based Memetic Algorithm With a Consensus Criterion for Data Clustering,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 18, no. 5, pp. 721-741, Oct. 2014.
- [62] E. Dilettoso, N. Salerno, “A self-adaptive niching genetic algorithm for multimodal optimization of electromagnetic devices,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp. 1203-1206, Apr. 2006.
- [63] S. Y. Jung, J. K. Kim, H. K. Jung, *et al.*, “Size optimization of steel-cored PMLSM aimed for rapid and smooth driving on short reciprocating trajectory using auto-tuning niching genetic algorithm,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 2, pp. 750-753, Mar. 2004.
- [64] R. H. Myers and D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. New York, NY, USA: Wiley, 2002.
- [65] L. Lebensztajn, C. A. R. Marretto, M. C. Costa, and J. L. Coulomb, “Kriging: A useful tool for electromagnetic device optimization,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 2, pp. 1196 - 1199, Mar. 2004.
- [66] F. Campelo, F. G. Guimaraes, H. Igarashi, J. A. Ramirez, and S. Noguchi, “A modified immune network algorithm for multimodal electromagnetic problems,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp. 1111 - 1114, Apr. 2006.
- [67] E. Dilettoso, N. Salerno, “A self-adaptive niching genetic



- algorithm for multimodal optimization of electromagnetic devices,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp. 1203 - 1206, Apr. 2006.
- [68] X. Zhang, X. Zhang, S. Y. Yuen, *et al.*, “An improved artificial bee colony algorithm for optimal design of electromagnetic devices,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 8, pp. 4811 - 4816, Aug. 2013.
- [69] E. Dilettoso, S. A. Rizzo, and N. Salerno, “A parallel version of the self-adaptive low-high evaluation evolutionary-algorithm for electromagnetic device optimization,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 2, article number 7015604, Feb. 2014.
- [70] O. K. Erol, and I. Eksin, “A new optimization method: Big Bang-Big Crunch,” *Adv. Eng. Software*, vol. 37, pp. 106 - 111, 2006.
- [71] C. V. Camp, “Design of space trusses using Big Bang-Big Crunch optimization,” *ASCE J. Struct. Eng.*, vol. 133, pp. 999 - 1008, 2007.
- [72] M. M. Othman, W. El-Khattam, Y. G. Hegazy, *et al.*, “Optimal placement and sizing of distributed generators in unbalanced distribution systems using supervised Big Bang-Big Crunch method,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 911-919, Mar. 2015.
- [73] C. H. Yoo, D. K. Lim, D. K. Woo, *et al.*, “A New Multimodal Optimization Algorithm for the Design of In-Wheel Motors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 3, Art ID 8201704, Mar. 2015.
- [74] C. H. Yoo, D. K. Lim, H. K. Jung, “A Novel Multimodal Optimization Algorithm for the Design of Electromagnetic Machines,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 3, Art ID 8201304, Mar. 2016.
- [75] D. L. Donoho, “Compressed sensing,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289 - 1306, Apr. 2006.
- [76] M. A. T. Figueiredo, R. D. Nowak, S. J. Wright, “Gradient Projection for Sparse Reconstruction: Application to Compressed

- Sensing and Other Inverse Problems,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 1, no. 4, pp. 586–597, Dec. 2007
- [77] R. G. Baraniuk, “Compressive sensing,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 4, pp.118–, Jul. 2007
- [78] W. Dai, O. Milenkovic, “Subspace Pursuit for Compressive Sensing Signal Reconstruction,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 5, pp. 2230–2249, May. 2009
- [79] R. G. Baraniuk, V. Cevher, M. F. Duarte, “Model-Based Compressive Sensing,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 4, pp. 1982–2001, Apr. 2010
- [80] M. Lustig, D. L. Donoho, J. M. Santos, “Compressed sensing MRI,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25 no. 2, pp. 72–82, Mar. 2008.
- [81] M. A. Herman, T. Strohmer, “High-Resolution Radar via Compressed Sensing,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57, no. 6, pp. 2275–2284, Jun. 2009
- [82] Y Tsaig, D. L. Donoho, “Extensions of compressed sensing,” *Signal Processing*, vol. 86, no. 3, pp. 549–571, Mar. 2006
- [83] W. H. Shin, S. J. Lee, I. Lee, *et al.*, “Effects of actuator nonlinearity on aeroelastic characteristics of a control fin,” *J. Fluids Struct.*, vol. 23, no. 7, pp 1093–1105, 2007.
- [84] M. Karpel, A. Shousterman, C. Maderuelo,, *et al.*, “Dynamic Aeroservoelastic Response with Nonlinear Structural Elements,” *AIAA J.*, vol. 53, no. 11, pp 3233–3239, 2015
- [85] R. Taylor, R. W. Pratt, B. D. Caldwell, “Alternative approach to aeroservoelastic design and clearance,” *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 143, no. 1, pp 1–8, 1996.

- [86] W. Zhang, Z. Ye, C. Zhang, “Aeroservoelastic analysis for transonic missile based on computational fluid dynamics,” *J. Aircr.*, vol. 46, no. 6, pp 2178–2183, 2009.
- [87] H. Haddadpour, “Aeroservoelastic stability of supersonic slender-body flight vehicles,” *J. Guid. Control Dyn.*, vol. 29, no. 6, pp 1423–1427, 2006.
- [88] K. A. Alsaif, M. A. Foda, H. Fellouah, “Analytical and Experimental Aeroelastic Wing Flutter Analysis and Suppression,” *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 15, no. 5, Art. ID 1450084, 2015.
- [89] N. Bhoir, S. N. Singh, “Output feedback modular adaptive control of a nonlinear prototypical wing section,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 37, no. 4, pp 357–373, 2004.
- [90] K. W. Lee, S. N. Singh, “Adaptive Control of Multi-Input Aeroelastic System with Constrained Inputs,” *J. Guid. Control Dyn.*, 2015, **38**, (12), pp 2337–2350
- [91] Z. Wang, A. Behal, P. Marzocca, “Model-Free Control Design for Multi-Input Multi-Output Aeroelastic System Subject to External Disturbance,” *J. Guid. Control Dyn.*, 2011, **34**, (2), pp 446–458
- [92] X. Xu, Y. Gao, W. Zhang, “Aeroelastic Dynamic Response and Control of an Aeroelastic System with Hysteresis Nonlinearities,” *J. Control Sci. Eng.*, 2015, Art. ID 258315
- [93] K. W. Lee, S. N. Singh, “Robust Higher-Order Sliding-Mode Finite-Time Control of Aeroelastic Systems,” *J. Guid. Control Dyn.*, 2014, **37**, (5), pp 1664–1671
- [94] W. H. Shin, I. Lee, Y. S. Shin, “Nonlinear aeroelastic analysis for a control fin with an actuator,” *J. Aircr.*, 2007, **44**, (2), pp 597–605

- [95] Y. J. Seo, S. J. Lee, J. S. Bae, *et al.*, “Effects of multiple structural nonlinearities on limit cycle oscillation of missile control fin,” *J. Fluids Struct.*, 2011, **27**, (4), pp 623–635
- [96] J. S. Bae, D. K. Kim, W. H. Shin, *et al.*, “Nonlinear aeroelastic analysis of a deployable missile control fin,” *J. Spacecr. Rockets*, 2004, **41**, (2), pp 264–271
- [97] K. Youcef-toumi, O. Ito, “A time delay controller for systems with unknown dynamics,” *J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, 1990, **112**, (1), pp 133–142
- [98] K. Youcef-toumi, S. T. Wu, “Input/output linearization using time delay control,” *J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, 1992, **114**, (1), pp 10–19
- [99] 이영철, 시간지연 알고리즘을 이용한 유도무기용 전기식 구동장치 설계, 박사학위논문, 충남대학교, 2007.
- [100] C. H. Lee, T. H. Kim, M. J. Tahk, “Missile Autopilot Design for Agile Turn Using Time Delay Control with Nonlinear Observer,” *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, 2011, **12**, (3), pp 266–273
- [101] Y. L. Kuo, “Attitude control of miniature spacecraft under the gravitational effect using a hub-bimorph mechanism,” *J. Vib. Control*, 2013, **19**, (12), pp 1822–1832
- [102] H. S. Jeong, C. W. Lee, “Time delay control with state feedback for azimuth motion of the frictionless positioning device,” *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 1997, **2**, (3), pp 161–168

## Abstract

# Optimal Design of Highly Reliable Brushless Tachogenerator for Guided Weapons

Chung-Hee Yoo

Dept. of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Electromechanical actuation systems have been widely used in military weapon systems such as guided missile systems and unmanned aerial vehicle applications. These systems need rotational speed sensors which serve as a damping factor in relation to position control or which can be applied for speed control purposes directly. Owing to their structural simplicity, small size and quick response, DC tachogenerators have been utilized extensively as rotational speed sensors in military servo-systems. However, DC tachogenerators have serious drawbacks, such as their low reliability and short life-times due to the mechanical wear of the brushes. Furthermore, the upper speeds of DC tachogenerators are limited by commutators and brushes.

To overcome these problems effectively, this paper proposes the optimal design of a highly reliable brushless tachogenerator for guided missiles. The proposed brushless tachogenerators are capable

of operating at much higher speeds, and their stability and reliability are guaranteed under harsh environments.

Firstly, brushless tachogenerators based on the trapezoidal back electro-motive force (EMF) and the sinusoidal back EMF are newly developed, and their rotational speed generating processes are also proposed. All types of brushless tachogenerators proposed in this paper produce the rotational speed and direction by means of an appropriate method of back-EMF signal processing with respect to the rotational angle. Additionally, fault-tolerant methods are proposed to recover the rotational speed output when one of the three phase back EMF voltages of the brushless tachogenerator is not measured in the event of a disconnected line.

Optimal design of the back EMF waveform for brushless tachogenerators is important because the rotational speed output of brushless tachogenerators becomes more accurate according to its proximity to the ideal trapezoidal or sinusoidal waveform. Therefore, a novel multimodal optimization algorithm assisted by a surrogate model is developed to solve the optimal design problem of brushless tachogenerators with a complicated objective function and a long computational calculation time.

To verify the feasibility of the proposed optimal design method and procedure, prototype brushless tachogenerators using the trapezoidal and sinusoidal back EMF waveform are designed, manufactured, and tested. The obtained results confirm that the prototype devices show superior performance in terms of both accuracy and reliability.

Finally, a robust control method for electromechanical missile fin actuation systems equipped with the developed brushless tachogenerator is proposed to improve the command tracking

performance and actively to reduce the effects of aeroelastic vibration. To demonstrate the effectiveness of the proposed control method, experimental tests are performed on the fin servo system of a guided missile under various conditions, and the obtained results show its outstanding performance with regard to active aeroelastic vibration suppression.

**Keywords :** Brushless tachogenerator, Multimodal optimization algorithm, Actuation system for guided missiles, Fault-tolerant design, Active control of aeroelastic instability

*Student Number :* 2011-30968