

공학석사 학위논문

IPMSM 센서리스 제어에서
회전자 초기 위치 추정



2015 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계설계공학전공

송 상 현

공 학 석 사 학 위 논 문

IPMSM 센서리스 제어에서
회전자 초기 위치 추정

지도교수 정 영 석

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2015 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계설계공학전공

송 상 현

송상현의 공학석사 학위논문을 인준함

2014 년 12 월 12 일



주 심 공학박사 권 순 재 (인)

위 원 공학박사 손 정 현 (인)

위 원 공학박사 정 영 석 (인)

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 논문의 목적 및 구성	3
제 2 장 IPMSM과 인덕턴스	5
2.1 IPMSM의 원리 및 내부구조	5
2.2 IPMSM의 구동 시스템	10
2.3 IPMSM의 인덕턴스	11
제 3 장 전압펄스를 이용한 초기 위치 추정법	14
3.1 전압백터를 평균 4.6번 인가하는 기존 방법	15
3.2 전압백터를 회당 4번 인가하는 기존 방법	17
3.3 전압펄스를 인가하는 기존 방법들의 개선점	18
제 4 장 제안하는 회전자 초기 위치 추정법	20
4.1 인덕턴스에 따른 각 구간의 대소 관계	20
4.2 회전자 초기 위치 추정 방법	23
제 5 장 실험 결과	26
5.1 장치 및 구성	26
5.2 실험 결과	29
제 6 장 결론	42
참고문헌	43

그림 및 표 목차

표 3.1	회당 4번 인가하는 기존 방법의 초기 회전자 위치 관별표	16
표 5.1	IPMSM Parameter	26
그림 2.1	표면 부착형 영구자석 동기 전동기 단면도	6
그림 2.2	원주 매입형 영구자석 동기 전동기 단면도	7
그림 2.3	방사 매입형 영구자석 동기 전동기	7
그림 2.4	3상 인버터의 회로 구성	10
그림 2.5	회전자 위치에 따른 a상 자기 인덕턴스	13
그림 2.6	자기적 포화 특성을 적용시킨 인덕턴스 변화	13
그림 3.1	공간 전압 벡터와 a, b, c상	14
그림 3.2	평균 4.6번 인가하는 기존 방법의 추정 과정 순서도	16
그림 3.3	회당 4번 인가하는 기존 방법의 추정 과정 순서도	18
그림 4.1	각 구간별 인덕턴스 크기 비교	21
그림 4.2	구간별 전류 대소 관계	23
그림 4.3	N극의 위치를 180°내에서 관별	24
그림 4.4	개선한 추정 과정 순서도	25
그림 5.1	실험에 사용된 장비 전경	27
그림 5.2	실험에 사용된 IPMSM	27
그림 5.3	실험에 사용된 인버터	28
그림 5.4	HVDMCMTRPFCKit Board Macros	28
그림 5.5	N극이 0~30도에 위치할 때의 a상전류	30
그림 5.6	N극이 0~30도에 위치할 때의 b상전류	31
그림 5.7	N극이 0~30도에 위치할 때의 c상전류	32
그림 5.8	N극이 120~150도에 위치할 때의 a상전류	34
그림 5.9	N극이 120~150도에 위치할 때의 b상전류	35
그림 5.10	N극이 120~150도에 위치할 때의 c상전류	36
그림 5.11	N극이 210~240도에 위치할 때의 a상전류	38
그림 5.12	N극이 210~240도에 위치할 때의 b상전류	39
그림 5.13	N극이 210~240도에 위치할 때의 c상전류	40

Initial Rotor Position Estimation in Sensorless Control of IPMSM

Sang-Hyeon Song

*Department of Mechanical Design Engineering Graduate School.
Pukyong National University*

Abstract

In this paper, an improved estimating method for initial rotor position in sensorless control of IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) is proposed. Experimental results are presented to verify proposed method. In this paper, the improved method uses a voltage pulse. It is based on the principle of the variation of inductance caused by the magnetic saturation. It is a merit of this method that it can be implemented without additional input signal. Also, this method remains unaffected by electric motor constant, because the initial position of the rotor can be estimated by comparing the magnitude of current responses on the space voltage vector in each phase. Conclusively, it can estimate d-axis position with the interval of 30 degrees to compare the current response obtained from given space voltage vector. The response time with this method is faster than conventional methods. In order to show the usefulness of the proposed estimation method, the experiment results are presented.

Key word : IPMSM, Sensorless, Initial Rotor Position

제 1 장 서 론

1 . 1 연구 배경 및 필요성

현재 생산되는 주 에너지는 전기에너지이다. 전기에너지는 화학적 방식, 자연을 활용한 방식, 핵분열 방식 등 여러 가지 방식으로 발전소를 운영하여 전기를 생산할 수 있다. 특히 원자력 발전소는 전기를 생산해 낼 수 있는 여러 가지 방법 중에 가장 많은 에너지를 생산 한다. 그러나 2011년 3월 11일 도호쿠 지방의 태평양 앞바다 지진과 그로 인한 쓰나미로 인해 3월 12일 후쿠시마 제1원자력 발전소의 냉각 시스템이 고장 나기 시작하면서 유명한 후쿠시마 원전 사고가 발생하게 되었고 이를 시작으로 전 세계적으로 비핵화 운동이 실시되고 있다. 원자력 발전소를 대체할 무언가가 필요하고 지구의 자원 또한 한정적이다 보니 에너지 생산에 한계가 서서히 눈에 보이기 시작했다. 이로 인해 최근 과학계와 공학계에서는 여러 관점에서 에너지 문제에 대한 해결책이 대두되고 있는 실정이다. 과학계에서는 어느 때 보다 신재생 에너지에 힘을 쏟고 있는 반면에 공학계에서는 이미 생산된 에너지를 더 효율적으로 활용하여 에너지 손실을 줄이는 방안이 많이 연구 되고 있다.

전기모터와 전기모터 구동 시스템은 그 어떤 설비보다 단위당 전력소모가 가장 크다. 전 세계 전기소비의 40%이상을 차지하고 상업 및 산업용 제조에 널리 사용되며 사업장 총 전력사용량의 최대 54%를 차지한다. 전력소모가 가장 많은 전동기의 효율을 높이면 상당히 많은 에너지 소모를 줄일 수 있다는 것은 누구나 예상 할 수 있다. 직류 전동기는 제어 방식이 간단하여 속도제어가 쉽고 속도제어를 할 경우에도 효율이 높으며 기동 및 가

속 토크를 임의로 선택할 수 있고 토크 특성이 좋다. 하지만 정류자와 브러시가 있기 때문에 정기적으로 보수, 점검 할 필요가 있고 악조건 하에서 사용할 때는 구조에 제약을 받으며 정류 및 기계적인 강도 때문에 고전압, 고속화에 제한을 받는다. 반면에 교류 전동기는 제어 방법이 복잡하다는 단점을 가지고 있지만 정류자와 브러시를 반도체의 스위칭 작용으로 대체하고 유지보수 없이 반영구적으로 사용이 가능하다는 장점으로 인해 다양하게 활용되면서 관련된 많은 연구가 진행되고 있다.

이러한 교류 전동기 중 동기전동기는 주로 발전기에 사용되어 왔고 전동기로는 정속 운전을 요구하는 분야에서 사용되거나 역률 제어가 가능한 동기 콘덴서로서 사용되어져 왔으나 최근 들어 영구 자석 동기 전동기(PMSM; Permanent Magnet Synchronous Motor)가 고효율, 고역율 및 고풍력 밀도 등의 장점으로 인하여 제어용 전동기로의 사용이 증가되고 있다. 영구 자석 동기 전동기의 특징으로는 유도 전동기나 전자적 동기 전동기보다 고효율에 계자여자회로·슬립 링이 없고 보수가 용이하고 계자의 손실에 의한 온도 상승이 없기 때문에 계자 온도 상승에 대한 보호가 불필요하고 전용 가변전압 가변주파수 제어(VVVF; Variable Voltage Variable Frequency) 인버터가 필요한 것 등이다.^{[1],[2]}

영구 자석 동기 전동기(PMSM)는 표면 부착형 영구자석 전동기(SPMSM; Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor)와 매입형 영구 자석 동기 전동기(IPMSM; Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)로 분류된다. SPMSM은 영구자석이 회전자 표면에 부착되어 있으므로 원심력이 커지는 고속 운전에 불리하고 표면에 있는 자기 저항이 큰 영구자석으로 인해 공극이 증가된 효과가 있으므로 인덕턴스가 작아져서 고속 운전을 위한 약자속 제어가 어렵다. 반면에 IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 있으므로 SPMSM보다 유효 공극을 작게 할 수 있으며 기계적으로 튼튼하여

고속 운전에 유리하다.^[3]

IPMSM을 가동시키기 위해 초기 위치를 아는 것은 IPMSM 제어 효율에 큰 영향을 미친다. 초기 회전자 위치 추정에 실패할 경우 회전자가 역방향으로 돌거나 기동에 실패할 수도 있다. 엔코더나 레졸버 등의 회전자 위치 센서는 회전자의 위치 검출이 가능하지만 이러한 센서들은 비용 상승, 신뢰성 저하 등의 문제를 야기 할 수 있어 회전자 위치 센서가 없는 센서리스 제어에 대한 많은 연구가 진행 중이다.^[4-6] 센서리스 제어방식에서 회전자의 초기 위치 추정 방법에는 주로 전압 펄스를 이용하는 방법과 높은 주파수의 신호를 이용하는 방법 등이 제안되어 왔다. 전압 펄스를 이용하는 방법은 같은 크기와 폭을 가지는 전압 펄스에 대하여 반응하는 전류의 변화율을 이용하여 회전자의 초기 위치를 추정하는 방식이다. d축(N극)은 영구자석에 의한 자속 쇄교가 회전자에서 고정자 쪽으로 흐르는 방향이고 -d축(S극)은 고정자에서 회전자 쪽으로 흐르는 방향이기 때문에 d축이 -d축보다 자기적으로 더 포화되는 점을 이용하여 d축을 판별하는 방식이다. 고주파 신호를 이용하는 방법은 전동기에 흐르는 전류가 높은 주파수를 가지기 때문에 전동기의 관성 모멘트에 의해 감쇄되어 회전자 회전 시킬만한 토크가 발생되지 않는다. 높은 주파수의 신호를 인가하는 방식은 전동기가 운전되는 기본과 주파수 영역에서 측정하기 힘든 자기적 포화 현상과 자기 이력 현상에 의한 인덕턴스의 차이 및 불평형 현상을 이용한다.^[7-9]

1.2 논문의 목적 및 방법

본 논문에서는 최근 제안된 전압 펄스를 이용한 IPMSM의 초기 위치 추정 방법을 개선하였다. 전압 펄스를 이용한 추정방법은 부가적인 주입 신호가 없어 구현이 간단하고 인가한 공간전압벡터에 대한 각 상의 전류응답의 크기를

비교하여 초기위치를 추정함으로써 전동기 상수의 영향을 받지 않는다. 개선된 방법은 최근 제안된 방법들보다 전압인가수를 줄임으로 인해 기존 방법보다 빠르게 위치를 추정할 수 있다. 제안한 방식의 유효성을 검증하기 위해 실험을 하였고 그 결과를 실험을 통하여 제시한다.



제 2 장 IPMSM과 인덕턴스

제어 시스템을 이해하고 설계하기 위하여 시스템의 동적 모델의 해석이 매우 중요하다. 매입형 영구 자석 동기 전동기(IPMSM)의 동적 모델은 일반적인 교류 전동기의 해석에 적용되었던 방식을 유사하게 이용할 수 있다. 즉 직류전원에 의해 계자에 여자 되는 동기전동기와 영구 자석으로부터 자속을 공급받는 IPMSM은 여자방식만 상이하기 때문에 IPMSM의 수학적 모델링은 동기전동기를 해석하는 방법과 매우 유사하다.

2.1 IPMSM의 원리 및 내부구조

영구자석 동기 전동기는 사용된 영구자석의 종류에 따라 성능이 달라지며 같은 종류의 영구자석을 사용하더라도 그 형상과 배치에 따라 다른 특성을 보인다. 이러한 영구자석 동기 전동기는 영구자석의 배치에 따라 영구자석이 회전자 표면에 부착되어 있는 표면 부착형 영구 자석 동기 전동기(SPMSM; Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor)와 매입형 영구 자석 동기 전동기(IPMSM; Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)로 분류된다. SPMSM은 영구자석이 회전자 표면에 부착되어 있으므로 원심력이 커지는 고속 운전에 불리하고 표면에 있는 자기 저항이 큰 영구자석으로 인해 공극이 증가된 효과가 있으므로 인덕턴스가 작아져서 고속 운전을 위한 약자속 제어가 어렵다. 반면에 IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 있으므로 SPMSM보다 유효 공극을 작게 할 수 있으며 기계적으로 튼튼하여 고속 운전에 유리하다. 두 PMSM은 영구자석의 배치는 다르지만 고정자권선은 일반 교류전동기의 권선과 동일하다. IPMSM은

원주 매입형태와 방사 매입형태가 있으며 주로 원주 매입형 구조가 사용된다. 방사 매입형은 자속을 집중시킬 수 있는 영구자석의 배치구조로 공극 자속밀도와 킬러턴스 토크를 크게 할 수 있는 장점이 있지만 영구 자석 끝단부근의 회전자 표면에 자속이 왜곡되어 큰 코깅 토크와 리플 토크가 발생할 수 있으며 약자속 제어 측면은 원주 매입형이 유리하기 때문이다. 다음 그림 2.1, 2.2, 2.3은 PMSM의 종류를 나타낸다.

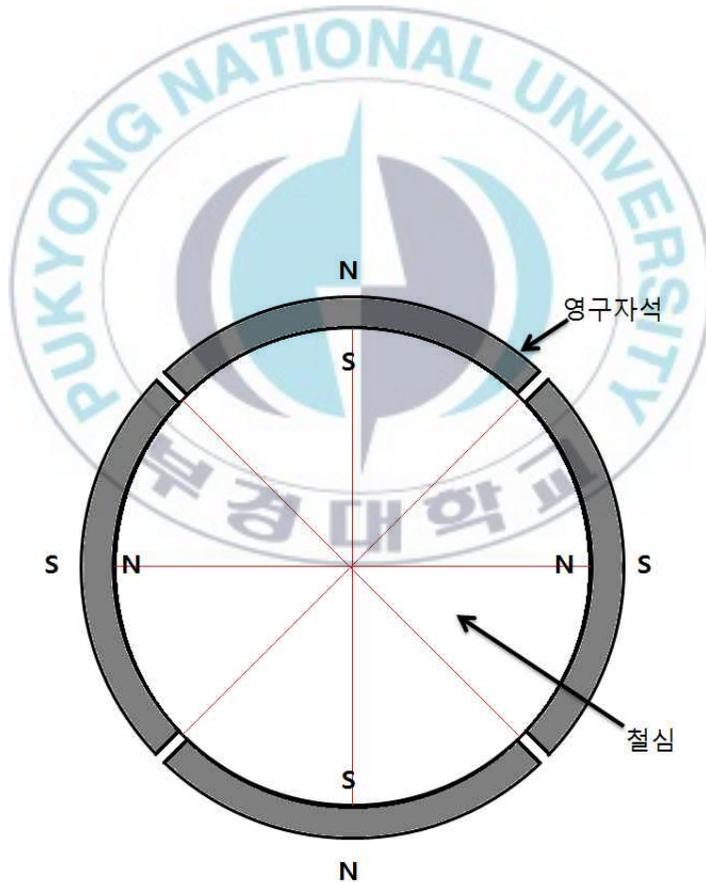


그림 2.1 표면 부착형 영구자석 동기 전동기 단면도

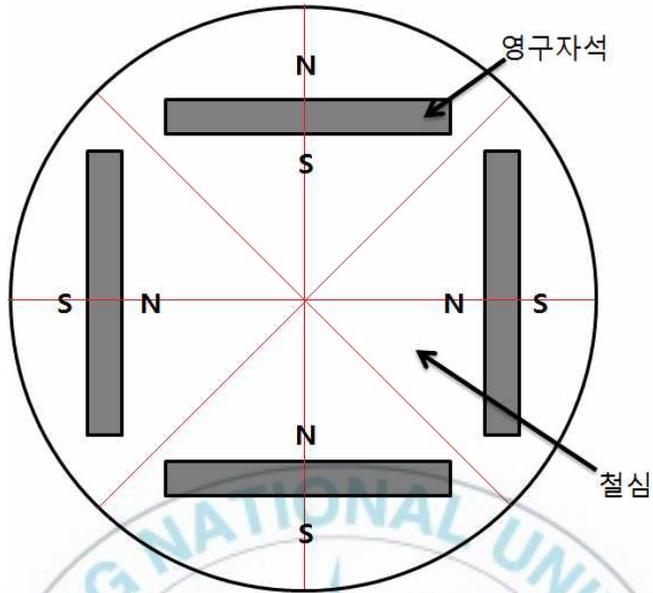


그림 2.2 원주 매입형 영구자석 동기 전동기 단면도

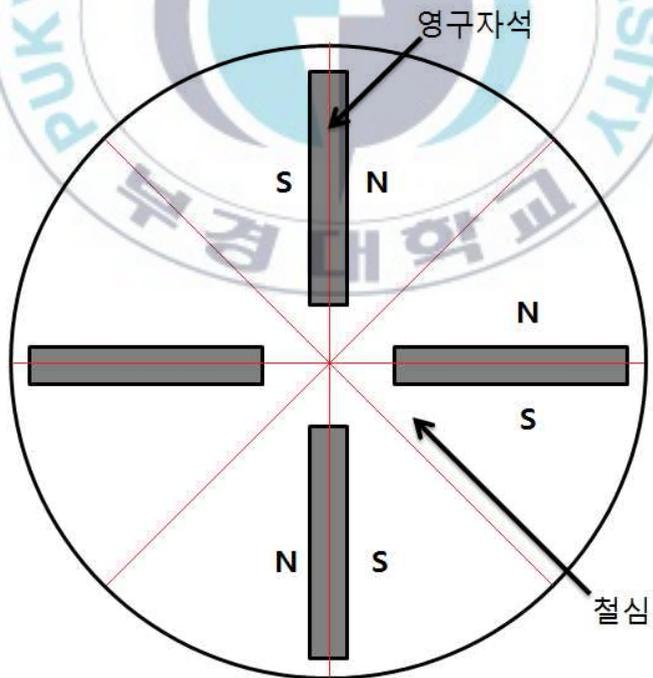


그림 2.3 방사 매입형 영구자석 동기 전동기

PMSM에서 회전자의 영구 자석 배치는 N, S극이 교대로 놓여 있다. 회전자의 영구 자석에 의한 자화방향은 반경 방향의 중심축에 평행한 방향으로 자화되어 있다.

자석에 의한 자속은 방향을 고려하여 반경 방향과 자석의 중심축을 d축으로 하고 d축으로부터 전기 각이 90° 만큼 떨어져 있는 자석 사이의 중심축을 q축으로 정한다.

표면 부착형 영구 자석 동기전동기는 영구자석이 회전자 표면에 부착되어 있고 d축 자로는 철심, 자석, 공극으로 이루어져 있으며 q축은 공극과 철심만으로 이루어져 있다. 매입형 영구자석 동기전동기는 역시 d축 자로는 철심, 자석, 공극으로 이루어져 있으며 q축은 공극과 철심만으로 이루어져 있다. 이상과 같이 표면 부착형 영구자석 동기전동기와 매입형 영구 자석 동기전동기의 자로 구성에 의한 차이는 없다. 그러나 자로구성과 기계적인 형상은 유사하지만 전기적으로 현저한 차이가 있다. 일반적으로 페라이트나 희토류 계통의 영구자석의 투자율은 공극과 거의 같으므로 영구자석에 의한 공간을 공극으로 취급하여도 무방하다. 표면 부착형 영구자석 전동기는 회전자의 영구자석이 회전자 표면에 있기 때문에 공극의 길이는 회전자의 위치에 관계없이 일정하여 자로의 자기저항 차이는 없으므로 기계적인 구조뿐만 아니라 전기적으로 대칭이다.

매입형 영구자석 동기전동기는 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 있어 회전자 표면의 기계적인 구조는 대칭이지만 자기적으로 q축과 다르게 d축은 공극이 d축 자로에 존재하는 효과가 있다. 그러므로 자석을 통과하지 않는 q축의 인덕턴스가 d축 보다 크다. 따라서 매입형 영구자석 동기전동기는 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 회전자에 돌극성이 생기기 때문에 표면부착형 영구자석 동기전동기와 다른 독특한 특성을 갖는다.

돌극의 효과로서 회전자의 영구자석에 의한 토크 외에 매입형 영구자

석 동기전동기의 특징인 자기저항 차에 의한 토크 성분이 존재하므로 이들 토크를 적절하게 이용하면 영구자석 단일에 의한 토크 보다 큰 토크를 얻을 수 있다. 이 경우 토크는 종래의 전동기와는 반대로 동기 좌표축상의 90° 인 q축 보다 큰 전류 위상각에서 발생한다. 자석 토크와 자기저항 차에 의한 토크의 합성 토크가 맥동이 없이 일정하게 발생하기 위하여 일정한 토크와 속도를 갖는 회전자계를 필요로 한다. 따라서 이 전동기는 구형과 전원으로 구동할 수 없고 정현파 전원으로 구동해야 한다. 이는 구형과 여자에 의해 얻어지는 자계는 일정 속도로 회전하지 않고 구형과 여자가 전환되는 순간에만 불연속으로 이동하기 때문이다. 또한 자기저항은 토크 효과를 적절하게 이용하면 전동기의 속도와 출력의 특성을 개선할 수 있는 장점이 있다.

매입형 영구자석 동기전동기는 표면부착형 영구자석 동기전동기와는 다르게 자석이 회전자 내부에 보호되고 있고 유효공극이 작아 고정자의 인덕턴스가 크다. 이 때문에 전기자반작용의 효과가 현저하게 나타나며 고정자 전류에 의하여 공극자속을 감속시킬 수 있으므로 일정 출력 영역에서 약계자 운전이 가능하며 매우 높은 속도까지 운전이 가능하다.

회전자 내부에 있는 영구자석이 고정자권선에서 발생하는 열의 영향을 표면부착형 영구자석 동기전동기와 같이 직접 받지 않으므로 온도상승에 의한 감자작용의 가능성이 적어 보다 열악한 환경에서도 운전이 가능하다. 공극 사이의 회전자 철심부분인 링크부는 매입형 영구자석 동기전동기의 특성에 중대한 영향을 미치므로 자석을 지지하여 원심력으로부터 자석을 보호할 수 있을 정도의 폭을 넓혀야 하는 기계적인 조건이 필요하다. 반면에 누설자속이 매우 커지지 않도록 폭을 좁혀야 하는 자기적인 조건을 만족시키는 구조가 되어야 한다.^{[3],[10]}

2.2 IPMSM의 구동 시스템

IPMSM의 벡터 제어 시 요구되는 d와 q축 전류를 흘려주기 위해 전동기에 인가해야 할 전압지령을 PWM(Pulse Width Modulation) 인버터를 통해 생성시켜 전동기에 인가한다.

인버터는 직류를 교류로 변환하는 회로이다. 적절한 변환 방법이나 스위칭 소자, 제어 회로를 통해 원하는 전압과 주파수를 얻는다. 특정 전원 소스를 다른 용도의 전원으로 사용하기 위해 사용하는 전력 변환기 중 출력이 AC형식의 변환기를 총칭한다. 인버터에는 전력용 인버터, 전동기 제어 인버터, 조명용 인버터 등이 있다.

인버터는 일정 또는 가변 직류 전원에서부터 가변 전압, 가변 주파수의 교류 전원을 발생하는 전력 변환 장치이다. 그 중 3상 인버터 회로의 구성은 그림 2.4와 같다.

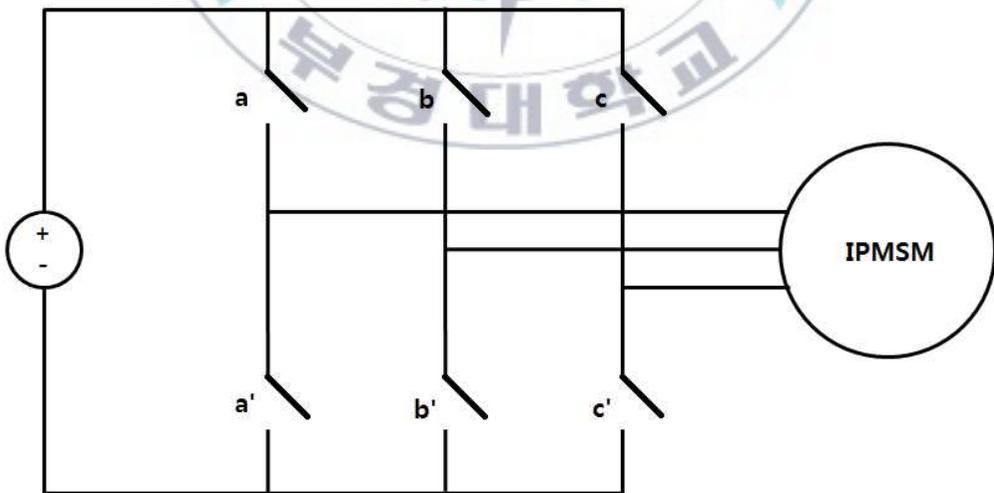


그림 2.4 3상 인버터의 회로 구성

3상 인버터 회로는 그림 2.4와 같이 독립적으로 스위칭 하는 3개의 극으로 이루어져 있다. 이러한 3상 인버터로부터 3상 교류 전압을 얻기 위해서는 각 극의 두 스위치를 필요한 출력 주파수의 반주기씩 번갈아 켜거나 끄면 된다. 각상의 극전압은 서로 120° 의 위상차를 갖는다.^{[7],[11]}

2.3 IPMSM의 인덕턴스

원주 매입형 PMSM에서 회전자에 삽입된 자석으로 인해 q축 인덕턴스가 d축 인덕턴스보다 크다. 따라서 회전자는 실제 원통형이지만 돌극형(Salient Rotor)으로 표현하고 회전자의 위치에 따라 각 권선에서 본 공극의 길이가 다르게 되어 자기 인덕턴스의 크기도 달라진다.

각 상 권선의 자기 인덕턴스 L_a, L_b, L_c 는 누설 인덕턴스 L_{ls} 와 자화 인덕턴스로 구성된다. 그림 2.5에서 a상 전류에 의해 발생한 자속이 a상 권선에 쇄교하는 자속의 양이 가장 많은 경우는 회전자 위치 θ 가 90° 와 270° 일 때이고 쇄교 자속의 양이 최소가 되는 경우는 0° 와 180° 일 때이다.

$$L_a = L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta \quad (2.1)$$

$$L_b = L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.2)$$

$$L_c = L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.3)$$

자기 인덕턴스는 그림 2.5와 같이 1회전 당 $\cos 2\theta$ 로 변동하게 되며 각 상의 인덕턴스는 식 (2.1), (2.2), (2.3) 과 같이 표현할 수 있다. L_A 는 자화 인덕턴스의 평균값이며 L_B 는 인덕턴스의 변동분이다. 그리고 그림 2.5

에 d축은 영구자석에 의한 자속이 권선에 더해지는 방향인 회전자에서 고정자 방향으로 흐르고 -d축은 감해지는 방향인 고정자에서 회전자 쪽으로 흐르기 때문에 d축이 -d축보다 자기적으로 더 포화되는 점을 적용 시키면 그림 2.6과 같이 표현 할 수 있다. d 축이 -d축보다 더 포화되기 때문에 인덕턴스가 더 낮음을 알 수 있다.^{[3],[7]}



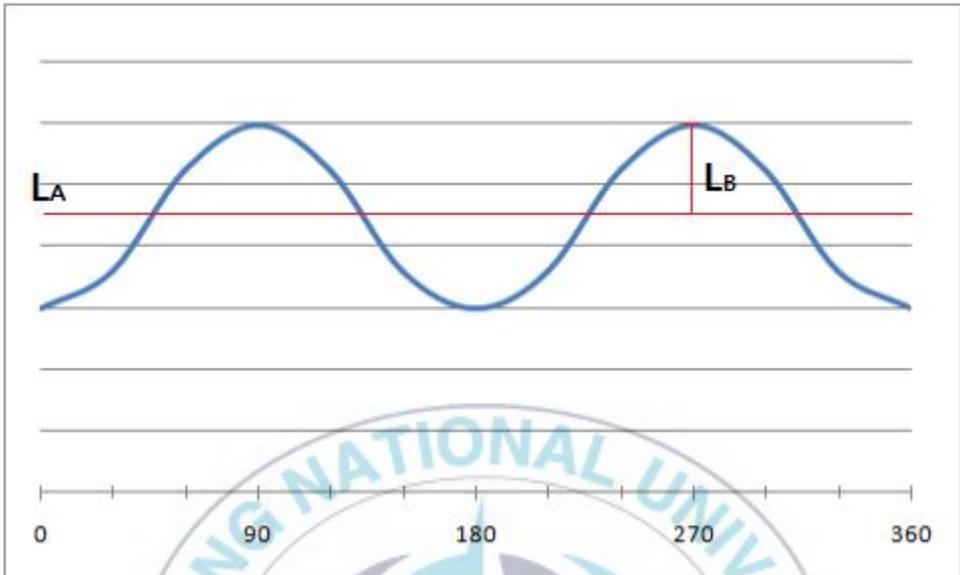


그림 2.5 회전자 위치에 따른 a상 자기 인덕턴스

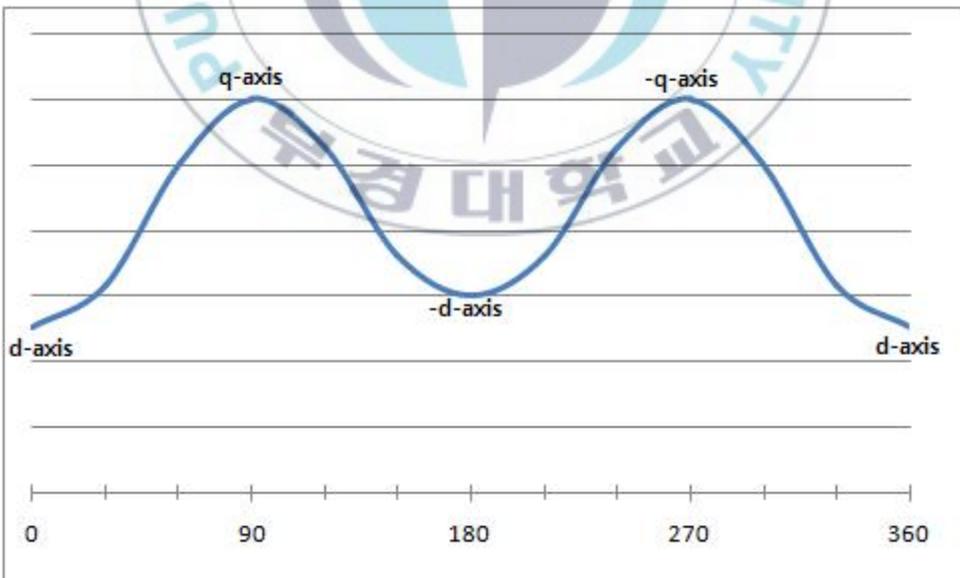


그림 2.6 자기적 포화 특성을 적용시킨 인덕턴스 변화

제 3 장 전압펄스를 이용한 초기 위치 추정법

서론에서도 언급 했지만 초기 회전자 위치 추정 법에는 크게 전압 펄스를 이용하는 방법과 고주파 신호를 이용하는 방법 두 가지가 있다. 이 장에서는 전압 펄스를 이용하는 방법에 대한 최근에 발표된 두 가지 논문을 참고로 개선하였기에 기존 논문을 우선 이야기 하고자 한다. 벡터전압에 대한 부분은 그림 3.1을 참고한다.

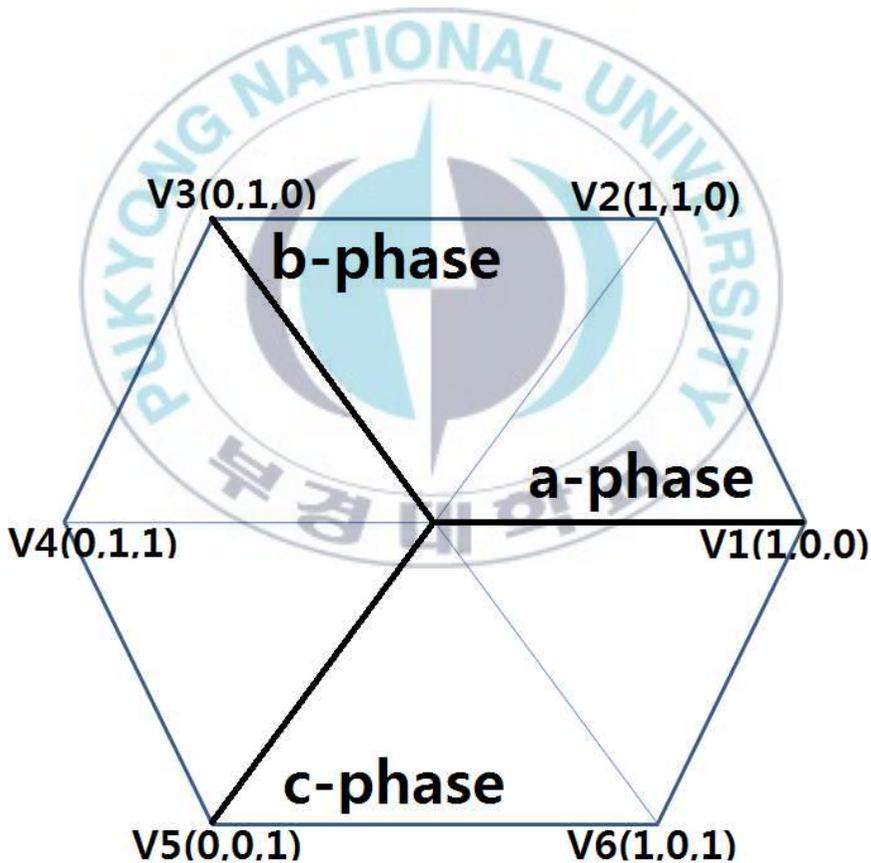


그림 3.1 공간 전압 벡터와 a, b, c 상

3 . 1 전압벡터를 평균 4.6번 인가하는 기존 방법

초기 회전자 자석의 N극 위치를 알기 위해 우선 2개의 반대 방향인 V_1 과 V_4 전압벡터를 인가한다. 포화정도의 차이로 인해 전류의 차이가 발생하므로 측정된 전류들의 대소 관계를 비교하여 N극의 위치를 180° 이내로 판별한다. $I_1 > I_4$ 인 경우 회전자는 우 반면에 위치하고 $I_4 > I_1$ 인 경우 좌 반면에 위치한다. 여기서 I_1, I_4 는 V_1, V_4 전압벡터에 의한 전류다.

회전자의 N극 위치 판별한 후 추가적으로 두 개의 전압벡터를 인가하여 위치를 추정할 수 있다. N극이 좌 반면에 위치하면 극성 판별 후 추가적으로 V_2 와 V_6 전압벡터를 인가하고 대응하는 전류 I_2 와 I_6 를 이용하여 회전자의 위치를 알아낼 수 있다. 반대로 N극이 우 반면에 위치하면 V_4 를 V_1 으로 보고 같은 방법으로 두 벡터를 인가하여 회전자의 위치를 추정한다. 그러므로 위치 추정을 위해서는 N극이 우 반면일 경우 V_1, V_2, V_6 좌 반면일 경우 V_2, V_4, V_6 전압벡터를 인가한다.

이 논문에서는 전압벡터를 인가하는 부분뿐만 아니라 전류의 차이가 적음에서 생기는 오차를 보정하는 부분도 포함되어 있다. 다음 그림 3.2은 첫 번째 기존 방법의 순서도 이다.^[12]

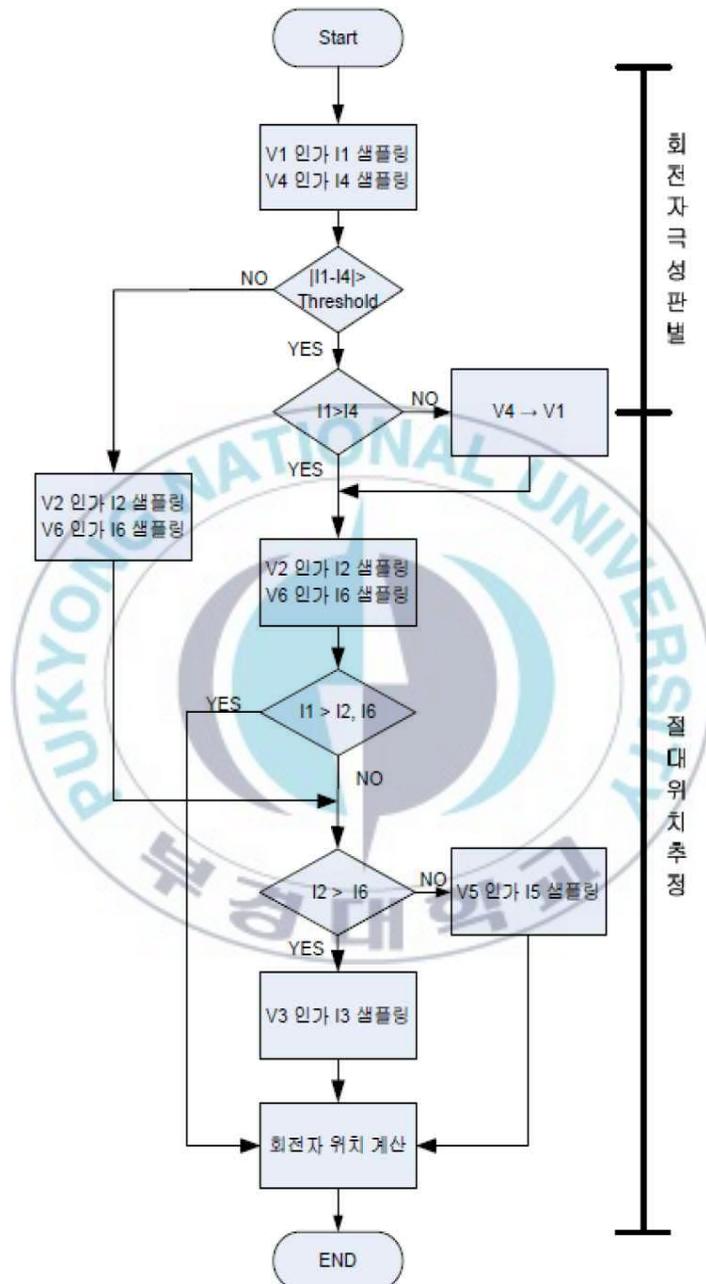


그림 3.2 평균 4.6번 인가하는 기존 방법의 추정 과정 순서도^[12]

3.2 전압벡터를 회당 4번 인가하는 기존 방법

두 번째 방법은 응답에 따라 다르게 전압벡터를 인가하는 방식이 아닌 필요한 전압벡터를 모두 인가하고 그 전류응답을 가지고 비교하면서 순차적으로 위치 추정 범위를 360° , 180° , 60° , 30° 순으로 가능범위를 좁혀 가며 N극의 위치를 찾는 방법이다.

우선 V_1, V_3, V_5, V_4 전압벡터를 순차적으로 인가하고 고정자 각 상의 전류를 검출한다. V_1 과 V_4 에 의해 나타나는 상전류 크기의 대소 관계로 회전자의 N극의 위치가 오른쪽 반면인지 왼쪽 반면인지 판별하고 N극의 위치가 판별된 후 N극이 위치한 180° 범위 안에서 V_1, V_3, V_5 의 전류 대소 관계를 비교하여 회전자 d축의 위치를 반경 60° 범위 안에서 판별한다. 그리고 다시 범위를 30° 까지 좁힌다. 아래 표 1은 두 번째 기존 논문자가 제시한 각 30° 내 구간별 대소 관계이고 그림 3.3은 순서도 이다.^[13]

표 3.1 회당 4번 인가하는 기존 방법의 초기 회전자 위치 판별표^[13]

Angle	Phase Current
$0^\circ \sim 30^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_u > I_v > I_w$
$30^\circ \sim 60^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_v > I_u > I_w$
$60^\circ \sim 90^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_v > I_w > I_u$
$90^\circ \sim 120^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_v > I_w > I_u$
$120^\circ \sim 150^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_v > I_u > I_w$
$150^\circ \sim 180^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_u > I_v > I_w$
$180^\circ \sim 210^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_u > I_w > I_v$
$210^\circ \sim 240^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_w > I_u > I_v$
$240^\circ \sim 270^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_w > I_v > I_u$
$270^\circ \sim 300^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_w > I_v > I_u$
$300^\circ \sim 330^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_w > I_u > I_v$
$330^\circ \sim 0^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_u > I_w > I_v$

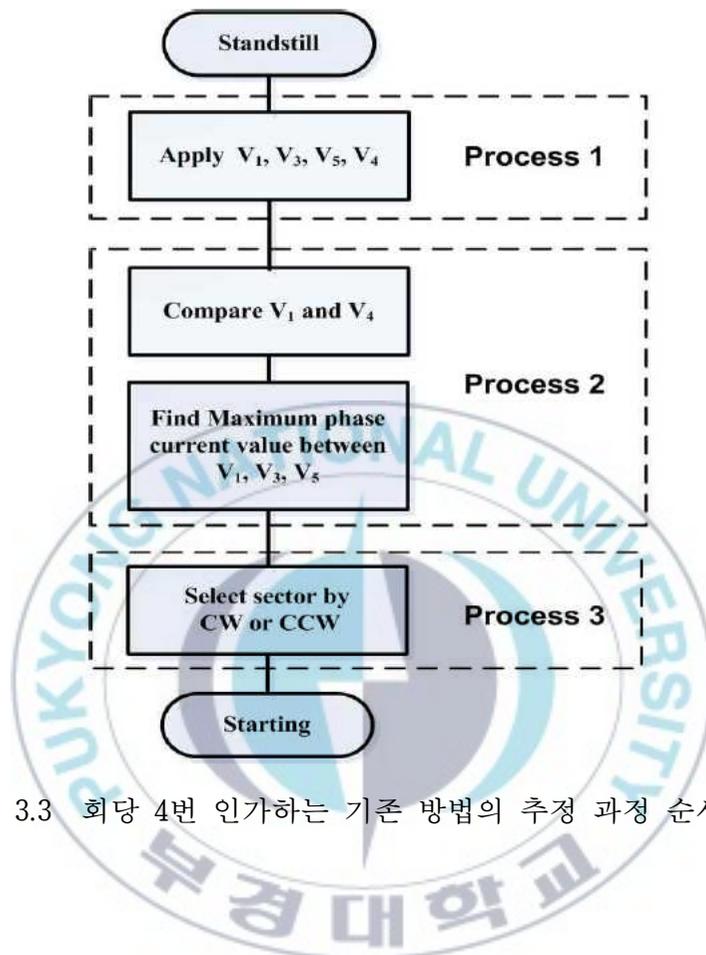


그림 3.3 회당 4번 인가하는 기존 방법의 추정 과정 순서도^[13]

3.3 전압펄스를 인가하는 기존 방법들의 개선점

두 가지 기존 방법의 이전 방법들은 구성이 복잡하고 전압펄스 인가 수가 많았다. 위 두 기존방법은 전압펄스 횟수를 최소로 하고 비교적 간단한 방법으로 초기 위치를 추정하는 것을 중점적으로 하고 있다.

첫 번째 방법은 평균 4.6번의 전압 펄스를 인가하고 두 번째 방법은 고정적으로 회당 4회의 전압펄스를 인가한다. 이에 따라 다음 장에 보일

개선한 회전자 초기 위치 추정 법은 30° 간격의 위치 총 12위치에 따라 네 구간은 전압펄스를 3번 나머지 여덟 구간은 4번의 전압펄스를 인가함으로써 평균 3.6번의 전압펄스를 인가하는 개선한 회전자 초기 위치 추정 법을 이야기 한다.

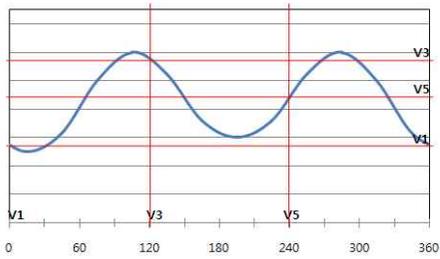


제 4 장 제안하는 회전자 초기 위치 추정법

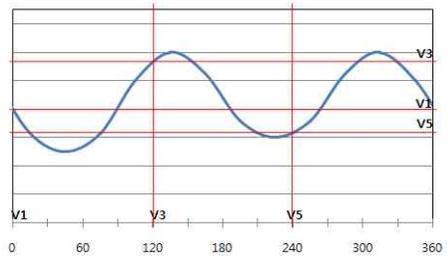
제안하는 회전자 초기 위치 추정 법은 각 구간에 N극이 있을 때를 가정하여 인덕턴스의 크기를 비교하여 열두 구간에 따른 대소 관계를 우선 도출 한다.

4 . 1 인덕턴스에 따른 각 구간의 대소 관계

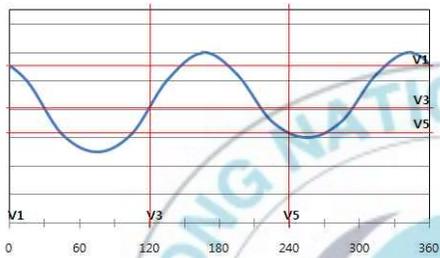
제 2장 3절에서 그림 2.5 와 그림 2.6이 어떻게 표현하게 되었는지에 대해 이야기 하였다. 그림 2.6은 N극이 0° 위에 있을 때를 표현한 것이며 N극을 각각 $0^\circ\sim 30^\circ$, $30^\circ\sim 60^\circ$, $60^\circ\sim 90^\circ$, $90^\circ\sim 120^\circ$, $120^\circ\sim 150^\circ$, $150^\circ\sim 180^\circ$, $180^\circ\sim 210^\circ$, $210^\circ\sim 240^\circ$, $240^\circ\sim 270^\circ$, $270^\circ\sim 300^\circ$, $300^\circ\sim 330^\circ$, $330^\circ\sim 360^\circ$ 에 있을 때의 그래프에서 V_1 , V_3 , V_5 위치에 대한 인덕턴스의 차이를 비교한다.



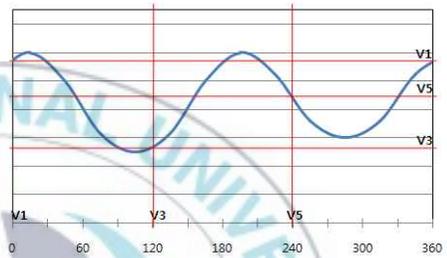
(a) $0^\circ \sim 30^\circ$



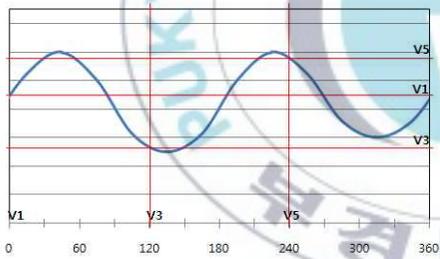
(b) $30^\circ \sim 60^\circ$



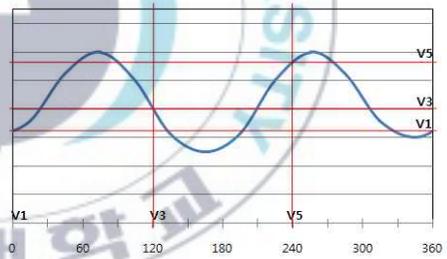
(c) $60^\circ \sim 90^\circ$



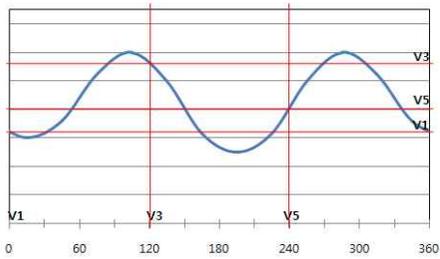
(d) $90^\circ \sim 120^\circ$



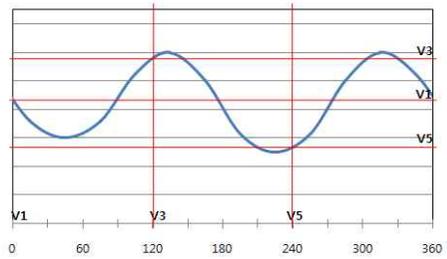
(e) $120^\circ \sim 150^\circ$



(f) $150^\circ \sim 180^\circ$



(g) $180^\circ \sim 210^\circ$



(h) $210^\circ \sim 240^\circ$

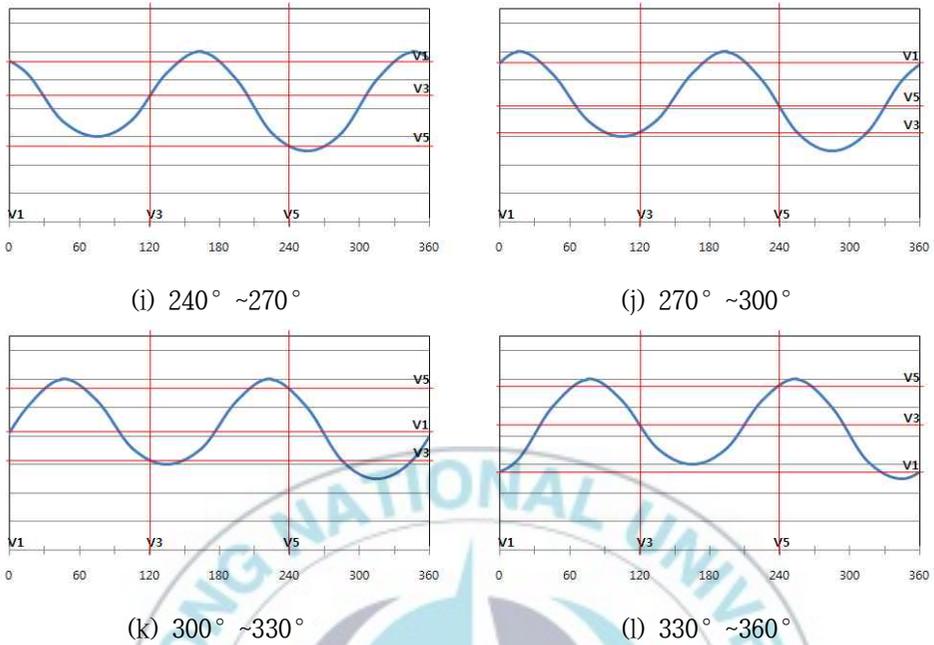


그림 4.1 각 구간별 인덕턴스 크기 비교

그림 3.1에서 표현 했듯이 a상은 V_1 , b상은 V_3 , c상은 V_5 에 위치한다. 인덕턴스가 작을수록 흐르는 전류의 크기가 커짐으로 각 상의 인덕턴스를 L_a , L_b , L_c 라 하고 전류를 I_a , I_b , I_c 라고 한다고 했을 때 예를 들어 $L_a > L_b > L_c$ 이면 $I_c > I_b > I_a$ 의 관계를 가진다. 그림 4.1에서는 각 구간에서의 전류 크기의 대소 관계를 구한다. (a)는 $V_3 > V_5 > V_1$ 이고 인덕턴스로 표현하면 $L_b > L_c > L_a$, 전류로 표현하면 $I_a > I_c > I_b$ 가 된다. (a)부터 (l)까지 열두 구간의 대소 관계를 모두 전류로 표현하면 다음 그림 4.2와 같이 표현 할 수 있다.

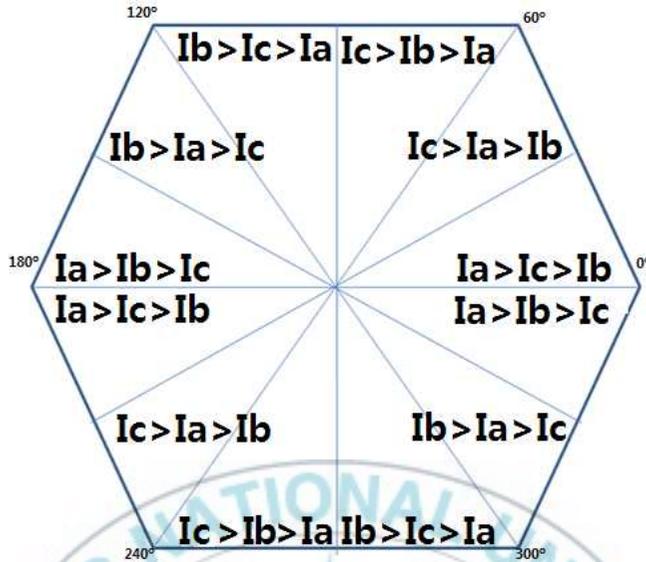


그림 4.2 구간별 전류 대소 관계

4.2 회전자 초기 위치 추정 방법

대소 관계에 대한 정보를 모두 얻었으면 초기 위치 추정을 시작한다. 우선 V_1 , V_4 전압벡터를 인가하여 N극의 위치를 180° 내에서 판별한다. 우선 V_1 전압벡터를 인가를 하고 a, b, c 세 상전류를 측정한다. 그리고 V_4 전압벡터를 인가하고 a상전류를 측정한다. V_1 을 인가했을 때의 I_a 와 V_4 를 인가했을 때의 I_a 의 크기를 비교하여 V_1 의 경우가 크다면 N극은 우 반원, V_4 의 경우가 크다면 좌 반원에 존재한다.

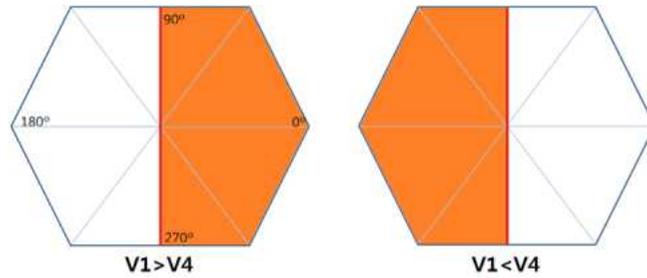


그림 4.3 N극의 위치를 180° 내에서 판별

그림 4.2를 보면 좌 반면과 우 반면이 중심점을 중심으로 마주보는 구간은 같은 대소 관계를 가진다. 최초 V_1 벡터전압을 인가했을 때 측정된 I_b 와 I_c 의 대소 관계를 비교한다. 이 중 값이 작은 상으로 다음 벡터 전압을 인가한다. 만약 $I_b > I_c$ 이면 V_5 전압벡터를, $I_c > I_b$ 이면 V_3 전압 벡터를 인가한다. 여기서 V_5 를 인가했을 때 I_a 가 I_b 보다 크다면 $I_a > I_b > I_c$ 로 전압벡터 인가는 종료된다. 마찬가지로 V_3 를 인가했을 때 I_a 가 I_c 보다 크다면 $I_a > I_c > I_b$ 로 전압벡터는 종료된다. 이 경우 전압벡터를 세 번만 인가해도 N극의 위치를 추정할 수 있다. 반대로 I_a 가 V_3 를 인가했을 때의 I_c 와 V_5 를 인가했을 때의 I_b 보다 작다면 아직 인가하지 않은 남은 한상 방향으로 전압벡터를 인가해야 한다. 상전류의 비교를 통해 각 상에 해당하는 인덕턴스의 크기를 비교하고 N극이 어디에 있는지를 추정할 수 있다.

예를 들어 d 축이 $0^\circ \sim 30^\circ$ 에 있다고 가정한다면 최초 V_1 과 V_4 를 인가하면 V_1 을 인가했을 때의 I_a 가 V_4 를 인가했을 때의 I_a 보다 클 것이고 N극은 우 반면에 있다는 것을 알 수 있다. 여기서 최초 V_1 을 인가했을 때의 I_b 와 I_c 를 비교하면 $I_c > I_b$ 라는 것을 알 수 있다. 여기서 전류가 작게 나온 b 상 방향인 V_3 전압벡터를 인가하여 a상과 c상의 크기를 비교한다. $I_a > I_c$ 이므로 세 번의 전압벡터를 인가함으로써 N극은 우 반면에 있고 $I_a > I_c > I_b$ 의

관계를 통해 d축의 위치를 알 수 있다. 두 번째 예를 들어 d축이 $90^\circ \sim 120^\circ$ 에 있다고 가정해 보겠다. 역시 V_1, V_4 전압벡터를 인가해 a상의 크기를 상호 비교하면 N극이 좌 반면에 있는 것을 알 수 있다. V_1 전압벡터 인가시의 b와 c 상전류의 크기를 비교하면 $I_b > I_c$ 가 될 것이고 전류가 작은 c상인 V_5 전압벡터를 인가하면 $I_b > I_a$ 임을 알 수 있다. 여기까지의 정보로 최종적인 대소 관계를 알 수 없으므로 남은 한상인 V_3 전압벡터를 인가한다. V_3 전압벡터를 인가하면 $I_c > I_a$ 가 될 것이고 최종적인 대소 관계인 $I_b > I_c > I_a$ 임을 볼 수 있다.

이와 같은 방법으로 회전자 초기 위치 추정을 하면 전압펄스를 평균 3.6번 인가 한다.

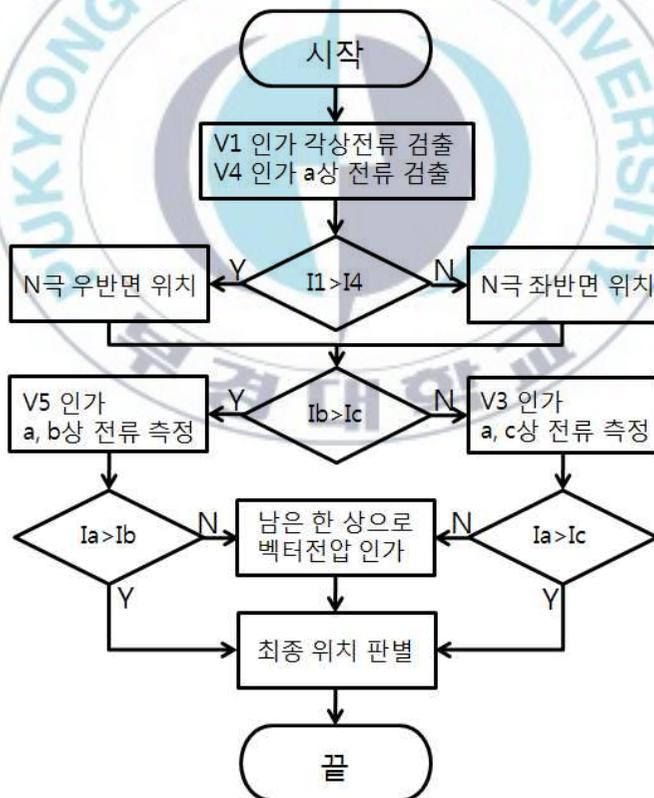


그림 4.4 개선한 추정 과정 순서도

제 5 장 실험 결과

5 . 1 장치 및 구성

본 장에서는 실험을 통하여 위 내용을 검증 하였다.

실험에 사용된 IPMSM의 파라미터는 표 5.1과 같다.

표 5.1 IPMSM Parameter

Pole Pairs	3
Phase Resistance	350 m Ω
Ld	1.92 mH
Lq	3.35 mH
Torque Constant	0.0626 Vs/rad
DC Link Voltage	150V

그림 5.1은 장치 구성의 전경이다. 이 실험에서는 오실로스코프, 인버터, IPMSM, 파워서플라이가 사용 되었다. 실험 장비의 전체 구성은 그림 5.1과 같다. 마이크로프로세서는 Texas Instruments사의 TMS320F28069가 사용 되었다. 인버터 키트는 *HVDMCMTRPFCKit*보드 이다. 이는 고전압 디지털 모터 컨트롤과 전력 효율 교정이 가능한 키트이다.



그림 5.1 실험에 사용된 장비



그림 5.2 실험에 사용된 IPMSM



그림 5.3 실험에 사용된 인버터

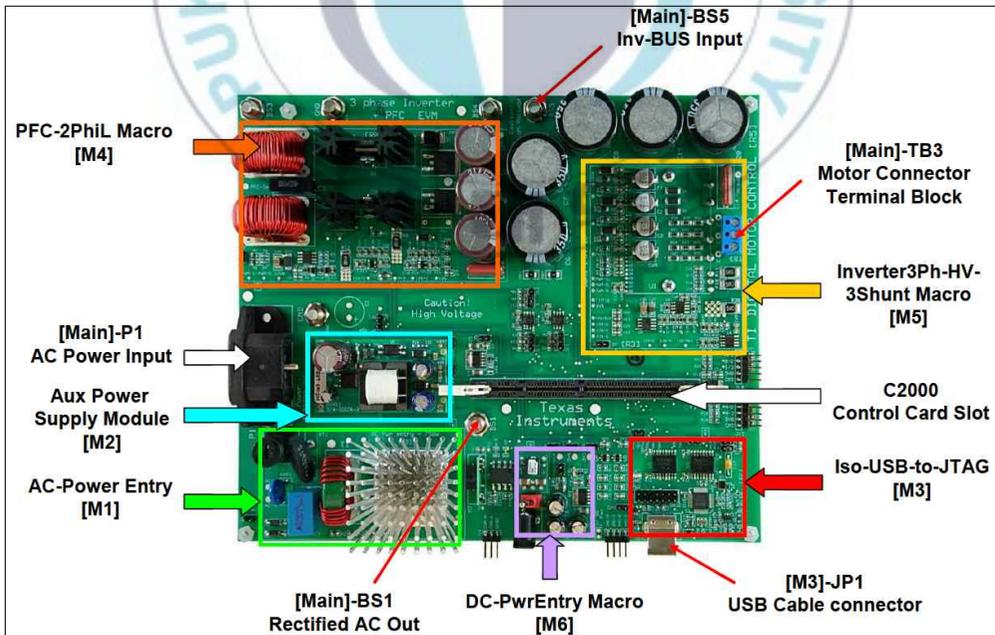


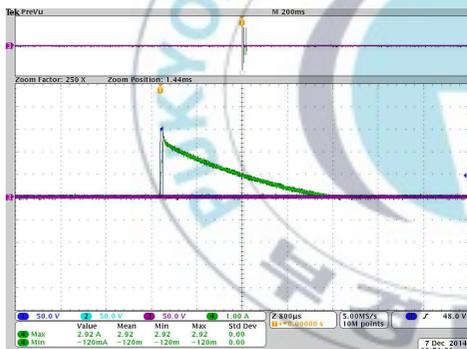
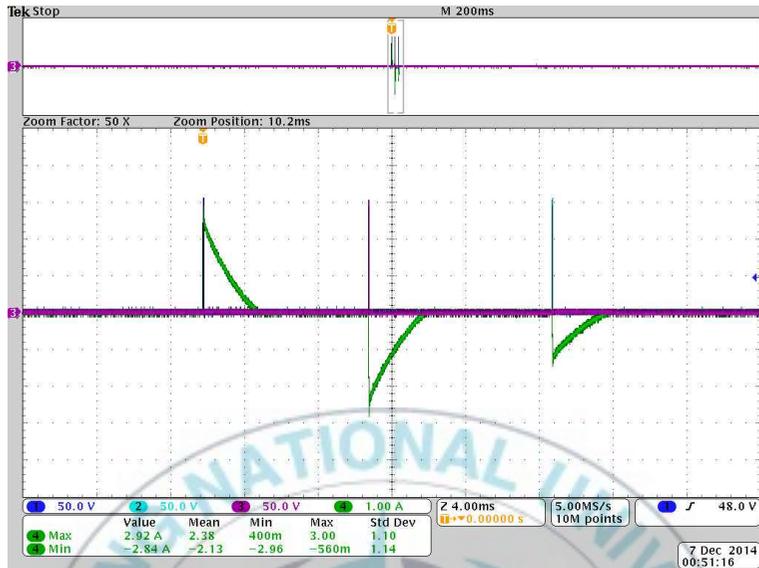
그림 5.4 HVDMCMTRPFCKit Board Macros

5 . 2 실험결과

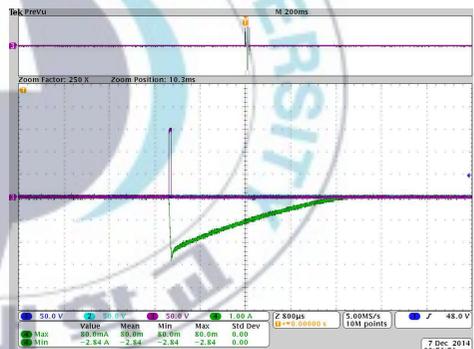
총 4가지 경우의 실험 결과를 아래에 나타내었다. 전동기 회전자의 초기 위치는 한 개 상으로 전류를 흘려 N극을 해당 위치로 유도하여 자리를 잡았다. 예를 들어 V_1 위치에 회전자 위치를 유도하기 위해 a상으로 전압을 인가하여 N극을 V_1 으로 유도하였다. 하지만 IPMSM의 톨릭턴스 토크 특징 때문에 N극은 정확히 V_1 으로 위치하지 않으며 그 근처에 자리하게 된다.

실험은 총 세 번 또는 네 번의 전압펄스를 $50\mu s$ 동안 인가를 한다.

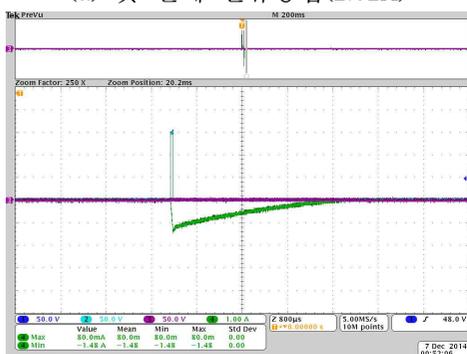




(a) 첫 번째 전류응답(2.92A)

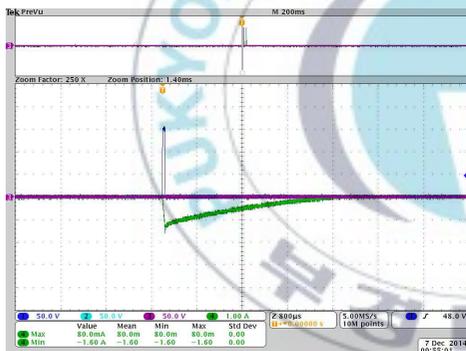
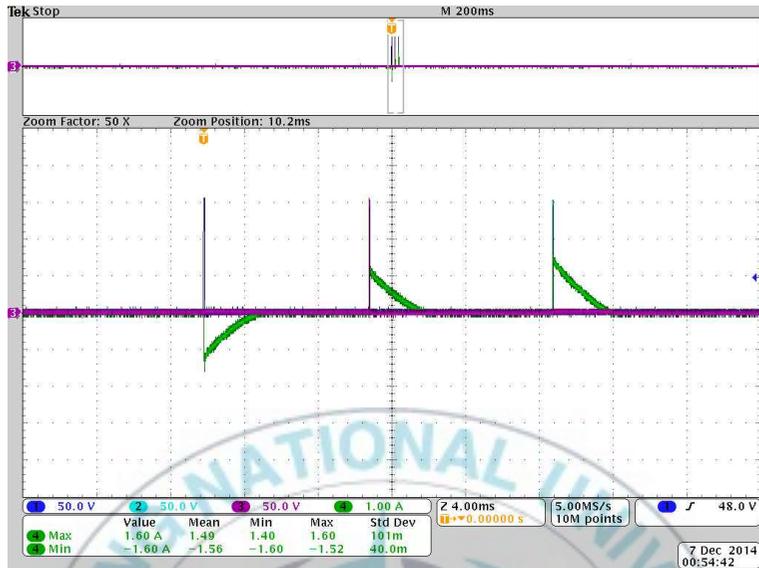


(b) 두 번째 전류응답(-2.84A)

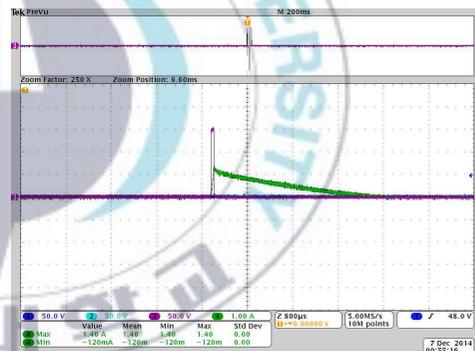


(c) 세 번째 전류응답(-1.48A)

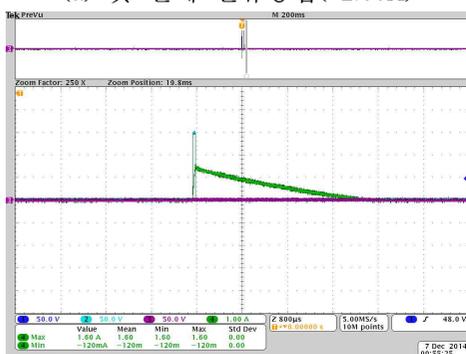
그림 5.5 N극이 0~30도에 위치할 때의 a상전류



(a) 첫 번째 전류응답(-1.60A)

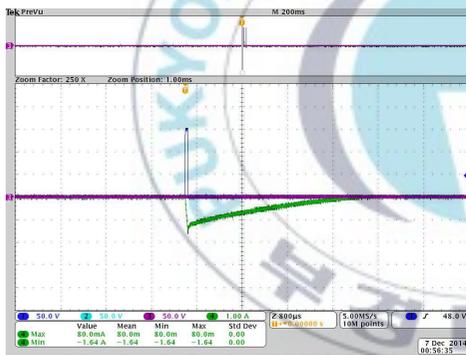
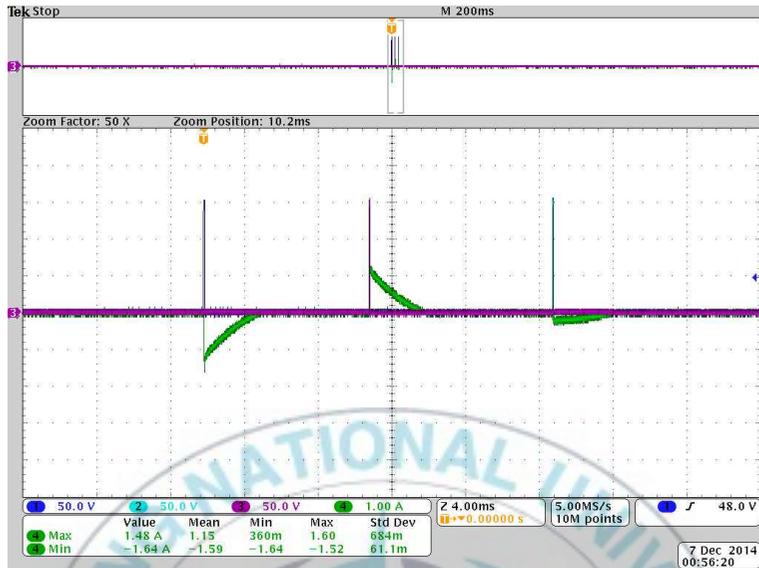


(b) 두 번째 전류응답(1.40A)

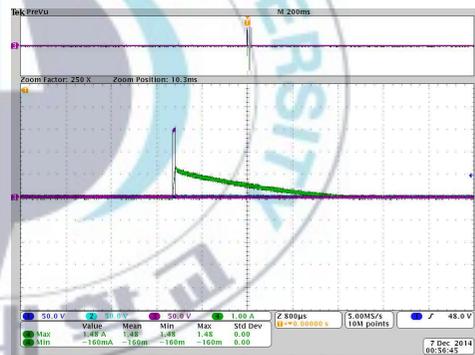


(c) 세 번째 전류응답(1.60A)

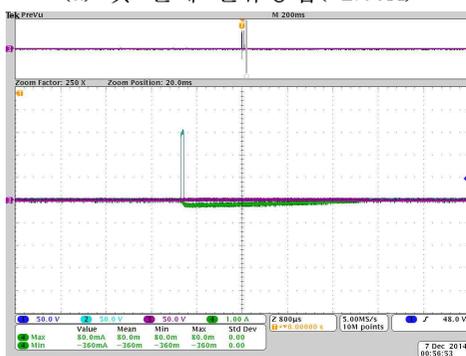
그림 5.6 N극이 0~30도에 위치할 때의 b상전류



(a) 첫 번째 전류응답(-1.65A)



(b) 두 번째 전류응답(1.48A)

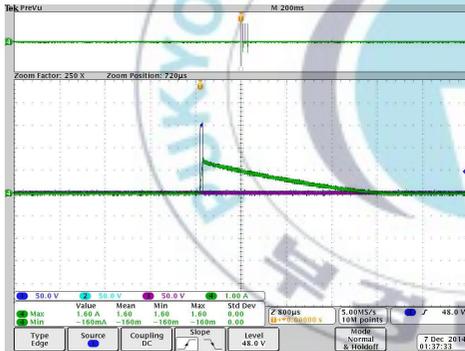
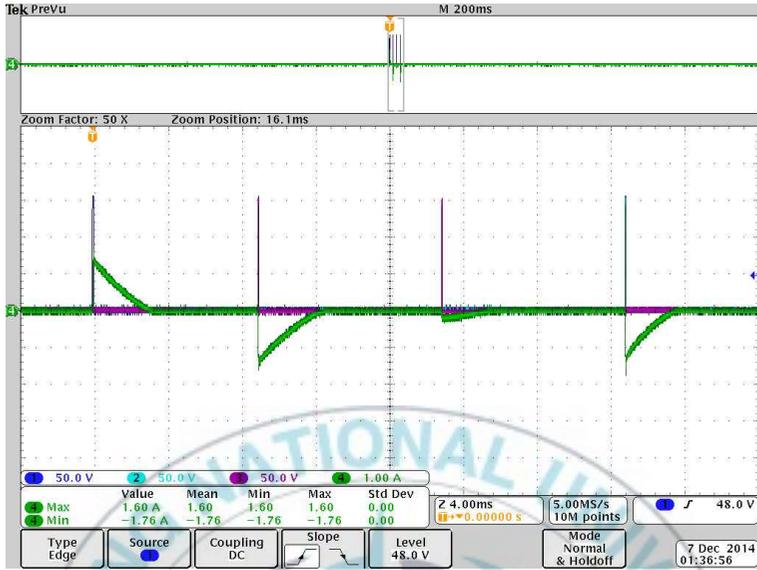


(c) 세 번째 전류응답(-360mA)

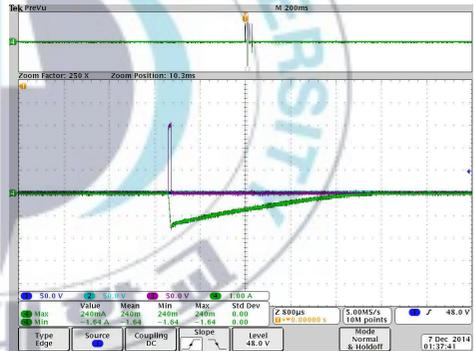
그림 5.7 N극이 0~30도에 위치할 때의 c상전류

그림 5.5, 5.6, 5.7은 N극을 최대한 V_1 에 가깝게 두기 위해 V_1 전압벡터를 인가하여 N극을 V_1 에 최대한 가깝게 유도 하였다. V_1 을 인가 시 a상전류 2.92A, V_4 를 인가 시 a상전류 -2.84A로 전류 절대 값의 크기는 V_1 을 인가했을 때의 a상전류가 더 크다. 그러므로 N극은 최초 180° 판별에서 우 반면에 위치한다. V_1 전압벡터 인가 시 b상전류는 -1.6A, c상전류는 -1.64A이다. 그 절대 값 대소 관계에서 $I_c > I_b$ 이므로 세 번째 펄스는 V_3 로 인가한다. V_3 인가 시 a상전류는 -1.84A, b상전류는 -360mA임으로 그 절대 값 대소 관계는 $I_a > I_c$ 이다. 세 상의 전류관계가 $I_a > I_c > I_b$ 임으로 응답으로 알 수 있는 위치가 $0^\circ \sim 30^\circ$ 사이임을 알 수 있다. 그림 3.1과 4.2를 참고하여 보면 N극이 V_1 위치와 근접함을 알 수 있다.

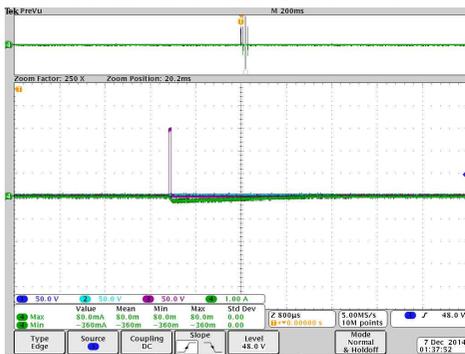




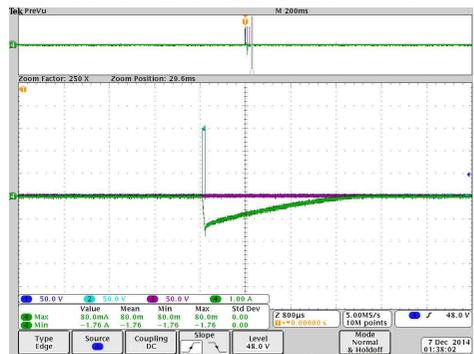
(a) 첫 번째 전류응답(1.60A)



(b) 두 번째 전류응답(-1.64A)

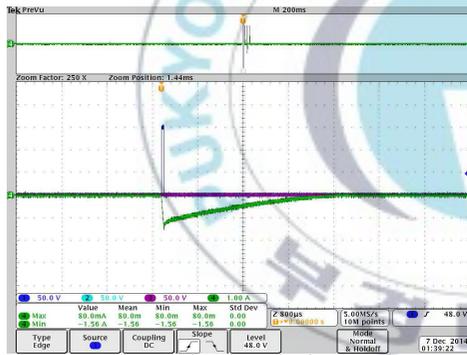
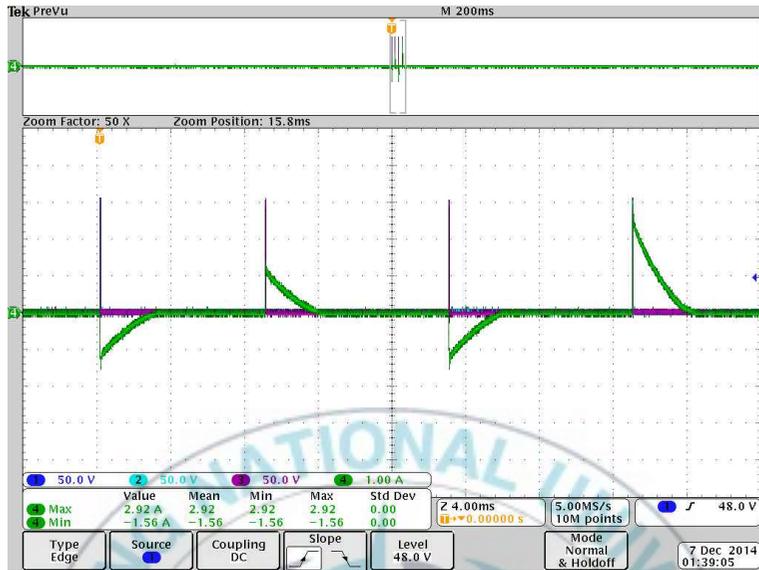


(c) 세 번째 전류응답(-360mA)

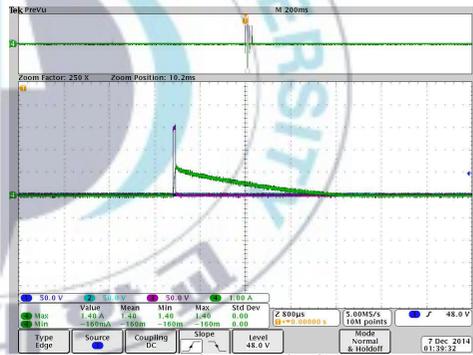


(d) 네 번째 전류응답(-1.76A)

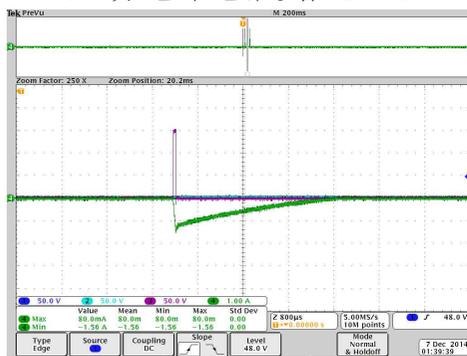
그림 5.8 N극이 120~150도에 위치할 때의 a상전류



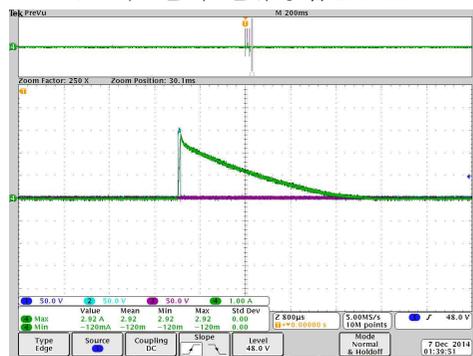
(a) 첫 번째 전류응답(-1.56A)



(b) 두 번째 전류응답(1.40A)

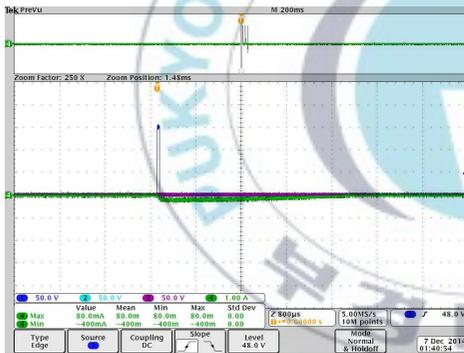
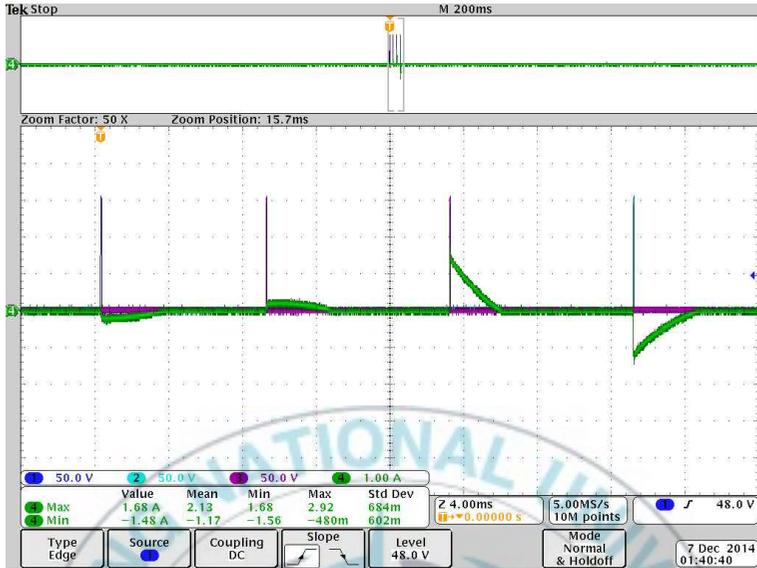


(c) 세 번째 전류응답(-1.56A)

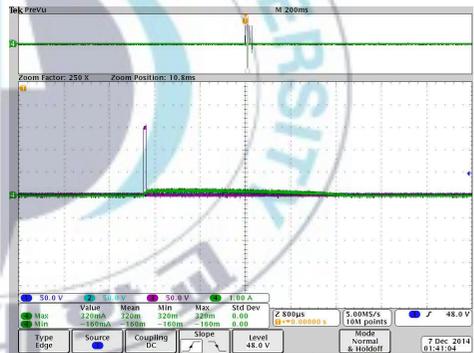


(d) 네 번째 전류응답(2.92A)

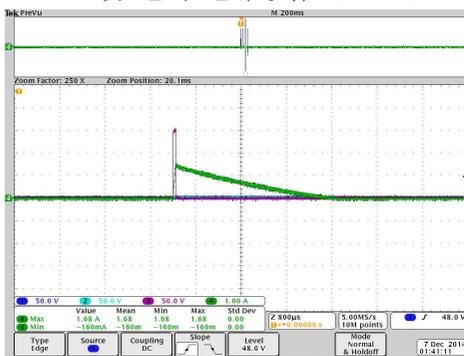
그림 5.9 N극이 120~150도에 위치할 때의 b상전류



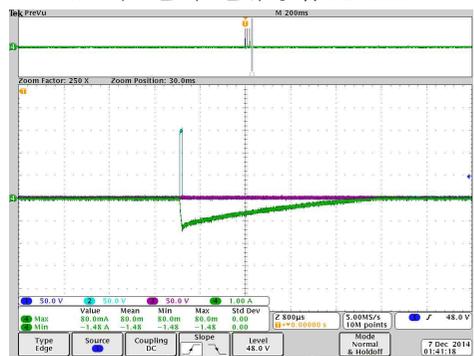
(a) 첫 번째 전류응답(-400mA)



(b) 두 번째 전류응답(320mA)



(c) 세 번째 전류응답(1.68A)

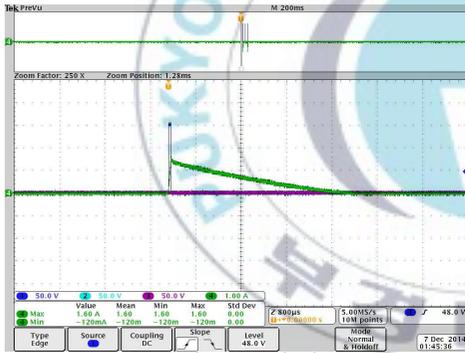
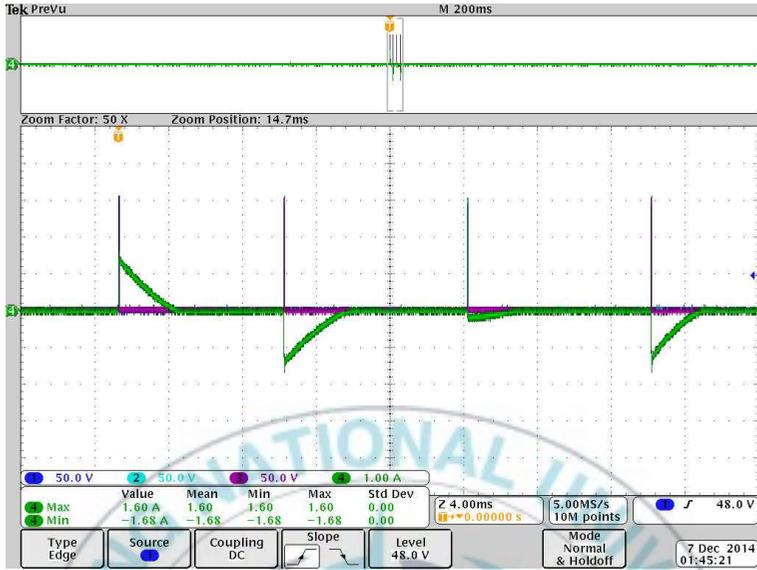


(d) 네 번째 전류응답(-1.48A)

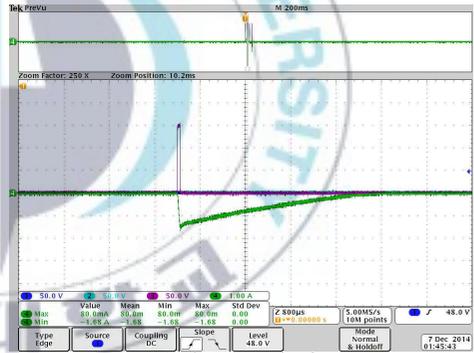
그림 5.10 N극이 120~150도에 위치할 때의 c상전류

그림 5.8, 5.9, 5.10는 N극을 V_3 로 유도 했을 때의 파형이다. V_4 를 인가 했을 때의 전류가 더 크기 때문에 N극은 좌 반면에 있다. 처음 전압펄스를 인가할 때 $I_b > I_c$ 이다. 세 번째 파형은 c상에 해당하는 V_5 전압벡터를 인가한 것이고 $I_b > I_a$ 이다. 네 번째 파형은 b상에 해당하는 V_3 전압벡터를 인가한 것으로 $I_a > I_c$ 이다. 결론적으로 세 상의 대소 관계는 $I_b > I_a > I_c$ 이고 N극의 위치는 $120^\circ \sim 150^\circ$ 사이이다.

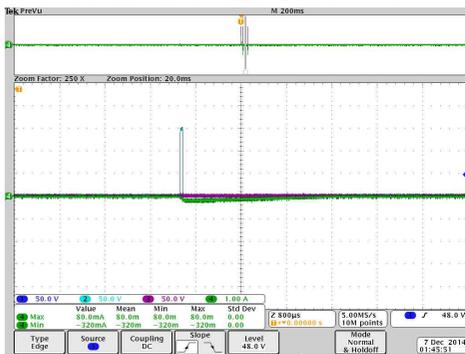




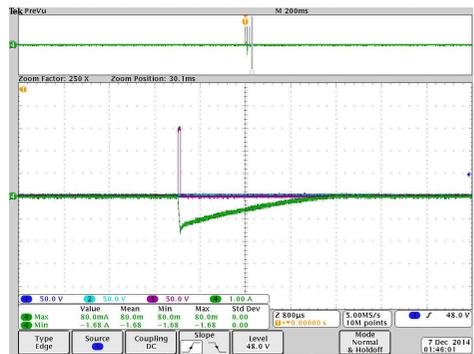
(a) 첫 번째 전류응답(1.60A)



(b) 두 번째 전류응답(-1.68A)

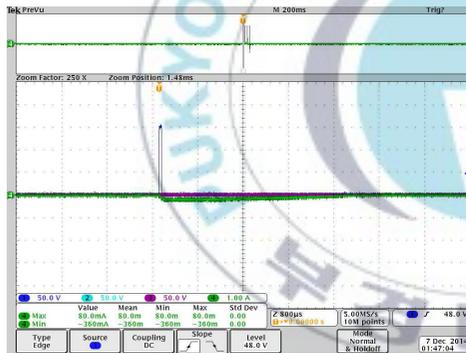
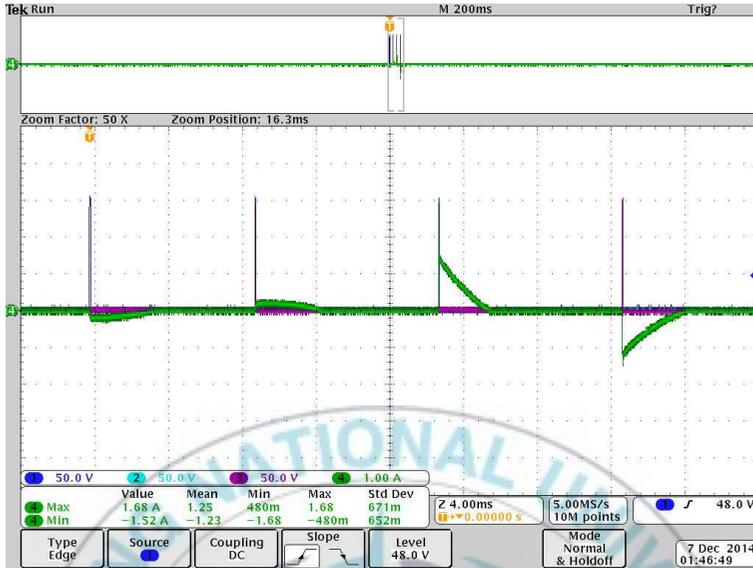


(c) 세 번째 전류응답(-320mA)

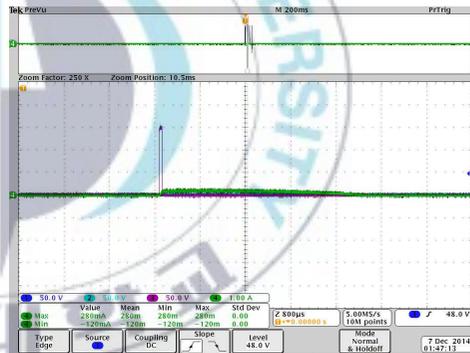


(d) 네 번째 전류응답(-1.68A)

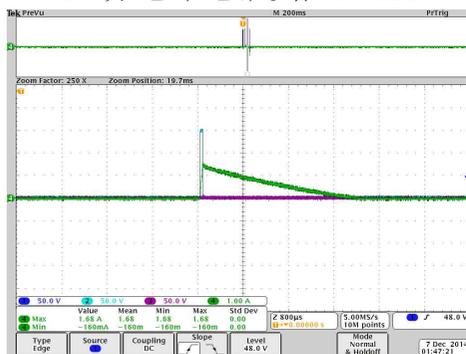
그림 5.11 N극이 210~240도에 위치할 때의 a상전류



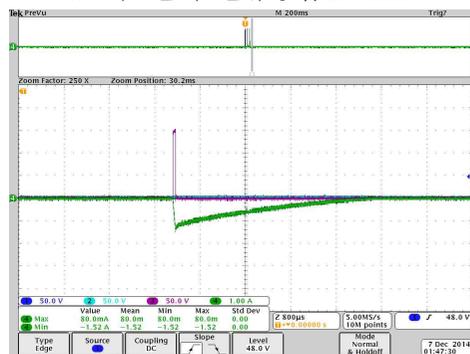
(a) 첫 번째 전류응답(-360mA)



(b) 두 번째 전류응답(280mA)

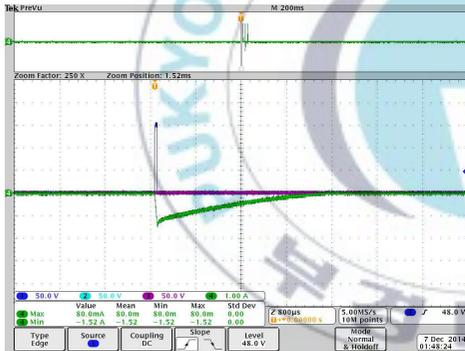
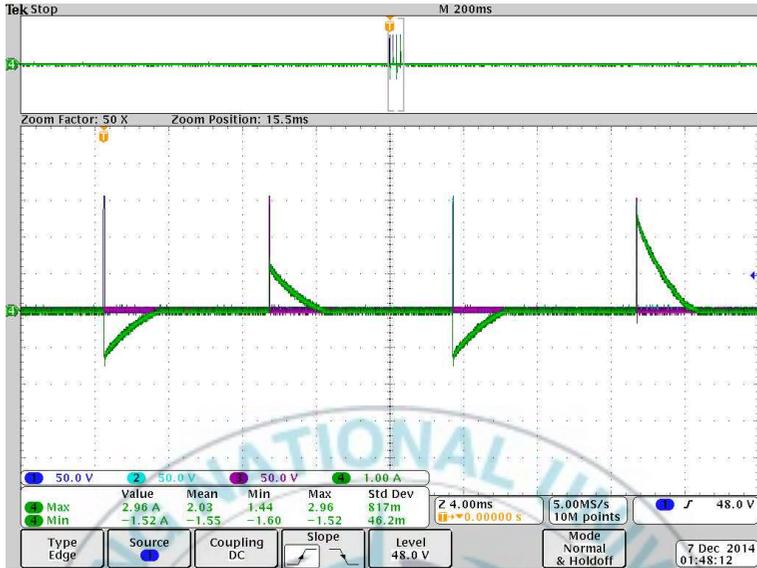


(c) 세 번째 전류응답(1.68A)

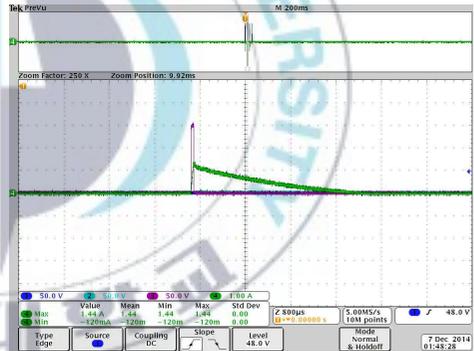


(d) 네 번째 전류응답(-1.52A)

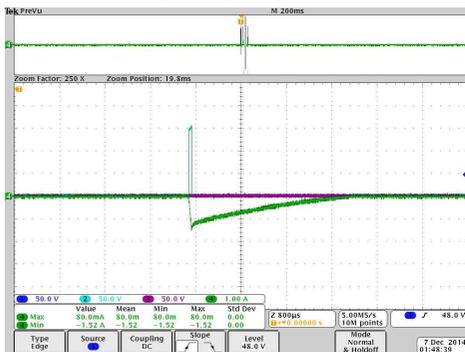
그림 5.12 N극이 210~240도에 위치할 때의 b상전류



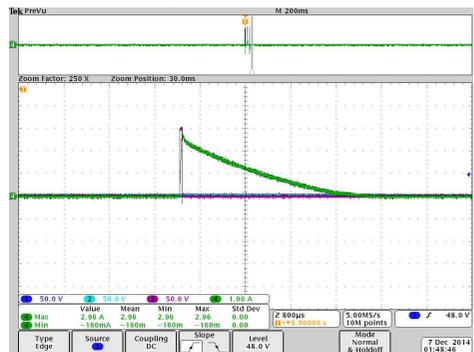
(a) 첫 번째 전류응답(-1.52A)



(b) 두 번째 전류응답(1.44A)



(c) 세 번째 전류응답(-1.52A)



(d) 네 번째 전류응답(2.96A)

그림 5.13 N극이 210~240도에 위치할 때의 c상전류

그림 5.11, 5.12, 5.13는 V_5 로 N극을 유도하여 측정한 파형이다. V_1 을 인가했을 때 보다 V_4 를 인가했을 때의 전류 응답이 더 크기 때문에 N극은 좌 반면에 있다. $I_b < I_c$ 이기 때문에 세 번째는 V_3 전압벡터가 인가되었다. $I_a < I_c$ 이고 대소 관계가 제대로 성립 안 됨으로 마지막 한 상이 있는 곳인 V_5 전압벡터를 인가하여 $I_a > I_b$ 임을 파악 하고 최종적으로 대소 관계를 파악한다. 최종 대소 관계는 $I_c > I_a > I_b$ 가 됨으로 N극의 위치는 $210^\circ \sim 240^\circ$ 사이에 위치하게 된다.



제 6 장 결론

본 논문에서는 기존의 IPMSM 센서리스 제어에서 회전자 초기 위치 추정 방법을 개선하였다.

전압펄스를 인가하여 추정하는 방법은 같은 크기와 폭을 가지는 전압펄스에 대하여 반응하는 전류의 변화율을 이용하여 회전자의 초기 위치를 추정하는 방식으로 부가적인 주입 신호가 없어 구현이 간단하고 전동기 상수의 영향을 받지 않는다. 이 전압펄스를 인가하여 추정하는 방법은 IPMSM의 인덕턴스 정보를 기반으로 하며 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 크기에 따라 달라지는 공간전압벡터 인가시의 전류응답의 크기를 비교하여 위치를 추정한다. 기존 방법들은 방법이 복잡하고 전압펄스 인가수가 많았다. 지속적인 연구와 개선으로 그 방법이 단순해지고 전압펄스 인가수가 점점 줄어들음으로 인해 초기 위치를 추정하는 시간이 짧아졌다.

제안되어진 초기 위치 추정 방법은 회당 평균 3.6번의 전압벡터를 인가하여 위치를 추정하기 때문에 이전 제안된 기존 방법에 비해 10~22% 빠르게 위치를 추정할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Sakutaro Nonaka and Takemi Kawaguchi (1991), "Variable-speed control of brushless half-speed synchronous motor by voltage source inverter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 3, pp. 545-551, IEEE.
- [2] Pragasen Pillay and Ramu Krishnan (1989), "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives.", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 2, pp. 517-522, IEEE
- [3] 김상훈 (2010), "DC, AC, BLDC 모터제어", pp. 211-227, 북두출판사
- [4] Alfio Consoli and Guuseppe Scarcella (1999), "Sensorless control of PM synchronous motors at zero speed", IEEE Transactions on Industry Applications Conference, Vol. 2, pp. 1033-1040, IEEE
- [5] Ryoji Mizutani, Takaharu Takeshita and Nobuyuki Matsui (1998), "Current model-based sensorless drives of salient-pole PMSM at low speed and standstill", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 4, pp. 841-846, IEEE
- [6] Antti Piippo, Janne Salomaki and Jorma Luomi (2008), "Signal Injection in sensorless PMSM drives equipped with inverter output filter", IEEE

Transactions on Industry Applications, Vol. 9, No. 44, pp. 1614-1620.

- [7] 장지훈 (2006), “영구자석 동기전동기 센서리스 제어의 운전 영역 확장에 관한 연구”, 서울대학교 공학 박사 학위 논문, pp. 4-26, 서울대학교
- [8] Jung-Ik Ha, Kozo Ide, Toshihiro Sawa and Seung-Ki Sul (2003), "Sensorless Rotor Position Estimation of an Interior Permanent-Magnet Motor from Initial States", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 3, pp. 761-767, IEEE
- [9] Raihana Mustafa, Zulkifilie Ibrahim and Jurifa Mat Lazi (2010), "Sensorless Adaptive Speed Control for PMSM Drives", The 4th International Power Engineering and Optimization Conference. pp. 511-516, IPEO
- [10] 이성준 (2014), “IPMSM 센서리스 제어의 전류 추정기에 의한 성능개선”, 부경대학교 공학 석사 학위 논문, pp. 5-8, 부경대학교
- [11] Daniel W.Hart, 홍순찬, 전희중, 윤용수 (2011), “전력전자공학”, pp.347-402, McGraw-Hill Korea
- [12] 박내춘, 이윤규, 김상훈 (2011), “인덕턴스의 포화현상을 이용한 IPMSM의 회전자 초기 위치 추정”, 전력전자학회 논문지, Vol. 16, No. 4, pp. 374-381, 전력전자학회

- [13] 김건명, 박병건, 구본관, 김래영, 현동석 (2011), “IPMSM 센서리스 제어의 안정된 기동을 위한 간단한 초기회전자 추정기법”, 전력전자학회 논문지, Vol. 16, No. 6, pp. 602-609, 전력전자학회
- [14] Wook-Jin Lee and Seung-Ki Sul (2006), "A New Startind Method of BLDC Motors Without Position Sensor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 6, pp. 1532-1538, IEEE
- [15] Peter B. Schmidt, Michael L. Gasperi, Glen Ray and Aith H. Wijenayake (1997), "Initial Rotor Angle Detection Of A Non-Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Machine", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 459-463, IEEE



감사의 글

우선 존경하옵는 정영석 교수님 사랑합니다. 타과에서 전과해온 저를 2년 동안 지도를 해 주시면서 여쭙 보기 미안할 정도로 기초적인 부분이더라도 차근차근 설명해 주셨습니다. 저는 여러 가지 면에서 정말 많은 것을 배우고 갑니다. 남에게 가르침을 줄때 그 부분 본받아 화내지 않고 답답해하지 않고 언제나 웃는 낯으로 다른 이에게 배필도록 하겠습니다. 끝나지 않을 것 같은 석사생 생활이 다 끝나가면서 지나온 2년을 되돌아 보면 교수님께 부끄럽기 그지없습니다. 이 부끄러운 점을 발판 삼아 앞으로 생활함에 같은 후회를 반복하지 않도록 하겠습니다.

논문 심사 위원장을 맡아 주신 권순재 교수님 사랑합니다. 2년 동안 교수님 수업은 빠지지 않고 들었습니다. 면접부터 논문 평가까지 맡아 주시었습니다. 이렇게 2년 동안 봐오면서 많은 것을 배웠습니다. 그리고 더 좋은 논문을 쓰게 해 주시려고 하나하나 다 읽어보시고 지도해 주셨습니다. 그동안 많은 도움 주셔서 고맙습니다.

논문 심사 위원을 맡아 주신 손정현 교수님 고맙습니다. 학교생활하면서 제대로 인사한번 드린 적 없지만 항상 학생들 통해 교수님에 대한 이야기를 많이 들었습니다. 언제나 좋은 이야기만 들려오기에 항상 한번 뵙고 싶었습니다. 논문심사를 통해 좋은 논문이 나오기 위해 지도해주셔서 고맙습니다.

조카가 항상 잘 되기를 바라시는 이일영 교수님 사랑합니다. 불민한 조카를 항상 챙겨주시고 어여빠 여겨 주셔서 정말 고맙습니다. 틈틈이 불러주시어 차 한 잔주시고 근황을 물어주시고 2년 동안 석사생 생활을 하면서 정말 많은 의지와 힘이 되었습니다.

2013년 한해를 함께 보내어 준 선배 이성준씨, 김준영씨 고맙습니다. 학교생활 적응에 도움을 많이 줘서 금방 적응했습니다. 덕분에 재미있게

석사생 생활을 시작하였고 배울 점도 배운 것도 많았습니다.

2년 동안 함께 생활한 동기 김성원, 성원아. 네가 함께 있어준 덕에 2년 무사히 마친 것 같다. 같이 웃고 같이 화내고 여러 가지로 공감해 줘서 정말 고맙다.

2014년 한해 같이 보낸 이송철, 송철아. 마지막 1년 석사생의 마무리는 네 덕이 잘 이루어진 것 같다. 물어보면 얼굴 한번 찌푸리지 않고 알아듣게 잘 알려줘서 이 논문을 잘 완성한 것 같다. 정말 고마우면서 미안하다.

우리 실험실 학부생들 태구, 인석, 현진, 내원. 짧은 기간이었지만 그동안 덕분에 즐거웠고 앞으로 너희 원하는 바를 잘 이루고 앞으로의 관계도 잘 꾸려 나가도록 하자.

나이 많은 아들이 수익활동이 없음에도 불구하고 물심양면으로 학업에 도움을 주신 아버지, 어머니 사랑합니다. 앞으로 부모님 은덕에 보답하는 아들이 되도록 하겠습니다.

사랑하는 나의 동생 현지야. 답답한 오라비 옆에서 항상 편들어주고 챙겨주고 정말 고맙다. 우린 남매니깐, 서로에게 시간 많으니깐 천천히 서로를 위해 살도록 하자.

사랑하는 초등학교 친구 재완아, 고등학교 친구 동찬아, 동우야, 체육관 동문 상민형, 재일아. 여러분들이 항상 응원해주어서 수월하게 생활한 거 같습니다. 고맙습니다.

마지막으로 2년 동안 서로에게 힘이 되어 주었던 9공학관에서 생활하는 여러분과 개인적인 지인분들. 일일이 언급하여 인사 못하는 점 정말 죄송합니다. 앞으로도 서로 간에 좋은 관계 유지 하면서 웃으면서 뵈었으면 합니다. 정말 고맙습니다.

2015 年 02 月

송 상 현 올림