



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0071673  
(43) 공개일자 2019년06월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H02P 21/00 (2016.01) H02P 1/02 (2006.01)  
H02P 21/10 (2016.01) H02P 21/18 (2016.01)  
H02P 21/34 (2016.01) H02P 6/04 (2016.01)  
H02P 6/18 (2016.01)  
(52) CPC특허분류  
H02P 21/0021 (2013.01)  
H02P 1/029 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2019-7006114  
(22) 출원일자(국제) 2017년11월09일  
심사청구일자 없음  
(85) 번역문제출일자 2019년02월28일  
(86) 국제출원번호 PCT/US2017/060773  
(87) 국제공개번호 WO 2018/089581  
국제공개일자 2018년05월17일  
(30) 우선권주장  
201610987245.7 2016년11월09일 중국(CN)  
15/802,246 2017년11월02일 미국(US)

(71) 출원인  
마이크로칩 테크놀로지 인코포레이티드  
미국 85224-6199 아리조나 챌러 웨스트 챌러  
블러바드 2355  
(72) 발명자  
왕, 웨이지  
중국, 201100, 상하이 시티, 망항, 빌딩 706 (웨  
스트), 룸 2301, 사우스 리양후아 로드 3988  
(74) 대리인  
특허법인세신

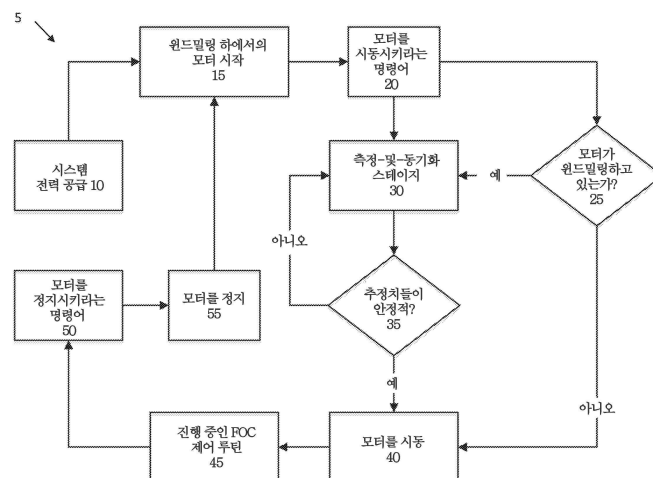
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 동기 모터들을 시동시키기 위한 시스템 및 방법

(57) 요약

윈드밀링하고 있는 PMSM의 시동(15)으로부터 비롯되는 제어 실패를 피하기 위해, 초기 속력 및 위치가 시동 전에 판정된다(5). 제어기는 속력 PI 제어 루프, 약계자 제어, 전류 PI 제어 루프, 및 속력 관측자를 갖는 FOC 루틴을 사용한다. 제어기가 PMSM을 시동하라는 명령어(20)를 수신하는 경우, 그것은 시동을 지연시키고 "추정" 스테이지를 실행하는데(30, 35), 여기서 제어기는 FOC 루틴을 실행시키지만 속력 PI 제어 루프 및 약계자 제어가 디스에이블되어 있다. 추정 스테이지는 다수회 반복되는데(35), 이때 추정치들은 연속 반복을 통해 실제 속력 및 위치에 수렴한다. 추정된 속력 및 위치 값들이 안정화되었을 때, PMSM을 구동하기 위한 초기 속력 및 위치로서 추정치들을 사용하여 모터가 시동된다(40). 속력 PI 제어 루프 및 약계자 제어가 인에이블된 상태의 FOC 루틴(45)이 PMSM을 구동하는 데 사용된다.

대표도 - 도10a



(52) CPC특허분류

*H02P 21/0089* (2013.01)

*H02P 21/10* (2013.01)

*H02P 21/18* (2016.02)

*H02P 21/34* (2016.02)

*H02P 6/04* (2013.01)

*H02P 6/181* (2013.01)

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

영구 자석 동기 모터(permanent magnet synchronous motor, PMSM)를 구동시키도록 구성된 모터 제어기로서, 상기 모터 제어기는 프로세서 및 비-전이적 기계 관독가능 매체를 포함하고, 상기 매체는 명령어들을 포함하고, 상기 명령어들은, 상기 프로세서에 의해 로딩되어 실행될 때,

상기 PMSM을 시동시키라는 커맨드를 수신하도록;

상기 PMSM을 시동시키기 전, 계자 배향 제어(field-oriented control, FOC) 벡터 제어 루틴을 사용함으로써 상기 PMSM의 위치 및 속력을 추정하도록;

상기 FOC 벡터 제어 루틴 동안, 속력 비례-적분(proportional-integral, PI) 제어 루프를 디스에이블시키도록;

상기 추정된 위치 및 속력을 회전자의 초기 속력 및 위치로서 사용하여 상기 PMSM을 시동하도록; 그리고

상기 속력 PI 제어 루프가 인에이블된 상태에서 상기 FOC 벡터 제어 루틴을 사용하여 상기 PMSM을 구동시키도록 상기 모터 제어기를 구성하는, 모터 제어기.

#### 청구항 2

제1항 또는 제3항 내지 제13항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 모터 제어기는:

상기 FOC 벡터 제어 루틴 동안, 약자속(flux-weaken) 루틴을 수행하도록; 그리고

상기 약자속 루틴을 디스에이블시켜서 상기 PMSM의 위치 및 속력을 추정하도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 3

제1항, 제2항, 또는 제4항 내지 제13항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 모터 제어기는 속력 및 위치에 대한 수신된 센서 판독치들이 없이 상기 PMSM을 구동시키도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 4

제1항 내지 제3항 또는 제6항 내지 제13항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 모터 제어기는:

상기 FOC 벡터 제어 루틴 동안, 입력들로서 모터 전류 및 전압이 수신되고 출력들로서 위치 및 속력이 판정되는 속력 관측을 수행하도록;

상기 PMSM을 시동하기 전에 위치 및 속력을 추정하는 경우, 상기 FOC 벡터 제어 루틴을 다수회 반복하도록; 그리고

상기 FOC 벡터 제어 루틴의 연속적인 반복을 통해 추정된 위치 및 속력을 실제 위치 및 속력에 수렴시키도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 5

제4항에 있어서,

상기 모터 제어기는 연속적인 루프들 사이에 실질적으로 어떠한 추정된 위치 및 속력의 가변성도 없도록 상기 추정된 위치 및 속력이 안정화될 때까지 상기 FOC 벡터 제어 루틴을 루프화하도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 6

제1항 내지 제5항 또는 제7항 내지 제13항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 모터 제어기는, 상기 FOC 벡터 제어 루틴 동안, 상기 PMSM을 구동하는 데 사용되는 전압들을 출력하도록 구성된 전류 비례-적분(PI) 제어 루프를 수행하도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 7

제1항 내지 제6항 또는 제10항 내지 제13항 중 어느 한 항에 있어서,

전류 센서를 추가로 포함하고, 상기 전류 센서는:

상기 PMSM의 모터 전류를 측정하도록; 그리고

상기 모터 전류를 상기 모터 제어기에 제공하도록 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 8

제7항에 있어서,

상기 모터 제어기는, 상기 FOC 벡터 제어 루틴 동안, 모터 전류 입력에 기초하여 속도 및 위치를 판정하기 위해 속도 관찰을 수행하도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 9

제8항에 있어서,

상기 모터 제어기는, 상기 FOC 벡터 제어 루틴 동안, 속도 관찰을 위해 전압들을 출력하도록 구성된 비례-적분(PI) 제어 루프를 수행하도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 10

제1항 내지 제9항 또는 제11항 내지 제13항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 모터 제어기는:

상기 PI 제어 루프로부터 출력된 전류 값을 수신하도록; 그리고

상기 전류 값을 실질적으로 0으로 설정하여, 상기 속도 PI 제어 루프를 디스에이블시켜서 시동 전의 상기 PMSM의 위치 및 속도를 추정하도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 11

제1항 내지 제10항 또는 제13항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 모터 제어기는:

상기 FOC 벡터 제어 루틴 동안, 약자속 루틴을 수행하도록; 그리고

시동 전의 상기 PMSM의 위치 및 속도를 추정하는 경우, 상기 FOC 벡터 제어 루틴을 사용할 때 상기 약자속 루틴을 디스에이블시키도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 12

제11항에 있어서,

상기 모터 제어기는:

상기 약자속 루틴 동안, 전류 값을 식별하도록; 그리고

상기 전류 값을 실질적으로 0으로 설정하여, 상기 약자속 루틴을 디스에이블시켜서 시동 전의 상기 PMSM의 위치 및 속도를 추정하도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 13

제1항 내지 제12항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 모터 제어기는 상기 PMSM에 전압 벡터를 제공하도록 구성된 다상 브리지(multiphase bridge)를 갖는 모터 구동 회로를 통해 상기 PMSM을 구동하도록 추가로 구성된, 모터 제어기.

#### 청구항 14

시스템으로서,

계자 배향 제어(FOC)를 통해 제어되도록 구성된 영구 자석 동기 모터(PMSM) - 상기 PMSM은 회전가능한 회전자를 포함함 -; 및

제1항 내지 제13항의 모터 제어기들 중 임의의 것을 포함하는, 시스템.

#### 청구항 15

회전자를 갖는 영구 자석 동기 모터(PMSM)를 제어하기 위한 방법으로서, 제1항 내지 제13항의 모터 제어기들 중 임의의 것의 동작을 포함하는, 방법.

### 발명의 설명

#### 기술 분야

[0001] 우선권

[0002] 본 출원은 2016년 11월 9일자로 출원된 중국 특허 출원 제201610987245.7호에 대한 우선권을 주장하며, 상기 출원의 내용은 그 전체가 본 명세서에 포함된다.

[0003] 기술분야

[0004] 본 발명은 일반적으로 시동 전에 회전하기 쉬운 동기 모터들의 시동에 관한 것으로, 보다 구체적으로는, 그들의 회전자들의 초기 위치(각도) 및/또는 회전 속력에 대한 정보를 수신하기 위한 센서들을 갖지 않지만 시동 시에 윈드밀링(windmill)하고 있을 수 있는 3-상 영구 자석 동기 모터(permanent magnet synchronous motor, PMSM)들의 시동에 관한 것이다.

#### 배경 기술

[0005] 영구 자석 동기 모터(PMSM)들은 그들의 카테고리 내의 다른 모터들과 비교하여 그들의 고효율 밀도, 고속 동적 응답, 및 고효율 때문에 디바이스 제조자들 사이에서 대중적인 선택안이다. PMSM들의 경우, 회전자 계자 속력은 고정자(전기자) 계자 속력과 동일해야 한다(즉, 동기식이어야 함). 회전자 계자와 고정자 계자 사이의 동기화의 손실은 모터가 정지하게 할 수 있고, 따라서 회전자 속력 및 위치를 아는 것은 그러한 모터들에서의 제어 실패를 회피함에 있어서 중요할 수 있다. 회전자들의 위치 및 속력을 판정하는 종래의 접근법들은 리졸버 인코더(resolver encoder), 증분 ABZ 인코더(incremental ABZ encoder), 절대 위치 인코더(absolute position encoder), 및 sin/cos 인코더와 같은 인코더들의 사용을 포함하지만, 이들은 비용 및 공간 요건들을 증가시킨다. 홀 효과 센서들이 때때로 사용되지만, 이들은 비용을 증가시키고 신뢰성이 낮다. 3-상 모터 단자 전압 감지 회로들이 또한 사용될 수 있지만, 이들은 모터를 작동시키기 위해 사용되는 제어기의 리소스들을 요구한다. 예를 들어, 전통적인 제어 방법은, 고정자를 6-단계 프로세스로 구동시켜서 생성된 토크에 대해 진동을 발생시키는 단계를 수반한다. 이러한 6-단계 제어에서, 회전자가 다음 위치에 도달할 때까지 권선들의 쌍에 에너지가 공급되고, 이어서 모터가 다음 단계로 정류(commutate)된다. 홀 센서들은 모터를 전자적으로 정류하도록 회전자 위치를 판정하는 데 사용될 수 있다.

[0006] 비용을 낮추기 위해, 인코더들 및 홀 센서들이 없는 모터들 - "센서리스" 모터들로 지칭됨 - 이 종종 사용된다. 이러한 센서들의 결여를 보상하기 위해, 센서리스 모터들은 고정자 권선에서 생성되는 역-EMF(back electromotive force)를 사용하여 회전자 위치를 판정하는 알고리즘들을 구현할 수 있다. 다른 센서리스 모터들은 구동 동안의 회전자 속력 및 위치를 추정하기 위해 속력 관측자를 사용한다. 그러나, 일부 응용예들에서, 모터는 그의 제어기가 작동을 중단한 후에도 회전할 수 있다. 즉, 모터는 외부 부하 토크에 의해 회전될 수 있거나, 또는 모터는, 제어기가 모터를 작동시키는 것을 정지한 후, 그 자신의 관성의 결과로서, 회전하는 것을 유지할 수 있다. 그러한 모터들은, 일반적으로, 일단 모터가 더 이상 구동되고 있지 않으면, 모터가 회전하는 것을 정지시키는 제동장치들을 갖지 않는다. 회전자가 시동 전에 그 자체로 회전할 수 있는 경우(즉, 윈드밀링하기 쉬운 경우), 제어기는 시동 시간에서의 회전자의 초기 위치 및 속력을 알지 못한다. 센서리스 모터들이 역-

EMF 또는 속력 관측자를 사용하여, 모터가 구동되는 동안의 회전자 위치 및/또는 속력을 판정하거나 추정할 수 있지만, 이러한 접근법들은 모터가 시동되기 전에 모터들을 윈드밀링하는 초기 속력 및 위치에 대한 정보를 제공하지 않는다.

[0007] 일부 센서리스 모터들은 모터 속력, 위치, 토크 및 전압을 측정하지 않고서 계자 배향 제어(field-oriented control, FOC) 벡터 알고리즘들을 사용한다. 이는 공조 유닛, 천장 팬, 펌프, 전기 자전거, 핸드 드라이어(hand dryer), 풍력 발전기, 및 드론과 같은 무인 항공기와 같은 응용예들에서 공통적이다. 모터 제어기/마이크로제어기("MCU") 및 인버터가 그러한 PMSM들을 구동시키는 데 종종 사용된다. 이러한 모터들의 회전자들은 제어기가 모터를 시동시키기 전에 초기 "프리-러닝(free-running)" 속력을 가질 수 있기 때문에, 초기 프리-러닝 속력 및 회전자 위치는 제어기/MCU에 알려져 있지 않다. 이는 모터를 매끄럽게 작동시키는 것을 어렵게 하며, 이는 PMSM들에 대한 센서리스 FOC의 적용가능성을 감소시켰다.

[0008] PMSM들의 효과적인 제어는 모터 시동 시에 PMSM의 초기 위치 및 속력에 대한 지식을 필요로 한다. 현재 시스템들은 인코더들 또는 홀 센서들을 사용하여 속력/위치를 측정하거나, 또는 추가 감지 회로부를 사용하여 모터 위상 전압들을 측정하며; 이들은 시스템을 더 복잡하고 비싸게 만든다. 센서 판독치들로부터 그러한 정보가 입수 가능하지 않을 때 시동 전의 PMSM의 위치 및/또는 속력을 추정하기 위한 경제적인 방법 및 시스템이 필요하다.

### 발명의 내용

[0009] 개시되는 발명은 모터가 시동되기 전의 동기 모터의 위치 및 속력의 추정을 수반한다. 예시적인 실시예들에서, 제어기("MCU")는 속력 비례-적분(proportional-integral, PI) 제어 루프, 약계자(field-weaken) 제어, 전류 PI 제어 루프, 및 속력 관측자를 포함하는 계자 배향 제어(FOC) 벡터 제어 루틴을 사용하여 영구 자석 동기 모터(PMSM)를 제어한다. MCU가 PMSM을 작동시키는 것을 시작하라는 명령어를 수신한 경우, 그것은 지연 기간 동안 시동을 지연시켜서 그것이 측정-및-동기화(measure-and-synchronize, "MAS") 또는 "추정" 스테이지를 실행시킬 수 있도록 한다. MAS 스테이지에서, MCU는 모터를 작동시키는 데 통상적으로 사용되는 FOC 벡터 제어 루틴을 실행시키지만, MCU는 FOC 벡터 제어 루틴 내의 속력 PI 제어 루프 및 약계자 제어를 비활성화시킨다. 속력 PI 제어 루프 및 약계자 제어는 속력 PI 제어 루프 및 약계자 제어에 의해 출력되는 (그리고 FOC 벡터 제어 루틴 내의 다른 모듈들에 의해 사용되는) 전류를 실질적으로 0으로 (또는 일정한 낮은 값으로) 설정함으로써 효과적으로 비활성화된다.

[0010] MAS 스테이지는 지연 기간 동안 다수회 실행될 수 있으며, 각각의 반복은 속력 및 위치에 대한 추정치를 제공한다. MAS 스테이지의 각각의 반복에서, FOC 벡터 제어 루틴의 속력 관측자는 입력들로서 PMSM으로부터 전류 측정치들을 그리고 전류 PI 제어 루프로부터 전압들을 수신하고, 그것은 속력 및 위치에 대한 추정치들을 출력들로서 제공한다. 속력 관측자에 의해 출력되는 추정된 속력 및 위치 값들은 MAS 스테이지의 각각의 반복에 따라 변하며, 이때 MAS 스테이지가 반복됨에 따라 속력 및 위치에 대한 추정치들이 PMSM의 실제 속력 및 위치에 수렴한다.

[0011] 일단 추정된 속력과 위치가 안정화되면 - 즉, MAS 스테이지의 후속 반복을 통한 추정된 속력 및 위치의 변동이 허용가능하게 작을 때 - 지연 기간이 종료될 수 있다. 지연 기간의 종료 시에, MCU는 FOC 벡터 제어 루틴을 사용하여 PMSM을 작동시키는 것을 시작하지만, 이때 속력 PI 제어 루프 및 약자속(flux-weaken) 제어가 재활성화된다. 지연 기간의 종료 시의 속력 및 위치에 대한 최종 추정 값들은, 제어기가 PMSM을 구동하기 시작할 때의 초기 속력 및 위치로서 사용된다. 선택적으로, MAS 스테이지를 실행시키기 전 또는 그 후, 모터가 윈드밀링하고 있는지 판정될 수 있다.

[0012] 모터 시동 전에 MAS 스테이지를 사용하여 속력 및/또는 위치를 추정하는 것은 센서들을 사용하여 위치 및 속력을 측정할 필요 없이 동기 모터들의 제어를 크게 향상시킨다. MAS 스테이지에서, 제로-전류(zero-current) 커맨드는 제어기가 모터를 시동시킬 때 토크 쇼크를 제거할 수 있다. 이러한 스테이지에서, 속력 관측자는 회전자 속력 및 위치를 실시간으로 분석하고 추정하여, 제어기가 그의 알고리즘을 모터와 동기화시킬 수 있는 지연 기간을 제공한다. 유리하게는, 그러한 시동은 추가 하드웨어에 대한 필요성 없이 PMSM의 마이크로제어기를 사용하여 실현될 수 있다.

[0013] 본 발명의 추가 이점들 및 특징부들은 연관된 도면과 관련하여 본 명세서의 나머지 부분으로부터 명백해질 것이다.

### 도면의 간단한 설명

[0014]

도 1은 영구 자석 동기 모터(PMSM)를 구동시키기 위한 센서리스 계자 배향 제어(FOC) 알고리즘의 블록도 표현이다.

도 2a는 Clarke 변환(Clarke Transform)을 도시하고 도 2b는 Park 변환(Park Transform)을 도시하며, 이들 양측 모두는 도 1의 FOC 알고리즘에서 사용된다.

도 3은 도 1의 FOC 알고리즘의 비례-적분(PI) 제어 루프들이 어떻게 구현될 수 있는지를 도시한다.

도 4a는 역-Clarke 변환을 도시하고 도 4b는 역-Park 변환을 도시하며, 이들 양측 모두는 도 1의 FOC 알고리즘에서 사용된다.

도 5a는 인버터 출력들의 8개의 가능한 상태들 중 6개를 표현하는 공간 벡터 변조(space vector modulation, SVM) "스타(star)"를 도시한다. 도 5b는 생성된 벡터가 2개의 인접한 벡터들의 성분들의 합에 의해 표현되는 SVM 프로세스를 표현한다.

도 6은 벡터 T1이 T1/T 동안 출력되고, 벡터 T2가 T2/T 동안 출력되고, 널(null) 벡터들이 나머지 시간에 출력되는 펄스 폭 변조(pulse width modulation, PWM) 기간 T를 표현한다.

도 7은 위치 추정기 기능 블록도를 제공한다. 모터 위치 및 속력은 도 1의 FOC 알고리즘에서 측정된 전류 및 계산된 전압에 기초하여 추정될 수 있다.

도 8은 계자 약화 프로세스(field weakening process)에 대한 기능 블록도를 표현한다.

도 9는 좌측(측정-및-동기화("MAS") 스테이지)이 속력 PI 제어 루프 및 약자속 제어를 비활성화시키도록 수정되고 우측(이는 지속적으로 PMSM을 구동시키는 데 사용되는 FOC 벡터 제어 루틴을 도시함)은 수정되지 않은 도 1의 FOC 알고리즘의 단순화된 블록도 표현을 제공한다.

도 10a 및 도 10b는 윈드밀링하기 쉬운 PMSM이 도 9의 MAS 스테이지를 사용하여 시동될 수 있는 예시적인 프로세스들에 대한 흐름도들이다.

특정의 예시적인 실시예들이 도면에 도시되고 본 명세서에서 상세히 기술되지만, 특정의 예시적인 실시예들에 대한 본 명세서에서의 설명은 본 발명을 본 명세서에서 개시되는 특정 형태로 제한하도록 의도되지 않는다는 것이 이해되어야 한다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0015]

본 발명은 계자 배향 제어("FOC") 하에서 구동되는 3-상 영구 자석 동기 모터(PMSM)들의 시동과 관련된다. 모터들의 FOC 벡터 제어는 3-상 AC 전기 모터의 고정자 전류가 모터의 자속 및 그의 토크에 의해 특징지어지는 제어 방법이다. FOC는 고정자 전류의 토크 및 자속 생성 성분들을 디커플링시킬 목적으로 자속들 중 하나(회전자, 고정자, 또는 에어갭)가 다른 자속들 중 하나에 대한 기준 프레임을 생성하기 위한 기초로서 처리되는 방법이다. 그러한 디커플링은 별개의 여기(excitation)를 갖는 DC 모터들과 동일한 방식으로 복잡한 3-상 모터들에 대한 제어의 편의성을 보장하는 것을 돕는다. 전기자 전류가 토크 발생을 위해 사용될 수 있고, 여기 전류가 자속 발생을 위해 사용될 수 있다. 특정 응용예들에서, 회전자 자속은 고정자 및 에어갭 자속에 대한 기준 프레임으로서 고려될 수 있다. FOC 배후의 원리들이, AN1078, "Sensorless Field Oriented Control of a PMSM" (2010) 및 AN1292, "Sensorless Field Oriented Control (FOC) for a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Using a PLL Estimator and Field Weakening (FW) Controllers" (2009)와 같은, Microchip Technology Inc.로부터의 여러 개의 애플리케이션 노트(application note)들을 포함한 문헌에서 논의되어 있으며, 상기 양측 애플리케이션 노트들은 본 명세서에 참고로 포함된다.

[0016]

도 1의 센서리스 FOC 벡터 제어에 대한 블록도를 먼저 참조하면, PMSM(105)은 정류기, 인버터, 및 획득 및 보호 회로부를 포함할 수 있는 3-상 브리지(135)로부터 전류를 수신한다. 마이크로제어기("MCU")에 의해 실행되는 소프트웨어를 사용하여 구현될 수 있는 간접 벡터 제어 프로세스는 다음과 같이 요약될 수 있다. 첫째, 3-상 고정자 전류가 측정되어,  $i_a$  및  $i_b$ 에 대한 값들을 제공한다.  $i_c$ 에 대한 값이 수학적  $i_a + i_b + i_c = 0$ 을 사용하여 계산될 수 있다. 둘째, 3-상 전류가 2-축 시스템으로 변환된다. 이러한 변환은 측정된  $i_a$  및  $i_b$  값들, 및 계산된  $i_c$  값을 사용하여 변수들  $i_\alpha$  및  $i_\beta$ 를 제공하며;  $i_\alpha$  및  $i_\beta$ 는 고정자의 관점에서 볼 때 시변 직교 전류 값들이다. 셋째, 2-축 좌표계가 제어 루프의 마지막 반복에서 계산된 변환 각도를 사용하여 회전자 자속과 정렬하도록 회전된다. 이러한 변환은  $i_\alpha$  및  $i_\beta$ 로부터  $I_d$  및  $I_q$  변수들을 제공한다.  $I_d$  및  $I_q$ 는 회전 좌표계로 변환된



직교 전류이다. 정상 상태 조건의 경우,  $I_d$  및  $I_q$ 는 일정하다.

[0017] 넷째, 여러 신호들이 각각에 대한 기준 값들과 함께  $I_d$  및  $I_q$ 를 사용하여 형성된다.  $I_d$  기준은 회전자 자화 자속의 제어에 관여되며,  $I_q$  기준은 모터의 토크 출력의 제어에 관여된다. 여러 신호들은 PI 제어기들에 입력된다. 제어기들의 출력들은  $V_d$  및  $V_q$ 를 제공하는데, 이들은 모터로 전송될 전압 벡터들이다. 다섯째, 변환 각도가 추정되는데, 여기서  $v_a$ ,  $v_b$ ,  $i_a$ , 및  $i_b$ 가 입력들이다. 변환 각도는 다음 전압 벡터를 어디에 배치할 것인지에 대해 FOC 알고리즘을 안내한다. 여섯째, PI 제어기들로부터의  $V_d$  및  $V_q$  출력 값들은 변환 각도를 사용하여 고정 기준 프레임으로 다시 회전된다. 이러한 계산은 다음 직교 전압 값들  $v_a$  및  $v_b$ 를 제공한다. 그리고, 일곱째,  $v_a$  및  $v_b$  값들은 3-상 값들  $v_a$ ,  $v_b$ , 및  $v_c$ 로 다시 변환된다. 3-상 전압 값들은 원하는 전압 벡터를 생성하는 새로운 펄스 폭 변조(PWM) 듀티 사이클 값들을 계산하는 데 사용된다. 변환, PI 반복, 역변환 및 PWM 발생 프로세스가 도 1에 도시되어 있다. 이러한 간접 벡터 제어 프로세스에 대한 추가 세부사항들이 이제 제공될 것이다.

[0018] 일련의 좌표 변환들을 통해, 토크 및 자속의 시불변 값들이 간접적으로 결정될 수 있고 전형적인 PI 제어 루프들로 제어될 수 있다. 프로세스는 3-상 모터 전류를 측정함으로써 시작한다. 먼저, Clarke 변환은 고정자로 레퍼런스되는 3-축 2차원 좌표계를 2-축 시스템 상으로 이동시켜서, 동일한 기준을 유지시킨다(도 2a 참조, 여기서  $i_a$ ,  $i_b$ , 및  $i_c$ 는 개별 위상 전류들임). 고정자 전류가  $\alpha$ - $\beta$  축을 갖는 2-축 직교 시스템 상에 표현된 상태에서, 다음 단계는 회전자 자속으로 회전하고 있는 또 다른 2-축 시스템으로 변환하는 것이다. 이러한 변환은 도 2b에 도시된 바와 같이 Park 변환을 사용한다. 이러한 2-축 회전 좌표계는 d-q 축으로 지칭된다. 여기서,  $\theta$ 는 회전자 각도를 표현한다.

[0019] 3개의 상호작용 변수들, 즉 회전자 속력, 회전자 자속, 및 회전자 토크를 독립적으로 제어하기 위한 3개의 상호 의존성 PI 제어 루프들이 있으며, 이들은 별개의 PI 모듈에 의해 각각 제어된다. 구체적으로, 하나의 PI 루프는 모터 속도를 제어하기 위한 것이고, 2개의 PI 루프들은 변환된 모터 전류들  $I_d$  및  $I_q$ 를 제어하기 위한 것이다.  $I_d$  루프는 자속을 제어하는 데 관여되고,  $I_q$  값은 모터 토크를 제어하는 데 관여된다. 구현에는, 도 3에 도시된 바와 같이, 적분 와인드업(integral windup)을 제한하는 항 " $K_c \cdot \text{Excess}$ "를 포함한다. "Excess"는 무제한 출력(U) 및 제한 출력(Out)을 감산함으로써 계산된다. 용어 " $K_c$ "는 Excess와 곱해져서, 누적된 적분 부분(Sum)을 제한한다. PI 반복 후에는, 회전 d-q 축에 2개의 전압 성분 벡터들이 있다. 상보적인 역-변환들이 3-상 모터 전압으로 복귀하는 데 사용된다. 먼저, 프로세스는 2-축 회전 d-q 프레임으로부터 2-축 고정 프레임  $\alpha$ - $\beta$ 로 변환한다. 이러한 변환은 도 4a에 도시된 역-Park 변환을 사용한다. 다음, 프로세스는 고정자의 고정 2-축  $\alpha$ - $\beta$  프레임으로부터 고정 3-축, 3-상 기준 프레임으로 변환한다. 수학적으로, 이러한 변환은 도 4b에 도시된 역-Clarke 변환으로 달성된다.

[0020] 벡터 제어 프로세스의 최종 단계는 공간 벡터 변조(SVM) 기법들을 이용하여 달성될 수 있는 3-상 모터 전압 신호들 각각에 대한 펄스 폭 변조(PWM) 신호들을 생성하는 것이다. 프로세스를 단순화하기 위해, 역-Clarke 변환은 SVM 루틴 내에 포함될 수 있다. 3개의 인버터 출력들 각각은 2개의 상태들 중 하나일 수 있다. 인버터 출력은 플러스(+) 버스 레일 또는 마이너스(-) 버스 레일 중 어느 하나에 접속되어, 표 1에 나타난 바와 같이, 출력에 대한 2의 3제곱(즉, 8) 가능 상태들을 허용할 수 있다.

표 1

위상C	위상B	위상A	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$	$V_{ds}$	$V_{qs}$	벡터
0	0	0	0	0	0	0	0	U(000)
0	0	1	$V_{DC}$	0	$-V_{DC}$	$2/3V_{DC}$	0	$U_6$
0	1	1	0	$V_{DC}$	$-V_{DC}$	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$U_{60}$
0	1	0	$-V_{DC}$	$V_{DC}$	0	$-V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$U_{120}$
1	1	0	$-V_{DC}$	0	$V_{DC}$	$-2V_{DC}/3$	0	$U_{180}$
1	0	0	0	$-V_{DC}$	$V_{DC}$	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$U_{240}$
1	0	1	$V_{DC}$	$-V_{DC}$	0	$V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$U_{300}$
1	1	1	0	0	0	0	0	U(111)

[0021]

[0022] 3개의 출력들 모두가 플러스(+) 버스 또는 마이너스(-) 버스 중 어느 하나에 접속되는 2개의 상태들은 널 상태



들로 간주되는데, 그 이유는 위상들 중 임의의 위상에 걸쳐서 어떠한 라인별(line-to-line) 전압도 없기 때문이다. 이들은 SVM 스타의 원점에서 플롯팅된다. 나머지 6개의 상태들은, 도 5a에 도시된 바와 같이, 각각의 상태 사이에 60도 회전을 갖는 벡터들로서 표현된다. SVM 프로세스는 2개의 인접한 벡터들의 성분들의 합에 의한 임의의 합성 벡터의 표현을 허용한다. 도 5b에서, UOUT은 원하는 합성값이다. 그것은 U60과 U0 사이의 구간 내에 있다. 주어진 PWM 기간 T 동안, U0이 T1/T 동안 출력되고 U60이 T2/T 동안 출력되면, 주기 동안의 평균은 UOUT 일 것이다. T0은 어떠한 유효 전압도 권선에 인가되지 않는 시간; 즉, 널 벡터가 적용되는 시간을 표현한다. T1 및 T2에 대한 값들은 수정된 역-Clarke 변환을 사용함으로써 어떠한 가의 계산 없이도 추출될 수 있다.  $V_\alpha$  및  $V_\beta$ 가 반전되는 경우, SVM 스타로부터 30도만큼 시프트되는 기준 축이 생성된다. 그 결과, 6개의 세그먼트들 각각에 대해, 하나의 축은 해당 세그먼트에 정확히 반대이고, 다른 2개의 축들은 그 세그먼트에 대칭으로 경계지어진다. 이들 2개의 경계 축들을 따르는 벡터 성분들의 값들은 T1 및 T2와 같다.

[0023] 도 6에서 알 수 있는 바와 같이, PWM 기간 T의 경우, 벡터 T1이 T1/T 동안 출력되고, 벡터 T2가 T2/T 동안 출력된다. 나머지 시간 동안 널 벡터들이 출력된다. 마이크로제어기는 중심-정렬 PWM을 위해 구성될 수 있는데, 이는 기간의 중심에 대해 대칭성을 강제한다. 이러한 구성은 각각의 기간 동안 라인별로 2개의 펄스들을 생성한다. 유효 스위칭 주파수는 두 배로 되어, 전력 디바이스들에서의 스위칭 손실을 증가시키지 않으면서 리플(ripple) 전류를 감소시킨다.

[0024] 정류 각도( $\theta$ ) 및 모터 속력( $\omega$ )을 추정하기 위해, 센서리스 제어 기법은 위치 센서들을 사용하지 않고서 모터의 위치를 추정함으로써 FOC 알고리즘을 구현한다. 도 7은 위치 추정기 기능의 단순화된 블록도를 도시한다. 모터 위치 및 속력은 측정된 전류 및 계산된 전압에 기초하여 추정된다.

[0025] PMSM에 대한 계자 약화 제어는 회전 프레임의 d-축 상에 고정자 전류에 대한 네거티브 값을 부과하는 것을 암시하며, 이는 에어갭 쇄교 자속(flux linkage)을 약화시키는 역할을 갖는다. 인버터의 경우에, 전압 출력은 고정자의 저항 및 유도 리액턴스 상에서 강하하고, 나머지 전압은 모터의 속력 및 모터의 전압 상수  $K_\Phi$ 에 비례하는 역-EMF에 대응하는 데 사용된다. 인버터의 최대 출력 전압 한도를 고려하면, 에어갭 쇄교 자속과 비례하는 전압 상수( $K_\Phi$ )를 감소시킴으로써 (공칭 속력 초과)의 속력 증가가 달성될 수 있다. 에어갭 쇄교 자속 감소는 토크 감소와 동의어이다. 그러나, 특정 응용예들의 경우, 모터는 정격 속력보다 더 높게 작동시킬 필요가 있고, 따라서, 계자 약화 특징부는 모터의 속력 범위를 그의 공칭 속력 등급 너머로 증가시키는 데 유용하다. 도 8은 계자 약화의 블록도를 도시하며, 여기서 y-축은 암페어 단위의  $I_d$ 이고 x-축은 분당 회전수(RPM)인 속력이다.

[0026] 도 9를 참조하면, 본 발명의 예시적인 실시예들은 센서리스 FOC 벡터 제어 루틴(100) 하에서 3-상 PMSM들(105)의 시동을 향상시킨다. 보통, 그러한 응용예들은 비용을 낮추기 위해 모터 속력, 위치, 토크 및 전압을 측정하지 않고서 모터 전류만을 측정한다. 제어기(MCU) - 예컨대, 디지털 신호 제어기(digital signal controller, DSC), 또는 디지털 신호 프로세서(digital signal processor, DSP)를 갖는 마이크로제어기 - 가 PMSM(105)을 위한 구동기(110)의 일부로서 사용될 것이다. 스테이지(100)는 PMSM이 정상적으로 작동할 때 그 PMSM을 구동시키는 데 사용되는 센서리스 FOC 벡터 제어 루틴을 표현한다. 구동기(110)는 펄스 폭 변조기(PWM) 및 인버터 구동 유닛을 포함하며; 그것은 모터 위상들에 인가되는 실제 3-상 전압 벡터( $\vec{V}_s$ )로부터 전압 벡터 커맨드( $\vec{V}_s^*$ )를 실현하는 것을 담당하는 액추에이터이다.  $\vec{V}_s^*$ 이 PMSM(105)에 적용될 때, PMSM(105)은 모터 전류  $\vec{I}_s$ , 토크  $T_e$ , 회전자 위치  $\theta_e$ , 및 회전자 회전 속력  $\omega_e$ 을 산출할 것이다.

[0027] PMSM 센서리스 FOC 벡터 제어 루틴(100)에서, 회전자 위치, 속력, 및 토크는 MCU에 알려져 있지 않은데, 그 이유는 시스템이 이들을 측정하기 위한 대응하는 센서들(예컨대, 홀 센서, ABZ 인코더 등)을 포함하지 않기 때문이다. MCU에 사용가능할 수 있는 유일한 측정된 응답은 모터 전류 벡터  $\vec{I}_s$ 이다. 모터 전류는 LEM 전류 센서와 같은 임의의 적합한 전류 센서를 사용하여 측정될 수 있고, MCU는 측정된 전류를 총 모터 전류 벡터로 변환할 수 있다. 회전자 위치 및 속력이 PMSM FOC 벡터 제어 루틴에 필수적이기 때문에, 센서리스 제어 모드에서, 속력 관측자(130)가 회전자 속력 및 위치를 추정하는 데 사용된다. 속력 관측자(130)는 적응적 알고리즘으로서, 이는 제어 이론 및 전기 모터 수학 모델링에 기초하고, 입력들로서  $\vec{V}_s^*$  및  $\vec{I}_s$ 를 수신하고 출력들로서 추정된 속력

$\hat{\omega}_e$  및 위치  $\hat{\theta}_e$ 를 제공한다. 후속 제어 루프들 동안, 추정된 속도 및 위치 출력들은 실제 모터 속도 및 위치에 수렴할 것이다. FOC 벡터 제어 루틴은 상이한 타입의 속도 관측자들에게 적응가능하다. 사용될 수 있는 속도 관측자 타입은 SMO(sliding-mode observer), 위상 고정 루프(phase locked loop, PLL) 관측자, 전차수 관측자(full-order observer), 칼만-필터 관측자(Kalman-filter observer) 등을 포함한다.

[0028] 블록(145)은 속도 PI 제어 루프(115) 및 약자속 제어(120)를 포함하고, 블록(150)은 전류 PI 제어 루프(125)와 조합되는 블록(145)을 포함한다. 전류 PI 제어 루프(125)의 기능은 블록(145)으로부터의 모터 피드백 전류 벡터  $\vec{I}_s$  및 전류 벡터 커맨드  $\vec{I}_s^*$ 가 출력 전압 벡터 커맨드  $\vec{V}_s^*$ 를 조절하게 하는 것이다. 블록(145)의 기능은 모터 전류 벡터 커맨드  $\vec{I}_s^*$ 를 조절하여 모터를 원하는 속력으로 작동시키는 것을 유지하는 것을 돕는 것이다.

[0029] PMSM(105)이 시동되기 전, 측정-및-동기화(MAS) 스테이지(200)가 실행된다. 윈드밀링 동안, 회전자 위치  $\hat{\theta}_e$  및 속도  $\hat{\omega}_e$ 은 MCU에 알려지지 않으며, 이는 MCU가 모터(105)를 시동시키지 못하게 할 수 있다. PMSM FOC 벡터 제어 루틴(100)이 진행 중인 모터 작동을 위해 사용되기 전의 제1 제어 스테이지로서 새로운 제어 스테이지(200)가 사용된다. MAS 스테이지(200) 동안, MCU는 전류 벡터 커맨드  $\vec{I}_s^*$ 를 0으로 설정한다( $\vec{I}_s^* = 0 \Leftrightarrow I_{QREF} = 0 = I_{DREF}$ ). 이는 블록(145)을 효과적으로 디스에이블시키지만, 나머지 블록들이 계속되게 한다. 전류 PI 제어 루프(125)는 MAS 스테이지(200) 동안 모터 전류 벡터  $\vec{I}_s$ 를 0과 동일하게 강제하도록 활성 상태를 유지한다. MAS 스테이지(200)에서, 속도 관측자(130)가 작동하여 회전자 위치 값  $\hat{\theta}_e$  및 속도 값  $\hat{\omega}_e$ 을 실시간으로 추정한다. MCU가 MAS(200)로부터 추정된 값들을 수신한 후, MCU는 이들을 진행 중인 FOC 제어 루틴(100)의 블록(150)에서의 초기 값들로서 사용할 수 있다.

[0030] MAS 스테이지(200)는 추정된 위치 및 속력이 안정적이 되도록 하기에 충분한 기간 동안 계속될 것이다. MAS 스테이지(200)가 작동하도록 허용되는 적합한 지연 기간은 응용예마다 다르다. 추정된 위치 및 속력이 실제 위치 및 속력에 수렴하게 하기 위해서 더 많은 시간이 제공될 것이기 때문에 더 긴 기간이 바람직할 수 있지만, 더 긴 지연은 빠른 모터 시동을 필요로 하는 특정 응용예들에 적합하지 않을 수도 있다. 많은 응용예들에서, 지연 기간은 수십 밀리초 내지 수백 초의 범위일 수 있다.

[0031] 도 10을 참조하면, 예시적인 시동 제어 프로세스(5)는 시스템의 전력 공급(power-on)(10), 및 시동 전에 윈드밀링(15)될 수 있는 모터로 시작된다. MCU는 PMSM(105)을 개시시키라는(즉, 모터(105)를 작동시키기 위해 구동기(110)를 사용하여 시동시키라는) 커맨드를 수신할 수 있다(20). 모터(105)가 시동되기 전, MCU는 모터 속도 및 위치를 추정하기 위해 MAS 스테이지(200)를 개시시킬 수 있다(30). MAS 스테이지(200)의 각각의 반복에 이어서, MCU는 추정된 위치 및 속도 값들이 안정화되었는지의 여부를 평가할 수 있다(35). 이는 현재 속도 및 위치 추정치를 이전 반복의 추정된 속도 및 위치와 비교함으로써 달성될 수 있다. MAS 스테이지가 반복됨에 따라, 추정치들의 변동은 감소할 것으로 예상된다(그리고 0에 접근할 수 있음). 값들이 안정화되지 않은 경우(35), MCU는 MAS 스테이지(200)의 다른 반복으로 복귀한다(30). 그러나, 이러한 차이들이 충분히 작은 값으로 축소되었을 때, 지연 기간이 종료될 수 있으며, MCU는 PMSM(105)을 구동시키기 위해 모터 시동(40) 및 진행 중인 FOC 제어 루틴(45)으로 진행하여, 추정된 속도 및 위치 값들에 따라 회전자 회전을 계속할 수 있다. 이는 윈드밀링 조건 하에서도 모터가 매끄럽게 회전하는 것을 돕는다. 일단 모터를 정지시키기 위한 명령어가 수신되면(50), MCU는 PMSM을 구동시키는 것을 중지(55)할 수 있다. 모터 정지(55)에 이어서, 모터는 윈드밀링하는 것을 다시 시작할 수 있고(15), 프로세스는 반복될 수 있다.

[0032] PMSM(105)이 윈드밀링하고 있는지의 여부가 판정되어야 하는 경우, MCU는 MAS 스테이지(200)를 실행(30)하기 전에 PMSM(105)이 윈드밀링하고 있는지(25)를 (그리고 잠재적으로 어느 정도까지인지를) 평가하도록 선택적으로 구성될 수 있다. 윈드밀링이 있는지를 판정하기 위해, MCU는 모터 전류 센서를 사용하여 PMSM(105)으로부터의 검출가능한 모터 전류 판독치들이 있는지를 판정할 수 있다. 그렇지 않은 경우, MCU는 단계(30) 및

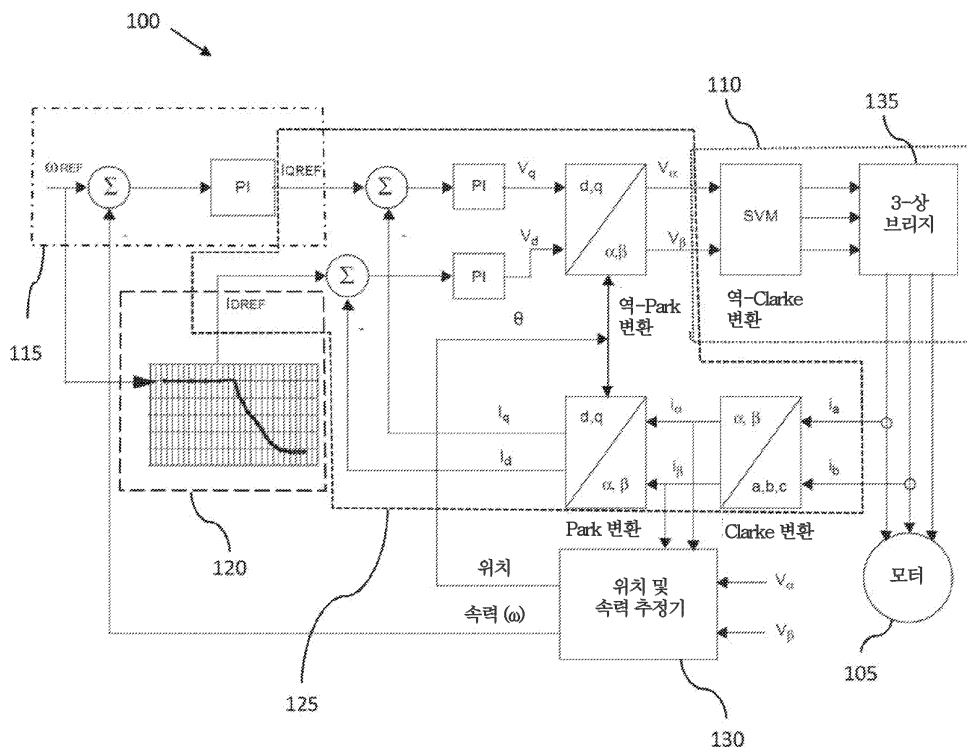
단계(35)(즉, MAS 스테이지(200))를 스킵할 수 있고, 모터 시동(40)으로 (그리고, 후속으로, FOC 제어(45)로) 진행할 수 있었다. 이는, 윈드밀링이 일반적인 발생이 아니고 판정 단계(25)에 소요된 시간이 MAS(200)를 실행하기 위한 지연보다 더 적을 것으로 예상되는 상황들(블록들(30, 35))에서 바람직할 수 있었다. 선택적으로, 시스템은, 사용자가 MAS 스테이지(200)(도시되지 않음)를 오버라이드하게 할 수 있으며, 사용자 오버라이드 입력, 및 MCU로의 미리 스킵하라는 대응하는 명령어를 통해 시동(40)에 앞서서 스킵하게 할 수 있다.

[0033] 대안의 실시예들에서, 예시적인 시스템들 및 방법들은 빈번한 Run/Stop 동작들을 필요로 하는 (또는 달리 이들과 함께 작동되는) 모터들을 제어하는 데 사용될 수 있다. 여기서, 제어기는 Run 커맨드에 이어서 (도 1에 도시된 바와 같이, 그리고 도 9의 스테이지(100)로서) FOC 제어 루틴을 사용하여 모터를 구동시킬 수 있다. 제어기가 Stop 커맨드를 수신할 때, 제어기는 시스템 및 모터가 스테이지(200)(도 9)에 진입하게 할 것이고, 모터는 제로 전류 벡터에 의해 구동될 것이다. 속도 관측자(130)는 모터 속도 및 위치를 실시간으로 추정할 것이고, MCU는 Stop 커맨드 기간 동안 추정된 값들을 가질 것이다. 일단 제어기가 Run 커맨드를 수신하면, 스테이지(200)가 Stop 커맨드 기간 동안 계속 작동하기 때문에 MCU가 정확한 추정된 모터 속도 및 위치 값들을 이미 알고 있으므로, 시스템은 즉시 스테이지(100)로 진입할 수 있다. 제로 전류 벡터가 모터에 인가되기 때문에, 실제 정지 상황 하에서 경험되는 바와 같이, 모터에 작용하는 토크의 기여는 시스템이 Stop 커맨드 상태 하에 있는 동안에 무시될 수 있다. 그러한 대안의 실시예들의 특정 버전들이 도 10b의 프로세스(300)에 의해 표현되는데, 여기서 MAS 단계(315)는 Run 커맨드가 수신(310)될 때까지 작동된다.

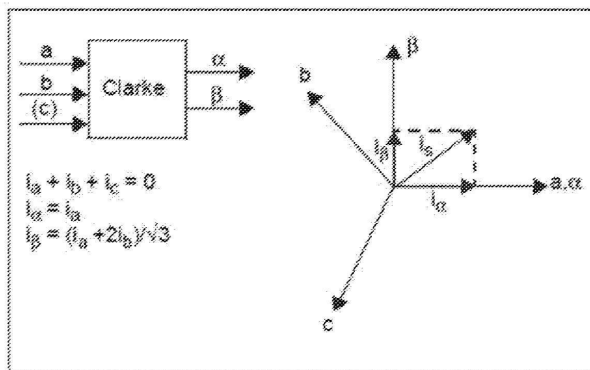
[0034] 본 발명은 하나 이상의 실시예들의 면에서 기술되었으며, 명확히 언급된 것들 외에도, 그리고 전술한 버전들의 상이한 특징부들을 다양한 방식으로 조합하는 것 외에도, 많은 등가, 대안, 변형, 추가, 및 변경이 이루어질 수 있고 본 발명의 범주 내에 있다는 것이 이해되어야 한다.

## 도면

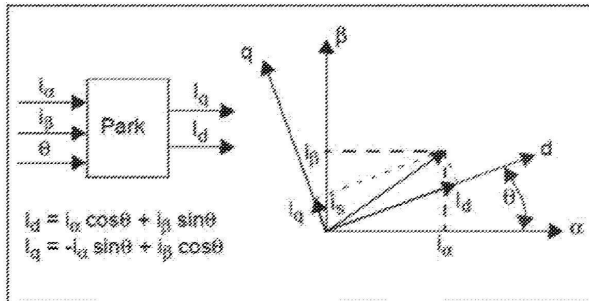
### 도면1



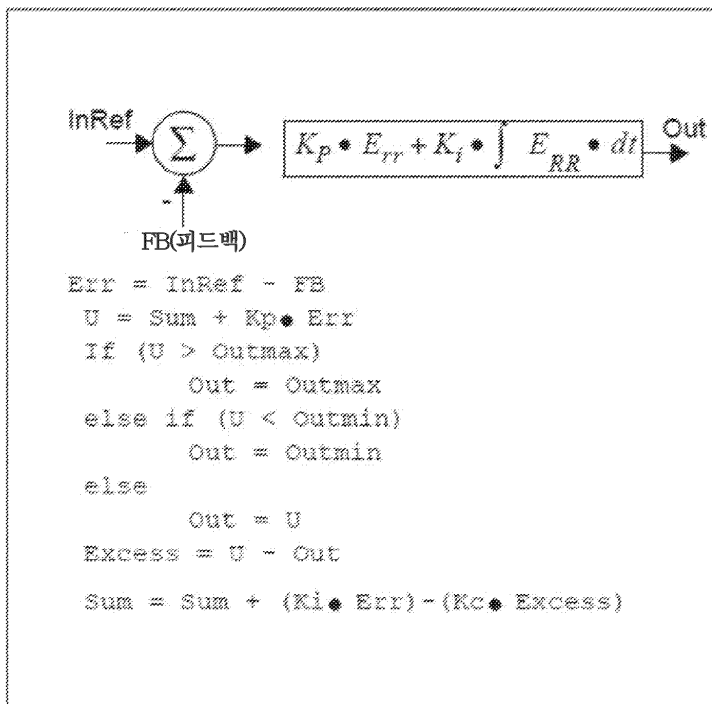
도면2a



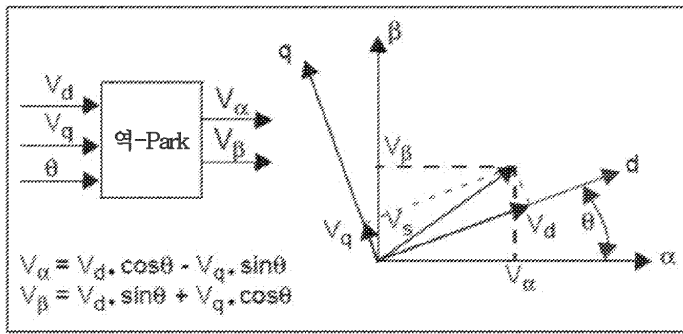
도면2b



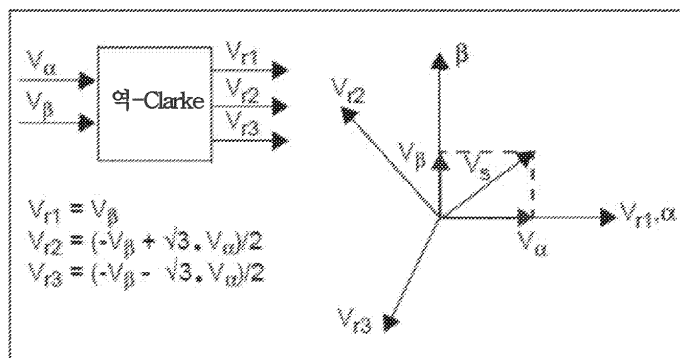
도면3



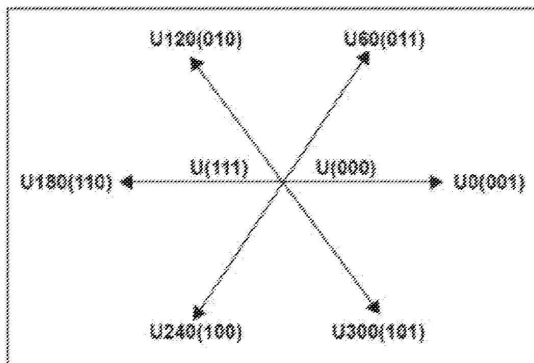
도면4a



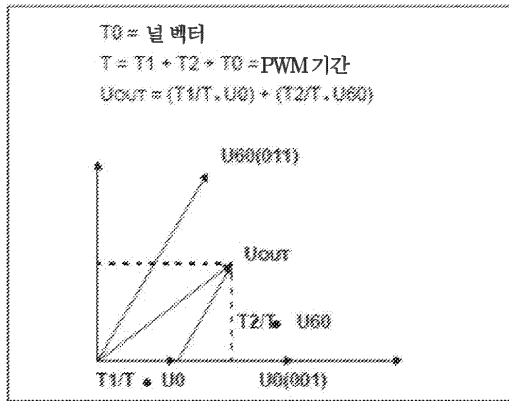
도면4b



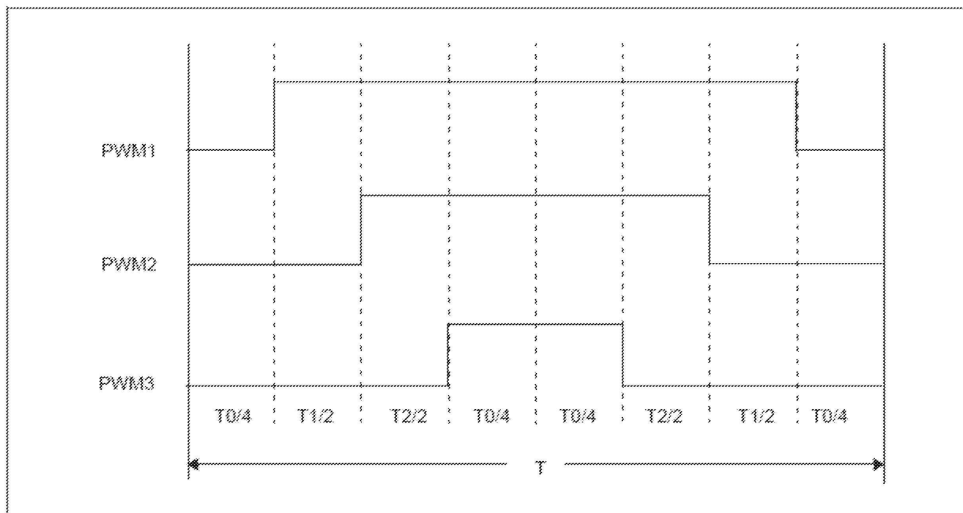
도면5a



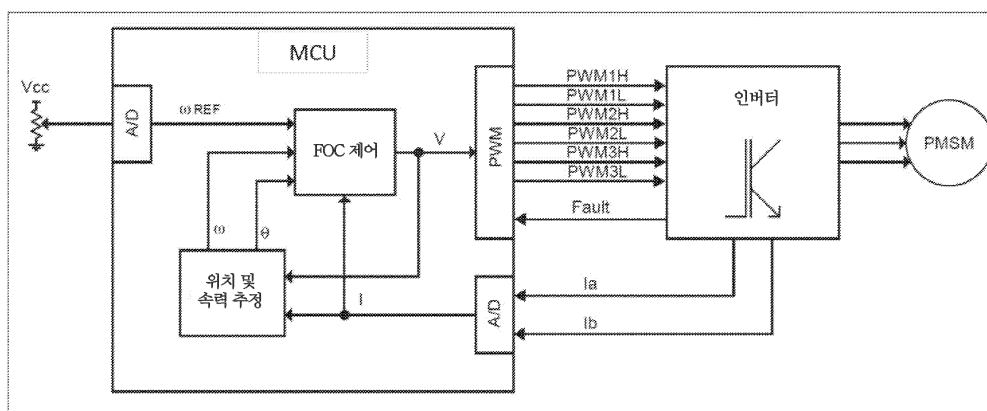
도면5b



도면6

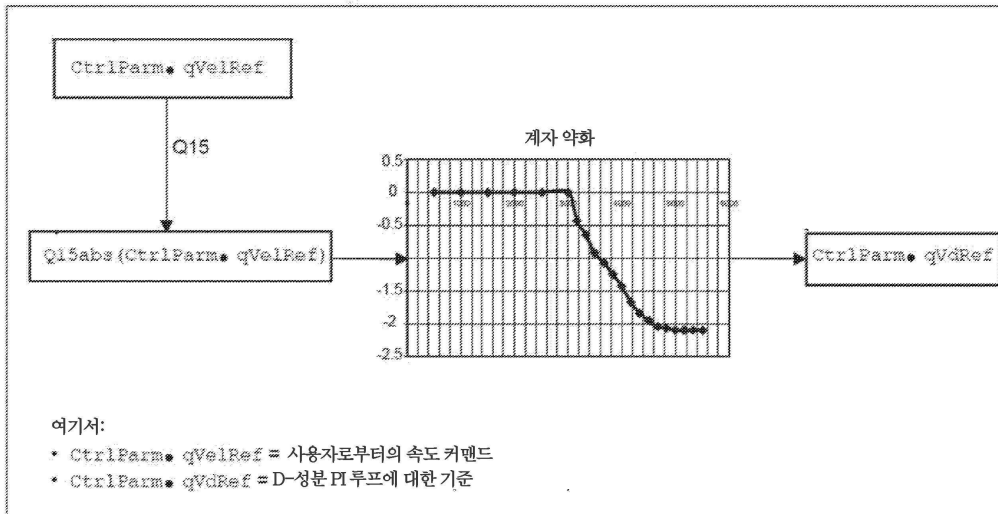


도면7

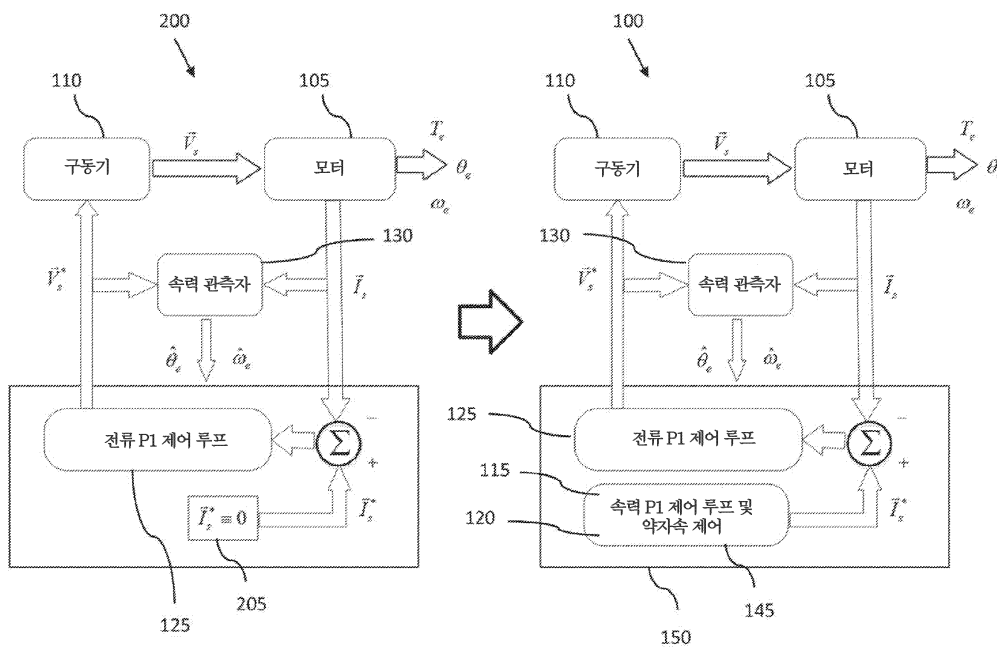




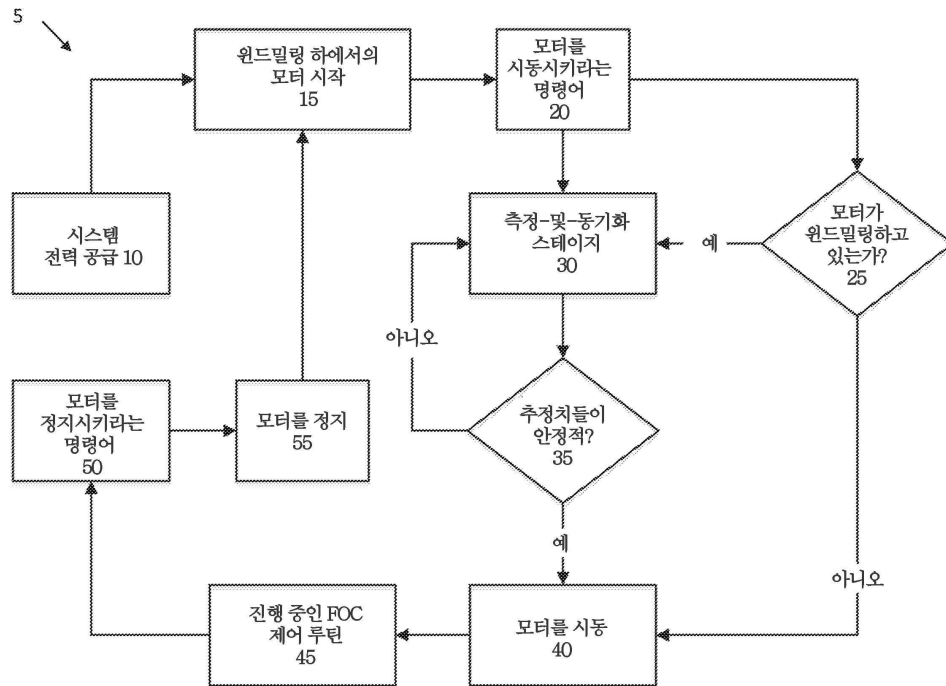
도면8



도면9



도면10a



도면10b

