



매입형 영구자석 전동기의 자속 변동을 고려한 실시간 토크 운전

1. 소개

높은 효율과 넓은 운전 영역을 갖는 메입형 영구자석 전동기의 효과적인 활용을 위해 정확한 토크 제어와 손실 최소화 운전은 중요하게 다뤄져 왔다. 따라서, 기저 속도 이하에서는 출력 토크를 유지하면서 전류 크기를 최소화하도록 하는 단위 전류 당 최대 토크(MTPA) 운전 방식이 사용된다. 반면, 기저 속도 이상에서는 직류단 전압의 제한으로 인해 전류 크기와 전류 각을 변동하는 약자속(Flux-weaking) 운전 방식이 사용된다. 효율적인 운전을 위해 전류 지령은 전류 및 전압 제한 조건을 고려하여 주의 깊게 설정되어야 한다. 하지만, 전동기의 자기포화, 교차결합 현상 및 운전 조건 변동의 영향으로 인해 최적의 전류 지령을 계산하는 것은 쉽지 않다.

본 연구에서는 자기포화에 의한 쇄교자속 변동을 고려하여 토크 정밀도와 고효율 운전을 동시에 만족하는 실시간 최소 동손 토크 운전을 제안하였다. 우선적으로, 최소 동손 토크 운전은 토크 지령 추종과 손실 최소화 운전을 만족하는 제한 최적화 문제로 접근할 수 있다. 이는 라그랑주 승수법을 통해 비선형 연립 방정식 형태로 유도될 수 있으며 수치 해석 알고리즘을 통해 풀어낼 수 있다. 여러 수치 해석 알고리즘을 비교하여 전류 지령 계산기의 안정적인 계산을 보장할 수 있는 레벤버그-마퀴트법을 수치 해석 알고리즘으로 선택하였다. 이를 통해 제안된 전류 지령 계산기의 안정성을 보장하면서 동시에 계산 부담을 최소화할 수 있다. 또한 전류 및 전압 제한을 실시간으로 반영하기 위해 토크 지령 제한기를 구현하였다.

제안된 전류 지령 계산기의 동작을 위해 영구자석 전동기의 쇄교자속 및 동적 인덕턴스의 추정이 필요하다. 그러나 추정 쇄교자속은 다양한 이유로 인해 DC 오프셋 및 저차 고조파를 포함하게 된다. 따라서, 이러한 DC 오프셋 및 고조파 자속 오차를 억제하기 위하여 주파수 적응 관측기를 기반으로 한 외란 최소화 자속 관측기를 제안하였다. 제안된 주파수 적응 자속 관측기는 회전 속도 변동 시에도 단순한 구조에도 불구하고 기본과 쇄교자속만을 추출해 낼 수 있다. 주파수 적응 자속 관측기와 고조파 추출기로 구현한 제안된 전류 모델 및 전압 모델 자속 관측기를 통해 기본과 쇄교자속을 빠르게 추정하는 것이 가능하다. 또한 고주파 신호 주입에 기반하여 동적 인덕턴스를 추정하기 위한 동적 인덕턴스 추정기를 제안하였다. 회전 벡터 전압 주입 방법의 경우, 유기된 고주파 전류를 통해 자기 및 상호 인덕턴스를 추출할 수 있다. 따라서, 상호 교차항의 영향을 포함한 고주파 임피던스 모델링에 기반하여 전압 주입 및 전류 신호 처리 방안을 제안하였다. 결과적으로 정현파 혹은 구형파 주입에 기반한 제안된 추정기를 통해 고속 운전 시 동적 인덕

턴스 추정 정밀도를 향상시킬 수 있다.

제안된 알고리즘들의 타당성은 다양한 조건에서의 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증되었다. 우선적으로 제안된 전류 지령 계산기를 통해 자기포화가 거의 없는 영역뿐만 아니라 포화가 심한 영역에서도 실시간 최소 동손 토크 운전이 가능함을 확인하였다. 시험용 전동기의 경우, 기존 가우스-뉴턴법과 달리 제안된 레벤버그-마퀴트법을 통해 0.8pu 이상의 토크 지령에 대해서도 최소 동손 토크 운전이 가능하였다. 또한 제안된 기본과 자속 관측기 및 동적 인덕턴스 추정기가 넓은 운전 영역에서 충분한 동특성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 시험용 전동기의 경우, 10pu/s 토크 지령 변동 및 3.75pu/s 부하 속도 변동에서도 기본과 자속 및 동적 인덕턴스를 잘 추정할 수 있었다.

2. 영구자석 전동기의 특성 및 운전 방안

영구자석 전동기의 실시간 최소 동손 운전은 오랜 역사를 지닌 연구 분야이다. 하지만 최근 영구자석 전동기의 경우 고폭과 및 고효율 밀도, 고효율의 특성을 가지도록 설계되어 코어의

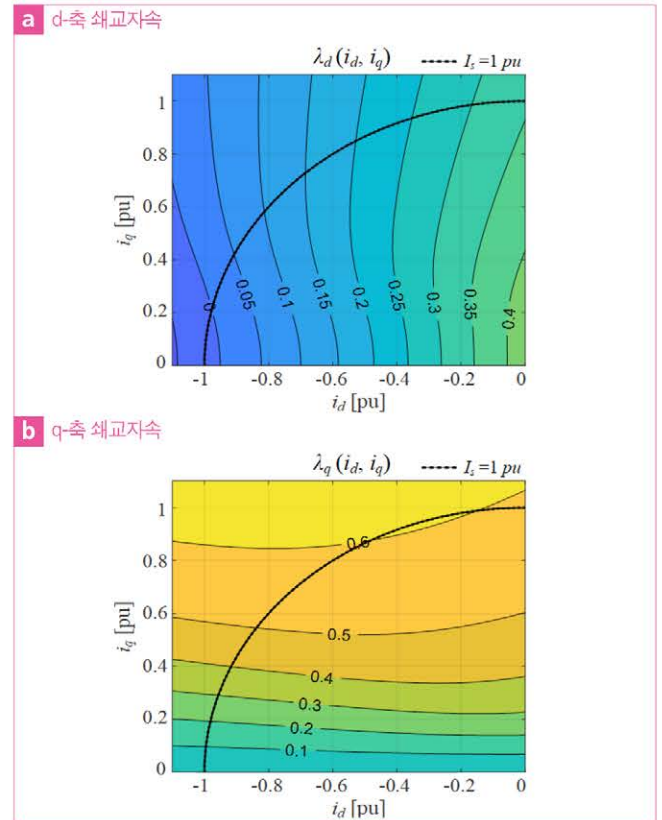


그림 1 시험용 영구자석 전동기의 기본과 쇄교자속 특성

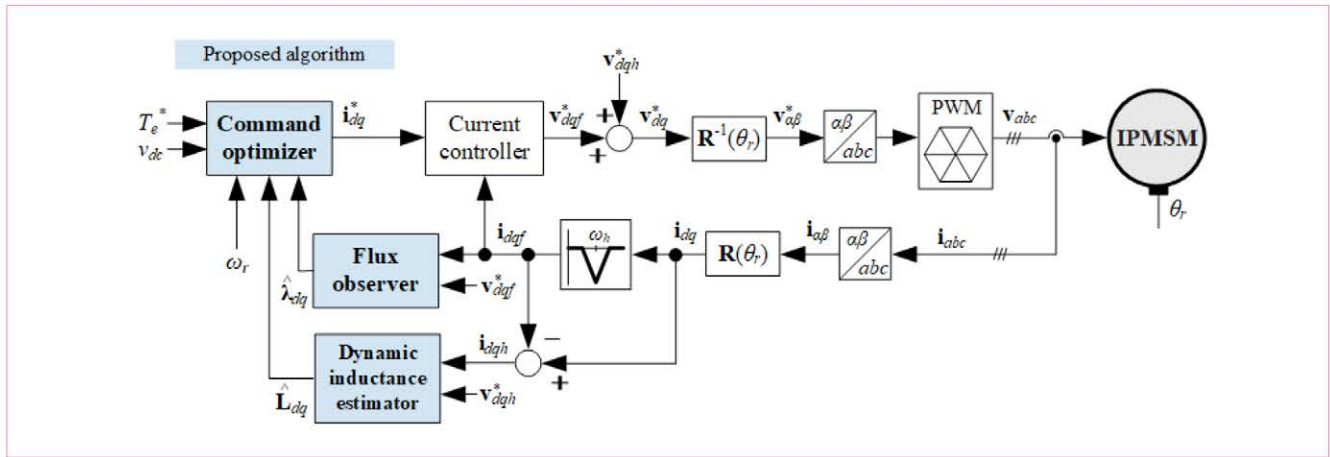


그림 2 제안된 제어기의 전체 블록도

자속 밀도를 자기포화가 심한 영역까지 사용하게 된다. 이에 따라 영구자석 전동기의 자기포화 및 교차결합 현상으로 인한 영향이 계속해서 증대되고 있다. 결과적으로 기존의 정적 제정수에 기반한 영구자석 전동기 모델링의 경우 전동기의 전류 크기 및 회전자 위치로 인한 변동을 모의하기에 여러 어려움이 있다. 따라서 비선형 자속 모델에 기반한 동적 제정수 모델링을 통해 영구자석 전동기의 특성을 표현하도록 하였다.

그림 1은 시험용 영구자석 전동기의 기본과 동적 인덕턴스 특성을 나타낸다. 이를 통해 운전 영역에 따라 자기 인덕턴스가 크게 변동함을 알 수 있다. 또한 상호 인덕턴스 성분 또한 무시할 수 없음을 알 수 있다. 따라서, 전류에 따른 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스 변동은 함께 고려되어야 한다.

그림 2는 제안된 손실 최소화 운전 방안의 전체 제어기 블록도이다. 제안된 손실 최소화 운전 방안은 실시간 추정 제정수에 기반하여 최소 동손 토크 제어를 하도록 구성된다. 이는 최소 동손 운전점의 실시간 계산을 위한 전류 지령 계산기(Command optimizer), 영구자석 전동기의 제정수 추정을 위한 자속 관측기(Flux observer), 동적 인덕턴스 추정기(Dynamic inductance estimator), 총 세 가지 알고리즘을 포함한다. 이러한 제안된 알고리즘은 각 장에서 상세히 서술하도록 한다.

3. 최소 동손 전류 지령 계산 알고리즘

실시간 추정 제정수에 기반하여 최소 동손 운전점, 즉 최적 전류 지령을 계산하는 부분이다. 우선적으로 영구자석 전동기의 자기포화 및 교차결합 현상을 고려하여 더욱 정확한 최소 동손 운전 방정식을 정의하였다. 이는 라그랑주 승수법을 적용

하여 연립 비선형 방정식 형태로 유도 가능하다.

또한 고토크 운전 시, 계산 알고리즘의 안정성을 보장하기 위해 기존의 여러 수치 해석 알고리즘을 비교하고 자기포화 및 제정수 오차에 보다 강인한 알고리즘을 선택하였다. 여러 최적화 기법 가운데, 수렴의 안정성을 보장하기 위하여 레벤버그-마퀴트법이 널리 사용된다. 이는 가우스-뉴턴법과 경사 하강법이 결합된 형태로 해가 멀리 떨어져 있을 경우 경사 하강법, 해 근처에서는 가우스-뉴턴법으로 동작하게 된다. 이를 통해 초기 운전점이 최적 운전점으로부터 멀리 떨어진 경우에도

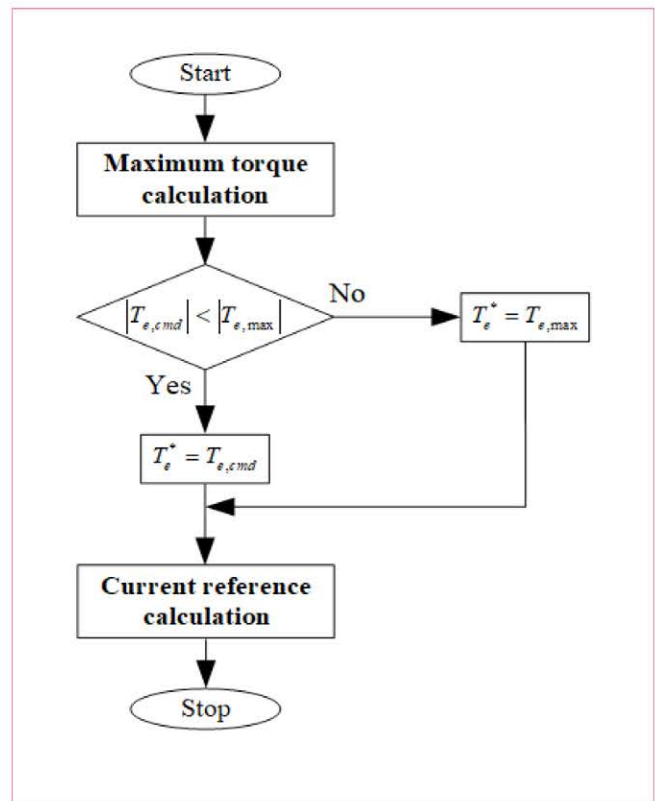


그림 3 제안된 전류 지령 계산 알고리즘의 전체 흐름도

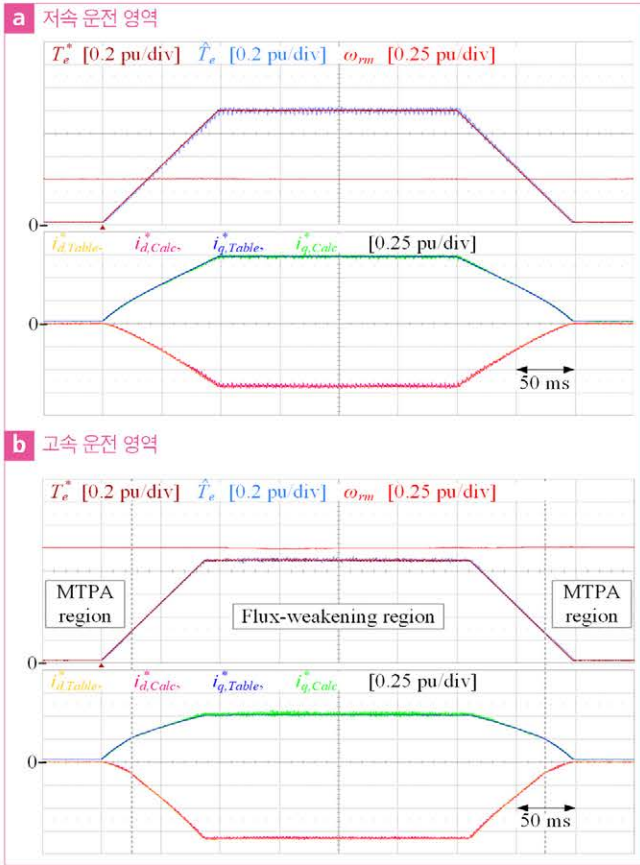


그림 4 실험: 레벤버그-마퀴트법 기반 전류 지령 계산기

해를 찾을 확률을 높인다. 따라서 포화로 인한 제정 수 변동이 크고 토크 지령 변동이 잦은 영구자석 전동기의 운전점 계산에 적합하다. 이에 맞추어 MTPA 및 약자속 영역에서의 계산 알고리즘을 최적화하였다.

또한 토크 지령 과도 시, 불안정 문제를 해결하기 위하여 토크 지령 제한기를 구현하였다. 이를 위해 전류 및 전압 제한을 만족하는 최대 토크 지령을 계산 알고리즘을 통해 구한다. 이를 통해 토크 지령을 가용 토크 범위 이하로 제한할 수 있게 된다. 그림 3은 제안된 계산 알고리즘의 전체 흐름도를 나타낸다. 상위 제어기에서 토크 지령 $T_{e,cmd}$ 이 오면 우선 최대 토크 계산기를 통해 운전 조건에서 낼 수 있는 최대 토크 $T_{e,max}$ 를 계산한다. 만약 토크 지령이 최대 토크를 넘어서면 이에 맞추어 토크 지령을 실현 가능한 토크 범위로 제한하여야 한다. 이를 통해 제한된 토크 지령을 실현 가능 토크 지령 T_e^* 으로 정의한다. 토크 지령 계산기에 의해 토크 지령은 최대 가용 토크 이하로 제한되므로 전류 지령 계산기는 안정적으로 최소 동손 전류 지령을 계산할 수 있게 된다. 결과적으로 제안된 계산 알고리즘을 통해 전류 및 전압 제한 조건을 만족하는 전류 지령을 안정적으로 합성해 낼 수 있다.

그림 4(a)는 기저 속도 이하, 즉 MTPA 영역에서 토크 지령 변동 시 전류 지령 계산기의 성능을 실험 결과를 통해 보여준다. 제안된 레벤버그-마퀴트법을 적용할 경우 저토크 뿐만 아니라 고토크 영역에서도 안정적으로 동작함을 확인할 수 있다. 또한 토크 지령 T_e^* 와 계산된 전류 지령 $i_{dq,Calc}^*$ 이 추정 토크 \hat{T}_e^* 와 참조류 $i_{dq,Table}^*$ 값과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4(b)는 기저 속도 이상, 부하 속도 1.25pu에서 토크 지령 변동 시 전류 지령 계산기 및 토크 지령 제한기의 성능을 보여준다. 이를 통해 토크 지령이 작을 때는 MTPA 운전 영역에서 동작하다가, 토크 지령이 커짐에 따라 약자속 영역으로 전환되는 것을 확인할 수 있다. 또한 토크 지령이 1.0pu로 실현 가능 토크 범위를 넘어설 경우에도 토크 지령 제한기를 통해 실현 가능 토크 지령이 0.9pu 부근으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

4. 외란 최소화 기본과 자속 관측기

제안된 전류 지령 계산기가 필요로 하는 고정자 자속 추정을 위해 전류 및 전압 정보에 기반한 기본과 자속 관측 방안을 제시하였다. 자속 관측기는 센서 편향, 인버터 비선형성, 영구자석 전동기의 공간 고조파와 같은 DC 오프셋 및 고조파 외란에 의해 추정 성능의 저감이 발생할 수 있다. 따라서, 충분한 외란 억제제가 가능하면서 계산 부담을 최소화할 수 있는 신호 처리 기법을 필요로 한다.

제안된 주파수 기반 자속 관측기의 경우 순수 적분기와 대역 통과 필터가 결합된 형태로 계산 부담을 저감하면서도 외란 및 고조파 영향을 최소화할 수 있다. 이를 통해 정지 좌표계 역기전력 신호에서 영구자석 기본과 자속 성분을 분리하여 추출할 수 있다. 또한 고조파 추출기를 추가적으로 사용하여 특정 고조파 성분을 확실하게 제거할 수 있다.

그림 5는 제안된 주파수 적응 자속 관측기의 블록도를 나타낸다. 이때, 주파수 이득 ω 는 전동기의 전기적 속도 ω_e 과 동일하도록 실시간으로 갱신되어야 한다. 단, 역방향 회전 시에도 영점 (Pole)이 좌반면에 위치하도록 ω 는 전기적 속도의 절대값으로

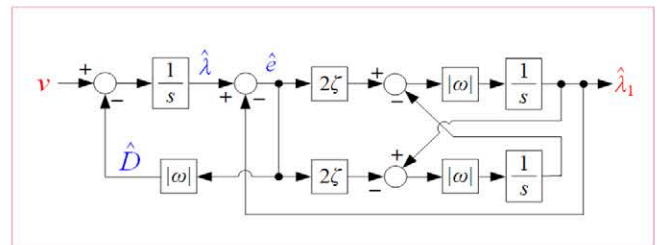


그림 5 제안된 주파수 적응 자속 관측기의 블록도

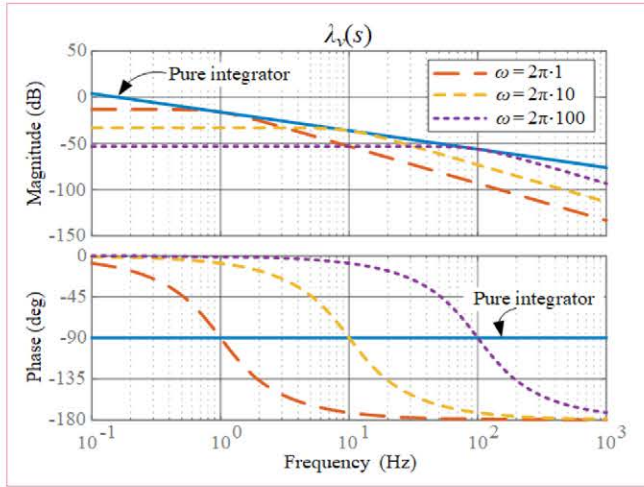


그림 6 주파수 변동에 따른 자속 관측기의 보드 선도 ($\zeta=0.707$)

설정되어야 한다. 이를 통해 역-방향 회전 시에도 안정적인 동작을 유지할 수 있다. 이때, 전압 신호 v 로부터 추정 기본과 자속 $\hat{\lambda}_i$ 까지의 전달 함수 $\lambda_i(s)$ 는 ω 성분에 대한 대역 통과 필터에 적분기 $1/s$ 가 추가된 형태이다.

그림 6은 주파수 이득 변동에 따른 제안된 주파수 적용 자속 관측기의 보드 선도(Bode plot)를 나타낸다. 이를 통해 ω 성분, 즉 기본과 성분에 대해 제안된 자속 관측기는 순수 적분기와 동일한 특성을 가진다는 것을 알 수 있다. 하지만 DC 성분, 즉 0Hz 성분의 경우 순수 적분기에 비해 이득을 제한할 수 있다. 마찬가지로 고조파 성분에 대해서도 낮은 이득을 가짐을 알 수 있다.

그림 7은 저속 운전 시, 토크 지령 변동에 대한 전압 모델 자속 관측기의 성능을 보여준다. 제안된 주파수 적용 자속 관측기를 적용할 경우, DC 오프셋 및 고조파 자속 성분을 상당히 억제할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 빠른 토크 지령 변동에도 불구하고 과도 상태에서 추정 자속 오차가 작다. 주파수 적

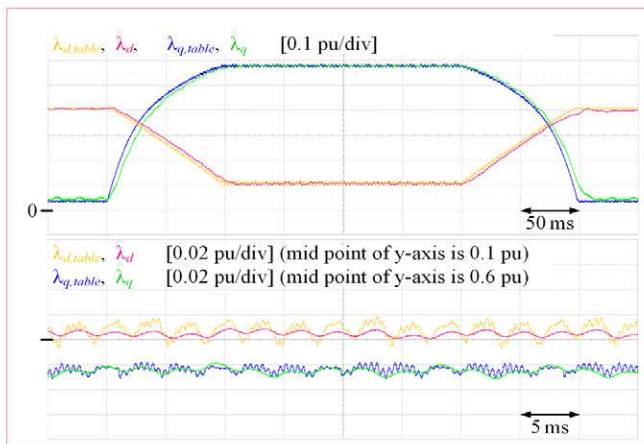


그림 7 실험: 제안된 주파수 적용 자속 관측기

용 자속 관측기 적용 시에도 남아 있는 저차 고조파는 고조파 추출기를 구현하여 저감 가능하다.

5. 신호 주입 기반 동적 인덕턴스 추정기

제안된 전류 지령 계산기가 필요로 하는 동적 인덕턴스 정보를 위해 신호 주입에 기반한 동적 인덕턴스 추정기를 제안하였다. 이를 위해 기존 신호 주입 알고리즘들을 비교하여 충분한 동특성 및 간단한 신호 처리 과정을 가지는 회전 벡터 전압 주입 방안을 채택하도록 한다. 이때 구형파(Square wave) 주입을 통해 신호 주입 주파수를 샘플링 주파수의 1/4까지 증대시켜 더욱 동특성을 향상시킬 수 있다.

제안된 구형파 주입 방법의 경우, 한 주기 T_p 동안 d-축, q-축 구형파가 그림 8과 같이 순차적으로 인가된다. 이때, 주입 전압 (v_{dh}, v_{qh})은 각 경우마다 방향이 계속해서 변동한다. 제안된 구형파 주입 방법의 전압 기본과 성분을 살펴보면 정현파 주입 방법과 마찬가지로 d-축, q-축 전압 사이에 90도 시지연이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 제안된 방법 또한 회전 벡터 전압 주입의 한 형태로 이해될 수 있다.

기존의 신호 주입 알고리즘은 저속 운전 시 성능만을 확인하여 전동기 회전 시 나타나는 동기 좌표계 상호 교차항의 영향을 고려하지 않았다. 본 연구에서는 상호 교차항 성분을 고려한 고주파 임피던스 모델링을 통해 기존의 동적 인덕턴스 추정 성능을 개선하도록 하였다. 이를 통해 고속 운전 시에도 정확한 동적 인덕턴스 추정이 가능하도록 한다.

그림 9는 부하 속도 변동 시, 제안된 구형파 주입에 기반한 동적 인덕턴스 추정기의 성능을 보여준다. 동기 좌표계 상호 교차항을 고려하지 않은 기존 방법의 추정 동적 인덕턴스 ($L_{dcl,est}(0), L_{qql,est}(0)$)은 ω_r 의 증가에 따라 오차가 증대한다.

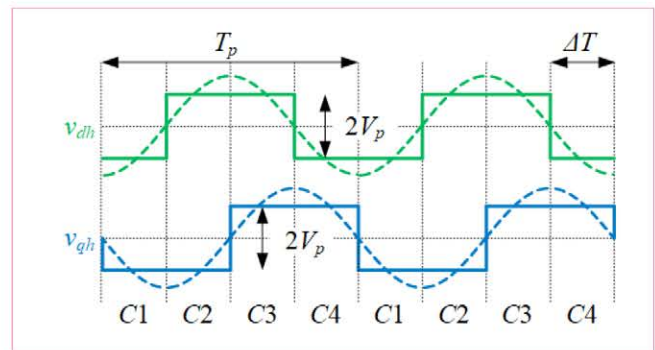


그림 8 구형파 전압 주입 시 주입 전압 파형

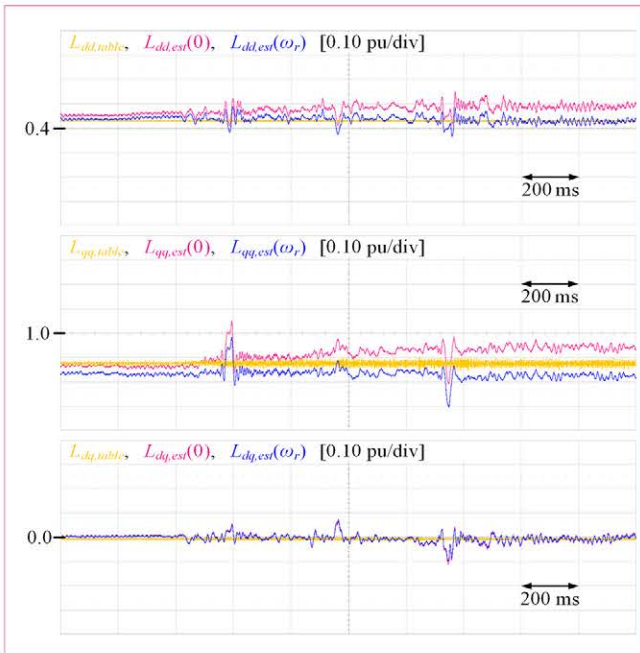
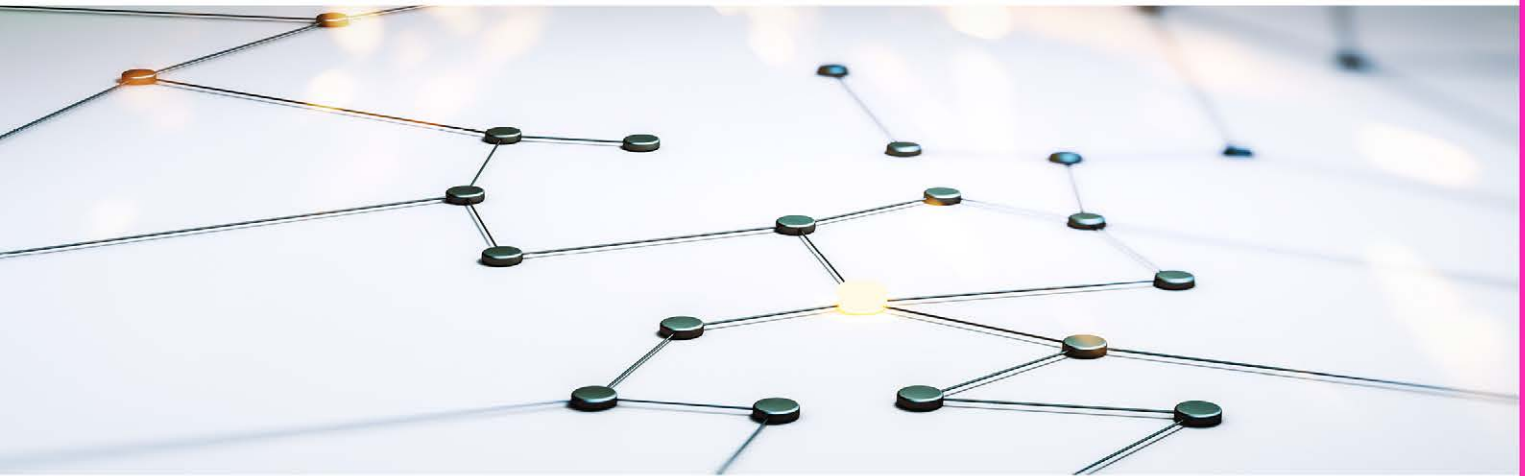



그림 9 실험: 구형파 주입 기반 동적 인덕턴스 추정기

따라서 기저 속도(1.0pu)에서 3kHz 구형파 주입 시 추정 동적 인덕턴스는 실제 동적 인덕턴스에 비해 약 15% 정도 증대한다. 반면 제안된 방법의 동적 추정 인덕턴스 $L_{d,est}(\omega_r)$, $L_{q,est}(\omega_r)$ 은 부하 속도 증가에도 불구하고 참조값 ($L_{d,table}$, $L_{q,table}$)값과 유사한 값을 계속 유지할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 영구자석 전동기의 제정수 변동을 고려한 실시간 최소 동손 토크 운전 방법을 제안하였다. 이를 위해 우선적으로 매입형 영구자석 전동기의 자기포화, 교차결합 현상 및 특성을 파악하고 실시간 손실 최소화 운전 방법을 구성하였다. 그리고, 수치 해석 알고리즘 분석에 기반하여 자기포화 및 제정수 오차에 보다 강인한 전류 지령 계산 계산을 제안하였다. 또한 제안된 최소 동손 운전을 위해 필요한 실시간 쇄교자속 및 동적 인덕턴스 제정수 추정 방안에 대하여 연구하였다. 이를 통해 외란의 영향을 최소화하는 기본과 자속 관측기와 고주파 신호 주입에 기반한 동적 인덕턴스 추정기를 제안하였다. 제안된 알고리즘들의 성능은 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. 이를 통해 운전 환경의 실시간 변동을 고려한 영구자석 전동기의 효율적이며 안정적인 실시간 토크 운전이 가능하다. 

참고문헌

- [1] H. S. Kim, Y. Lee, S. K. Sul, J. Yu, and J. Oh, "Online MTPA control of IPMSM for automotive application based on robust numerical optimization technique," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 55, No. 4, pp. 3736-3746, Jul./Aug. 2019.
- [2] H. S. Kim, S. K. Sul, H. Yu, and J. Oh, "Distortion-minimizing flux observer for IPMSM based on frequency-adaptive observers," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 35, No. 2, pp. 2077-2087, Feb. 2020.