

긴 케이블을 가지는 I-f 모터 구동 시스템의 제어 성능 개선을 위한 능동 댐핑 기법

한선재¹⁾, 배병주¹⁾, 홍찬욱²⁾, 부한영²⁾, 조영훈¹⁾
 건국대학교 전력전자연구실¹⁾, LS 일렉트릭²⁾

Active Damping Technique for Improving Control Performance of I-f Motor Driving Systems with Long Cables

Sunjae Han¹⁾, Byungju Bae¹⁾, Chanook Hong²⁾, Hanyoung Bu²⁾, Younghoon Cho¹⁾
 Power Electronics Lab, Konkuk University.¹⁾, LS Electric²⁾

ABSTRACT

본 논문은 긴 케이블을 가지는 I-f 모터 구동 시스템의 제어 성능 개선을 위한 능동 댐핑 기법을 제안한다. 모터와 인버터 사이의 케이블 길이가 긴 시스템의 경우 케이블 기생 임피던스로 인해 제어 대역폭이 감소하고 시스템 제어 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 제안하는 기법은 능동 댐핑 기법을 이용해 긴 케이블을 가지는 I-f 모터 구동 시스템의 과도 응답을 효과적으로 개선할 수 있다. 능동 댐핑 기법의 타당성은 MATLAB 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

ESP(Electrical Submersible Pump) 같은 시스템의 경우, 설치 환경 제약에 의해 모터와 인버터가 수 km 떨어진 지점에 위치하게 된다. 이로 인해 모터와 인버터 사이의 케이블 길이가 길어지게 되고, 케이블 기생 임피던스로 인해 제어 대역폭이 감소하고 시스템 제어 성능이 저하되는 문제가 발생한다.

한편 모터와 인버터 사이의 케이블 길이가 긴 시스템에서 회전자 위치 센서를 사용하지 않으면 센서 출력 신호의 시지연, 전자기적 잡음의 취약성 등의 이유로 인해 정확한 제어가 어려워진다.^[1] 따라서 긴 케이블을 가지는 모터 구동 시스템의 경우 센서리스 제어가 적합하며, 특히 팬이나 펌프 같은 시스템의 경우 간단한 제어가 가능한 V-f 제어나 I-f 제어가 주로 사용되고 있다.^[2]

본 논문에서는 긴 케이블을 가지는 모터 구동 시스템에서 I-f 제어를 사용할 경우 시스템 제어 성능이 저하되는 문제를 개선하기 위한 능동 댐핑 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 모터와 인버터 사이의 케이블 길이가 긴 시스템의 부하 급변 시 제어 성능을 효과적으로 개선할 수 있으며, MATLAB 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다.

2. 케이블 모델과 I-f 제어 분석

2.1 케이블 고주파 임피던스 모델

주파수가 증가하면 케이블의 표피효과, 근접효과, 유전손실이 증가하게 되어 케이블 등가 모델에 이를 반영해 주어야 한다. 그림 1은 표피효과, 근접효과, 유전손실을 고주파 영역에서의 케이블 등가회로를 나타낸다. 여기서 R_{s1} , L_{s1} 은 각각 케이블의 기생 저항과 기생 인덕턴스를, R_{p1} 과 C_{p1} 은 각각 케이블 사이의

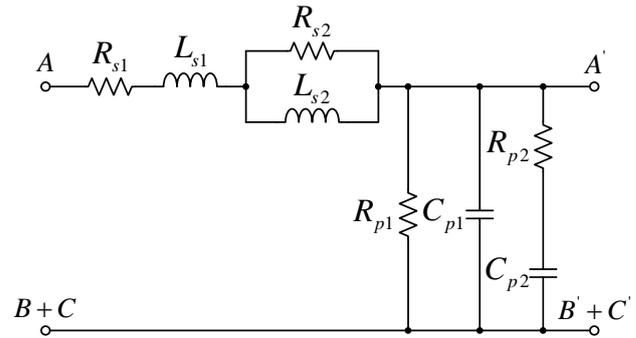


그림1 고주파 영역에서의 케이블 등가회로
 Fig.1 Cable equivalent circuit in high frequency

기생 저항과 기생 커패시턴스를 나타낸다. 또한 표피효과와 근접효과는 R_{s2} , L_{s2} 를 이용하여 등가 할 수 있으며, 유전 손실은 R_{p1} , C_{p1} 을 이용하여 등가 할 수 있다.

2.2 I-f 제어 알고리즘

그림 2는 I-f 제어 블록도를 나타낸다. I-f 제어는 모터 회전자 위치 센서를 사용하지 않는 센서리스 기법 중 하나로, 식 (1)과 같이 속도 지령 ω_e 를 적분하여 임의로 각 θ_e 를 만든 뒤 이를 이용하여 3상 전류를 d^*q^* 축으로 변환한다.

$$\theta_e = \int \omega_e dt \quad (1)$$

그림 3은 속도 지령을 적분하여 구한 각 θ_e 로 만든 d^*q^* 축과 모터 회전자의 위치각 θ_r 을 이용하여 만든 dq축을 보여준다. 이때 θ_e 는 a축과 d^* 축 사이의 각의 크기를 나타내며, δ 는 q^* 축과 d축 사이의 각의 크기를 나타낸다.

I-f 제어의 전류 제어는 d^*q^* 축 상에서 이루어지며, d^*q^* 축 전류 지령과 센싱 받은 d^*q^* 축 전류 사이의 오차를 PI 제어를 이용해 제어한다. 이때 d^*q^* 축 전류 지령은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$i_d^{ref} = 0, i_q^{ref} = I_0 \quad (2)$$

여기서 q^* 축 전류 지령 I_0 는 충분한 토크 발생을 위해 정격전류 정도의 큰 값으로 설정한다. I-f 제어에 의한 발생 토크 T_e 는 식 (3)과 같이 표현되며, T_e 가 부하 토크보다 커질 경우 모터가 회전하게 된다.

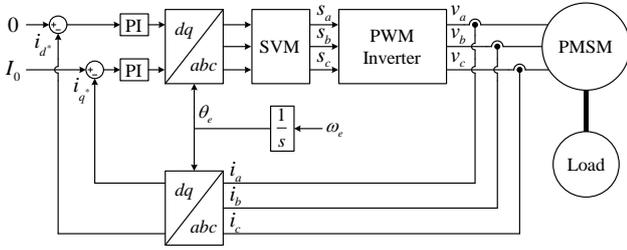


그림2 I-f 제어 블록도
Fig.2 I-f control block diagram

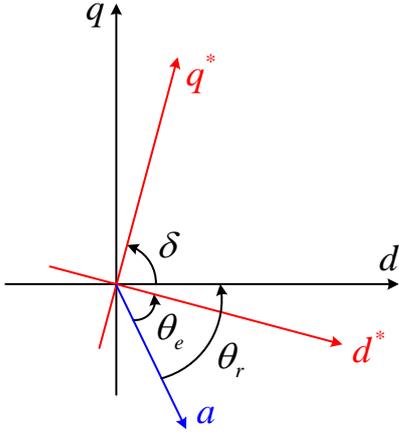


그림3 좌표 평면 상에 나타난 dq축과 d*q*축
Fig.3 The dq-axis and d*q*-axis represented on the coordinate plane

$$T_e = \frac{3P}{2} \lambda_f I_0 \sin(\delta) \quad (3)$$

여기서 P 는 모터의 극수를, λ_f 는 모터 회전자 영구자석의 쇠교자속 크기를 나타낸다.

2.3 I-f 제어 안정도 분석

I-f 제어의 안정도를 분석하기 위해서는 비선형 상태방정식을 소신호 모델링을 통해 선형적으로 표현하여야 한다. 식 (4)는 비선형 함수로 표현되는 상태 방정식의 상태 변수 x 를 나타낸 수식이다. 이때 $x = [i_d^*, i_q^*, \omega_e, \delta, w_1, w_2]^T$ 는 상태 변수 벡터, $u = [i_d^{ref}, i_q^{ref}, \omega_e]^T$ 는 입력 변수 벡터, f 는 비선형 함수, $\dot{(\cdot)}$ 은 d/dt 를 나타낸다.

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (4)$$

여기서 w_1 과 w_2 는 각각 d*q*축 전류 지령과 d*q*축 전류 사이의 오차에 대한 변수로 식 (5)-(8)과 같이 나타낸다.

$$v_{d^*} = K_p(i_d^{ref} - i_d^*) + K_i w_1 \quad (5)$$

$$\dot{w}_1 = i_d^{ref} - i_d^* \quad (6)$$

$$v_{q^*} = K_p(i_q^{ref} - i_q^*) + K_i w_2 \quad (7)$$

$$\dot{w}_2 = i_q^{ref} - i_q^* \quad (8)$$

위 식에서 K_p , K_i 는 각각 전류 제어기의 비례 이득과 적분 이득을 나타낸다. 이때 모터가 표면부착형 영구자석 동기전동기 (Surface Mounted PMSM, SPMSM)라는 가정하에 d축과 q축의 비례 이득을 동일하게 K_p 로 설정하였다.

I-f 제어의 안정도를 판별하기 위하여 정상상태 동작 조건에서 선형화를 진행하게 되면 식 (9)-(10)과 같이 나타낸다.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} - \frac{K_p}{L_s} & \omega_e & \frac{\lambda_f \cos \delta}{L_s} & -\frac{\lambda_f \omega_e \sin \delta}{L_s} & \frac{K_i}{L_s} & 0 \\ -\omega_e & -\frac{R_s}{L_s} - \frac{K_p}{L_s} & -\frac{\lambda_f \sin \delta}{L_s} & -\frac{\lambda_f \omega_e \cos \delta}{L_s} & 0 & \frac{K_i}{L_s} \\ \frac{3P^2 \lambda_f \cos \delta}{8J} & \frac{3P^2 \lambda_f \sin \delta}{8J} & 0 & \frac{3P^2 \lambda_f I_0 \cos \delta}{8J} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

상태천이행렬 A 의 고윳값은 시스템 극점과 동일하기 때문에, 주파수 및 토크에 따른 A 의 고윳값을 통해 동작 조건에서의 극점 및 안정도를 판별할 수 있다. 또한 극점 실수부의 크기가 작을수록 작은 감쇠를 가지며, 응답성에 지배적인 극점이 된다.

3. I-f 제어 성능 개선을 위한 방법

3.1 케이블 임피던스 성분 보상

모터와 인버터 사이의 케이블 길이가 긴 시스템에서 I-f 제어를 수행할 경우, 그림 1의 R_{s1} , L_{s1} , R_{s2} , L_{s2} 에 해당하는 케이블 임피던스의 크기가 증가하여 전류 제어기의 대역폭이 감소하고 제어 성능이 저하된다. 따라서 식 (11)-(12)와 같이 전류 제어기 이득에 케이블 임피던스 성분을 보상해 줌으로써 전류 제어기 대역폭을 유지할 수 있다.

$$K_p = \omega_{cc} \cdot (L_{s1} + L_{s2}) \quad (11)$$

$$K_i = \omega_{cc} \cdot (R_{s1}) \quad (12)$$

여기서 L_s 는 모터 고정자 인덕턴스를, R_s 는 모터 고정자 저항을, ω_{cc} 는 전류 제어기 대역폭을 의미한다. 이때 그림 1의 케이블 등가회로에서 병렬로 연결된 R_{s2} 와 L_{s2} 의 경우, 케이블에 흐르는 전류의 주파수가 극단적으로 높지 않은 이상 L_{s2} 의 임피던스 크기가 R_{s2} 에 비해 현저히 작기 때문에 대부분의 전류는 L_{s2} 쪽으로 흐르게 된다. 따라서 케이블 임피던스 보상 성분에서 R_{s2} 는 무시할 수 있다.

그림 4는 케이블 길이가 50 m인 I-f 제어 시스템에서 케이블 임피던스 성분 보상 유무에 따른 시스템 지배극을 나타낸 파형이다. 제어기 이득에 케이블 임피던스 성분을 보상하게 되면 제어 대역폭을 유지할 수 있지만, 그림 4와 같이 시스템 지배극의 실수부 크기가 작아져 작은 감쇠를 가지게 된다. 이로 인해 부하가 변하는 상황에서 과도 응답이 길어지는 문제가 발생한다.

3.2 능동 댐핑 기법

식 (13)과 같이 전류 제어기의 적분 이득 K_i 에 댐핑 계수 k_d 를 곱해주는 능동 댐핑 기법을 적용할 경우, 제어 대역폭을 크게 떨어트리지 않는 선에서 시스템 지배극의 실수부 크기를

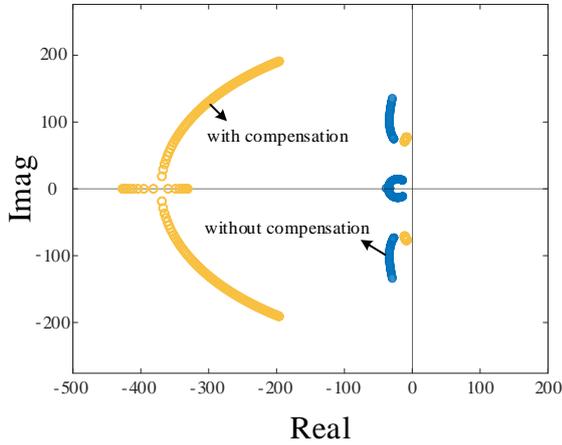


그림4 케이블 임피던스 보상 유무에 따른 시스템 지배극
Fig.4 Dominant pole of system according to existence of cable impedance compensation

키워 능동 댐핑 기법을 적용하지 않았을 때에 비해 감쇠 성분을 키울 수 있다.

$$K_i = k_d \cdot \omega_{cc} \cdot (R_s + R_{s1}) \quad (13)$$

시스템 극점의 실수부 크기가 커지게 되면 응답이 정상상태까지 도달하는 시간이 짧아져 제어 성능이 개선된다. 따라서 본 논문에서 제안하는 능동 댐핑 기법을 적용할 경우, 긴 케이블을 갖는 I-f 모터 구동 시스템의 제어 성능을 개선할 수 있다.

4. 시뮬레이션

제안하는 능동 댐핑 기법의 타당성을 검증하기 위하여 MATLAB 프로그램을 통해 시뮬레이션을 진행하였다. 케이블 임피던스 성분 보상을 적용하였을 때와 능동 댐핑 기법을 적용하였을 때의 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, 시뮬레이션에 사용된 제정수 및 실험 조건은 표 1과 같다.

표 1 시스템 제정수 및 실험 조건

Table 1 System parameters and experimental conditions

Parameter	Value	Parameter	Value
R_s	0.017Ω	L_s	490 μH
R_{s1}	0.15Ω	L_{s1}	13.4 μH
R_{s2}	1Ω	L_{s2}	12.1 μH
f_{sw}	3000Hz	P	8
Cable Length	50 m	V_{dc}	300 V

그림 5는 모터와 인버터 사이의 케이블 길이가 50m인 SPMSM을 I-f 제어를 통해 500 r/min까지 가속한 뒤, 500 r/min 조건에서 12 Nm의 토크 부하를 스텝으로 인가하였을 때의 모터 속도, d축 전류, q축 전류 파형을 나타낸다. 이때 케이블 임피던스 성분 보상만 적용한 경우 과도 응답이 매우 긴 반면, 능동 댐핑 기법을 적용한 경우 정상상태까지 도달하는 시간이 큰 폭으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

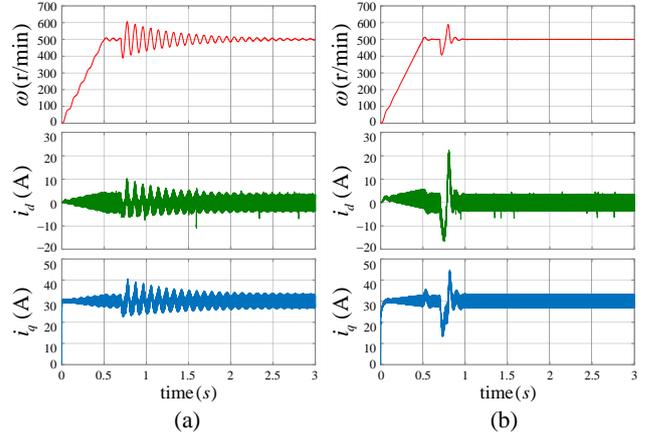


그림5 I-f 제어가 적용된 SPMSM의 부하 급변 시 시뮬레이션 결과
(a) 케이블 임피던스 성분 보상 적용 (b) 능동 댐핑 기법 적용
Fig.5 Simulation result with load step to the SPMSM with I-f control
(a) Cable impedance compensation (b) Active damping technique

5. 결론

본 논문에서는 긴 케이블을 가지는 모터 구동 시스템의 제어 성능 개선을 위한 능동 댐핑 기법을 제안하였다. I-f 제어가 적용된 모터 구동 시스템에서 케이블 길이가 길어질 경우 케이블의 기생 임피던스에 의해 시스템 제어 대역폭이 감소하여 제어 성능이 저감되는 문제가 발생한다. 이때 케이블 임피던스 성분을 전류 제어기 이득에 보상함으로써 제어 대역폭을 유지할 수 있지만, 시스템 지배극이 우측으로 과도하게 이동하여 감쇠가 작아져 과도응답이 길어지는 문제가 발생한다.

제안하는 능동 댐핑 기법을 적용할 경우 동일한 부하 급변 상황에서 과도 응답을 효과적으로 개선할 수 있으며, MATLAB 시뮬레이션 결과를 통해 이를 검증하였다.

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No.2021R1A5A1031868)과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20210501010020)

참고 문헌

- [1] Bu and Y. Cho, "A Practical Position Sensorless Control of Long-Cable-Fed PMSM Drives with a Sine-wave Filter for Electrical Submersible Pumps," 2023 IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), Seoul, Korea, Republic of, 2023, pp. 1-7
- [2] D. Chen, K. Lu, D. Wang and M. Hinkkanen, "A Small-signal Stability Study for Open-loop I-f Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Drives," 2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Chongqing, China, 2021, pp. 405-409