

# 긴 케이블을 가지는 전동기 구동 시스템의 하이브리드 고주파 모델링 기법

유첸시, 한유, 조영훈  
 건국대학교 전력전자 연구실

## Hybrid high-frequency modeling of long-cable motor drive systems

Xuanxi Liu, Yu Han, Younghoon Cho  
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

### ABSTRACT

이 논문은 긴 케이블이 장착된 전동기 구동 시스템의 고주파 등가 회로를 분석하고 모델을 구축하였다. 케이블 특성과 전동기 입력 임피던스의 주파수 응답을 통해 실험 결과와 일치하는 적절한 모델을 도출하였으며, 주파수 특성을 고려하여 긴 케이블과 전동기의 고주파 등가 회로 모델을 정확하게 표현한다. 또한, 시뮬레이션 및 실제 실험을 통해 차동 모드(DM) 과전압의 피크값 및 진동 주파수를 비교하고 분석하였다. 또한, ANSYS 소프트웨어를 사용하여 인버터 모델의 케이블 및 전동기 고주파 모델의 수학적 모델을 구현하고 시뮬레이션과 실험 결과를 비교하였다. 7.5 kW PMSM의 시뮬레이션 및 실험 결과는 도출된 모델의 적용 가능성을 보여준다.

### 1. 서론

긴 케이블 구동 전동기 시스템에서 케이블과 모터 임피던스의 불일치로 인한 전압 반사 현상 발생 시 케이블과 모터의 절연이 파괴되어 구동 시스템 고장을 일으킬 수 있다. 절연 문제 외에도 높은 dv/dt에 의해 발생하는 베어링 전류가 전동기 수명을 단축시킬 수 있다. 전자기 간섭과 과전압 문제를 해결하기 위해 긴 케이블과 모터의 모델링을 수행한다<sup>[1]</sup>. 긴 케이블 구동 시스템의 모델링에서 케이블 및 모터 모델링은 실제 고주파 응답과 일치해야 한다. 본 논문에서는 고주파 케이블-전동기 하이브리드 모델 시스템을 제안하고, 실험결과 비교를 통해 제안한 모델이 유사하거나 더 나은 성능을 갖는 것으로 나타났다. 실제 50m 전력 케이블로 모델의 유효성을 검증했으며, 구동 시스템 모델에 따라 그림 1과 같이 긴 케이블, 인버터 및 전동기 모델을 포함하여 DM 과전압의 시뮬레이션 결과를 확인하였다.

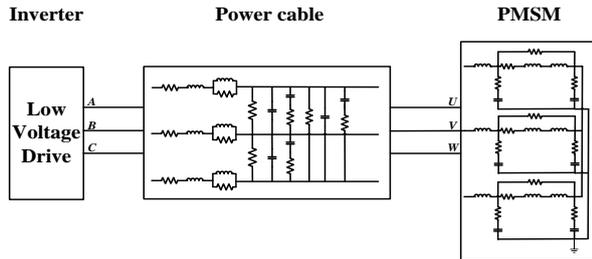


그림 1 긴 케이블 전동기 하이브리드 구동 시스템  
 Fig.1 Hybrid high-frequency modelings of long-cable motor drive system

### 2. 하이브리드 고주파 모델링 기법

#### 2.1 고주파 케이블 모델링

고주파 케이블의 등가 회로와 기본 케이블의 등가 회로의 차이는 주파수가 증가함에 따라 도체 내부의 표피 효과와 도체 간의 근접 효과의 영향이 증가하고, 일반적인 케이블 등가 회로에 직렬 저항  $R_{s2}$ 와 인덕턴스  $L_{s2}$ 가 추가된다는 점이다. 또한, 유전체 손실을 고려하여 병렬 저항  $R_{p2}$ 와 커패시턴스  $C_{p2}$ 를 추가해야 한다.

그림 2는 본 논문에서 사용한 3심 케이블의 고주파 등가 회로 모델을 나타낸다. 그림 3은 1미터 케이블 모델에 대한 시뮬레이션과 단락(SC)시험 및 개방(OC)시험에서 얻은 임피던스 그래프를 나타낸다. 임피던스 그래프를 바탕으로 그림 2의 등가회로를 유도하였다. 또한 저주파(LF) 및 고주파(HF) 영역의 곡선에 따라 해당 인덕턴스 및 커패시턴스 값을 계산하기 위한 임피던스 포인트를 선정하면 다음과 같은 방식으로 도출된다<sup>[2]</sup>.

그림 4는 1미터 케이블 모델을 기반으로 50개의 세그먼트를 구성하여 구현한 50m 케이블 모델에 대한 시뮬레이션과 SC시험 및 OC시험에서 얻은 임피던스 그래프를 나타낸다. 시뮬레이션으로 얻은 임피던스 그래프와 실제 측정을 통해 얻은 임피던스 그래프를 비교하여 제안한 모델의 효과를 검증하였다.

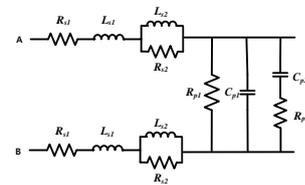


그림 2 케이블의 고주파 모델링  
 Fig.2 High-frequency modeling of the power cables

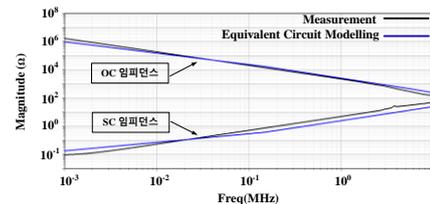


그림 3 1미터 케이블 SC 및 OC 임피던스 측정 및 등가 회로 시뮬레이션 결과  
 Fig.3 Short-circuit and open-circuit impedance of a 1-meter cable measurement and equivalent circuit results

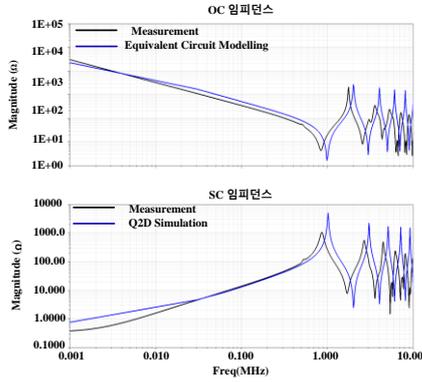


그림 4 50미터 케이블 단락(SC) 및 개방(OC) 임피던스 측정 및 등가 회로 시뮬레이션 결과  
 Fig.4 Short-circuit(SC) and open-circuit(OC) impedance of a 50-meter cable measurement and equivalent circuit results

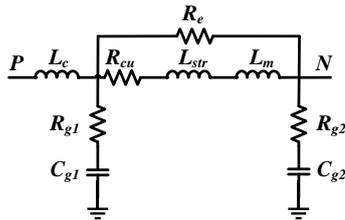


그림 5 고주파 모터 모델링(위상 회로)  
 Fig.5 High-frequency motor modeling (phased circuits).

## 2.2 고주파 전동기 모델링

그림 5는 고주파 모터 등가 회로의 회로도를 나타내며,  $R_c$ 는 고주파 철 손실,  $R_{cu}$ 는 구리 손실을 나타낸다. 구리 손실은 고정자 권선 인덕턴스가 로터 권선에 결합되지 않고 다른 두 상의 인덕턴스와 상호 보완적인 방식으로 결합되어 발생한다. 그 결과 고정자 인덕턴스와 상호 인덕턴스가 각각 메인 인덕턴스  $L_M$ 과 스트레이 인덕턴스  $L_{str}$ 로 전환된다.  $R_{gl}$  및  $C_{g1}$ 은 고정자 권선과 모터 프레임 사이의 기생 저항과 커패시턴스를 나타내고,  $R_{g2}$  및  $C_{g2}$ 는 고정자와 모터 프레임 사이의 기생 저항 및 커패시턴스를 의미한다.  $L_c$ 는 고정자 누설 인덕턴스와 모터 내부의 피더 도체에서 고정자 권선의 인덕턴스를 합한 값이다<sup>[3]</sup>.

그림 6은 설계에 기반한 모터 등가 회로의 특성 임피던스를 실제 측정값과 비교한 결과이다. 공진점과 기울기가 거의 일치하는 것을 확인했다.

그림 7은 케이블과 모터를 연결한 모델에 대한 DM 임피던스 측정 및 고주파 등가 회로 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 실측 결과 공진 주파수는 720kHz, 시뮬레이션 결과 공진 주파수는 850kHz로, 오차 범위가 허용 범위인 20%를 만족한다.

## 3. 실험 결과

다음은 실험 및 시뮬레이션 비교가 수행되는 모든 조건이다. 스위칭 주파수 3kHz, DC링크 300V, 50미터 케이블, 그리고 전류 제어 방식을 사용하여 등가 회로를 실험적으로 검증하고 수학적 등가 모델을 사용하여 ANSYS Simplorer에서 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 8에 따라 전압 피크가 거의 동일하고 주파수 또한 약 10%의 수용 가능한 범위 내에 있다.

## 4. 결론

제안한 모델은 실험 결과와 비교하여 유효성을 입증하였으며, 과전압 분석에 더 적합한 것으로 나타났고 실제 긴 케이블 전동기

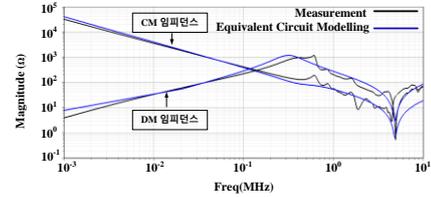


그림 6 모터 DM 및 CM 임피던스 측정 및 등가 회로 시뮬레이션 결과  
 Fig.6 Motor DM and CM impedance measurements and equivalent circuit simulation results

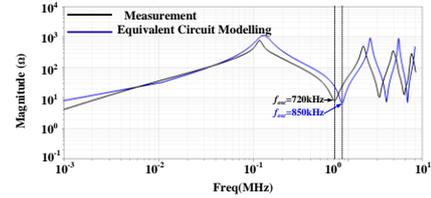


그림 7 케이블+모터 DM 임피던스 측정 및 등가 회로 시뮬레이션 결과  
 Fig.7 Cable + Motor DM impedance measurements and equivalent circuit simulation results

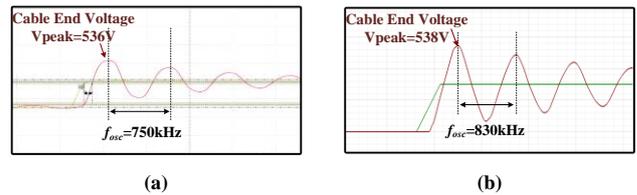


그림 8 모터 터미널 DM 과전압: (a) 실험 결과 (b) 시뮬레이션 결과  
 Fig.8 Motor terminal DM overvoltage: (a) experimental results (b) simulation results

구동 시스템에서의 적용 가능성을 검증하였다.

이 논문은 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원(No.20210501010020)과 산업통상자원부의 재원과 한국산업기술기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00252883, 하이브리드 추진선박 10MW급 직류배전 기술 개발)

## 참고 문헌

- [1] Yuxuan Wu; Kushan Choksi; Mustafeez ul Hassan; Fang Luo, "An Extendable and Accurate High Frequency Modelling of Three-phase Cable for Prediction of Reflected Wave Phenomenon," 2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Houston, TX, USA, 2022, pp. 944-950, doi: 10.1109/APEC43599.2022.9773493.
- [2] Wang, L.; Zhang, Y.; Ali, M. S.; Chen, G.; Guerrero, J. M.; Vasquez, J. C. "High-Frequency Modeling and Filter Design for PWM Drives with Long Cables," Preprints 2020, 2020120286.
- [3] M. Schinkel; S. Weber; S. Guttowski; W. John; H. Reichl, "Efficient HF modeling and model parameterization of induction machines for time and frequency domain simulations," Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06.