

# 소용량 직류단 캐패시터를 갖는 SPMSM 구동 시스템의 운전 조건에 따른 임피던스 기반 안정도 분석

윤민혁<sup>[1]</sup>, 이충원<sup>[2]</sup>, 김현식<sup>[1],[2]</sup>

<sup>[1]</sup>가천대학교 전기공학과, <sup>[2]</sup>가천대학교 차세대스마트에너지시스템융합학과

## Impedance-Based Stability Analysis of SPMSM Drive System with Reduced DC-Link Capacitance Under Different Operating Conditions

Min-Hyeok Yun<sup>[1]</sup>, Choong-Won Lee<sup>[2]</sup>, Hyeon-Sik Kim<sup>[1],[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Dept. of Electrical Engineering, Gachon University,

<sup>[2]</sup> Dept. of Next Generation Smart Energy System Convergence, Gachon University

### ABSTRACT

본 논문에서는 소용량 직류단 캐패시터를 갖는 SPMSM 구동 시스템에서 운전 조건 변동에 따른 임피던스 기반 안정도 분석을 진행하였다. 우선, 소신호 분석을 통해 SPMSM 구동용 인버터의 입력 임피던스 모델을 유도하였다. LC 필터와 SPMSM 임피던스의 비율에 기반한 안정도 판별을 통해 시스템 안정도를 분석할 수 있다. 토크 지령, 부하 속도, 제어기 이득 변동에 따른 임피던스의 변동을 고려하여 운전 조건 변동에 따른 안정도 영향을 파악하였다. 제안된 안정도 분석의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

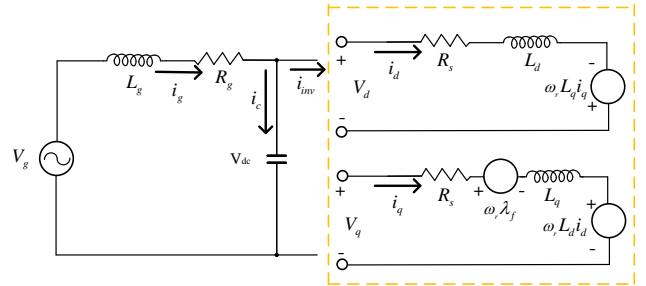


그림 1. 다이오드 정류 구동 시스템 모델

### 1. 서론

3상 PMSM 구동 시스템에서 다이오드 정류로 인한 저주파 전압 리플을 저감하기 위해 대용량의 전해 캐패시터를 직류단 캐패시터로 사용하는 것이 일반적이었다. 다만 전해 캐패시터를 사용할 경우 시스템의 부피 및 비용이 증가하고 수명이 짧아진다는 단점이 있어 시스템의 신뢰성 문제가 제기되었다. 따라서 이를 대체하여 소용량의 필름 캐패시터를 직류단에 사용하는 연구가 진행되었지만 정전력원(Constant Power Load, CPL) 부하로 인해 안정성 문제가 발생한다.<sup>[1]</sup>

따라서 본 논문에서는 3상 다이오드 정류에 기반한 인버터 시스템에 대하여 임피던스 모델에 기반한 전체 시스템의 안정도 분석을 수행하였다. 토크 지령, 부하 속도, 제어기 이득에 따라 변동하는 PMSM 구동 시스템의 임피던스와 LC 필터의 임피던스 비율을 통해 운전 조건 변동에 따른 안정도를 파악했으며 그 경향성을 분석하였다. 이러한 임피던스의 차이는 MATLAB/Simulink 및 PLECS 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 2. 소신호 기반 임피던스 모델링

PMSM 구동 드라이브 시스템 모델을 간략화하면 그림 1과 같다. 직류단 계통 인덕턴스 및 저항  $L_g$ ,  $R_g$ , 직류단 캐패시터는  $C_{dc}$ 이다. 이때, LC 필터의 출력 임피던스  $Z_f$ 는 식 (1)과 같다.

$$Z_f = \frac{L_g s + R_g}{L_g C_{dc} s^2 + R_g C_{dc} s + 1} \quad (1)$$

인버터 직류단 입력 전력과 출력 전력 변동이 동일하다고 가정할 경우, PMSM의 동기 좌표계 소신호 모델링에 기반하여 PMSM의 입력 어드미턴스  $Y_m$ 을 구할 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$Y_m(s) = -\frac{i_{mv,o}}{V_{dc,o}} + \frac{3}{2} \left( \frac{V_{d,o}}{V_{dc,o}^2} \right) \left( \frac{V_{d,o} + R_s i_{d,o} + L_d s i_{d,o} + \omega_r L_d i_{q,o}}{R_s + L_d s + G_d} \right) + \frac{3}{2} \left( \frac{V_{q,o}}{V_{dc,o}^2} \right) \left( \frac{V_{q,o} + R_s i_{q,o} + L_q s i_{q,o} - \omega_r L_q i_{d,o}}{R_s + L_q s + G_q} \right) \quad (2)$$

여기서 PI 전류 제어기는  $G_d$ ,  $G_q$ 이며, 운전점은 아래 첨자 O로 표기한다. 직류단 전압은  $V_{dc}$ , 인버터 전류는  $i_{mv}$ , PMSM의 d-q축 전압 및 전류는  $V_d, V_q, i_d, i_q$ 이다.

d-q축 인덕턴스가 같은 SPMSM의 경우, 기저 속도 이하 운전 시 d-축 전류는 0으로 운전하게 된다. 이 때, 제어기 이득을 식 (3)과 같이 두고 입력 어드미턴스를 구하면 식 (4)와 같다.

$$G_d(s) = G_q(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \left( \frac{R_s + L_s s}{s} \right) \omega_{cc} \quad (3)$$

$$Y_m(s) = -\frac{i_{mv,o}}{V_{dc,o}} + \frac{3}{2} \left( \frac{V_{q,o}}{V_{dc,o}^2} \right) \left( 2i_{q,o} - \frac{2\omega_{cc}(sL_f + R_s)i_{q,o} + s\omega_r \lambda_f}{(s + \omega_{cc})(R_s + sL_f)} \right) \quad (4)$$

### 3. 임피던스 기반 안정도 분석

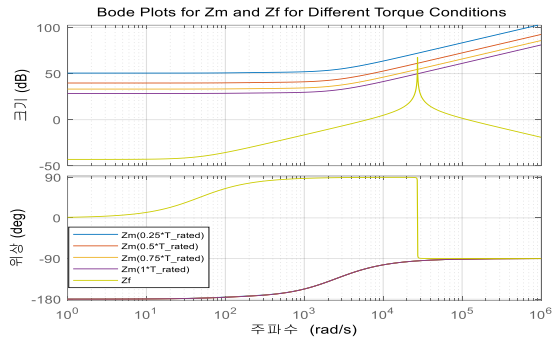
필터 출력 임피던스  $Z_f$ 와 모터 입력 임피던스  $Y_m$ 의 비율을 통해 전체 시스템의 안정도를 판별할 수 있다. 이러한 임피던스 기반 안정도 판별법<sup>[3]</sup>을 통해 SPMSM의 운전 조건 변동에 따른 안정도 영향을 파악할 수 있다.

표 1. 직류단 필터 및 운전 조건

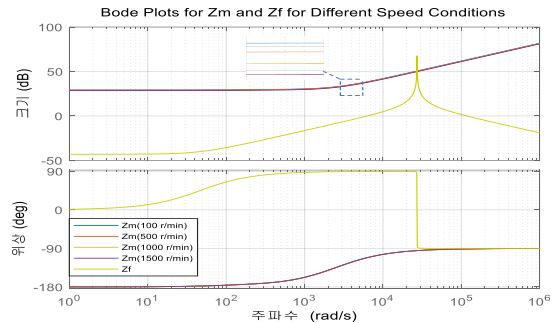
Parameter	Value
입력 전압, $V_{grid}$	220 V <sub>ac</sub> , 50Hz
직류단 캐패시턴스, $C_{dc}$	9uF
계통 인덕턴스, $L_g$	0.15mH
계통 저항, $R_g$	5mΩ

표 2. 모터 제정수

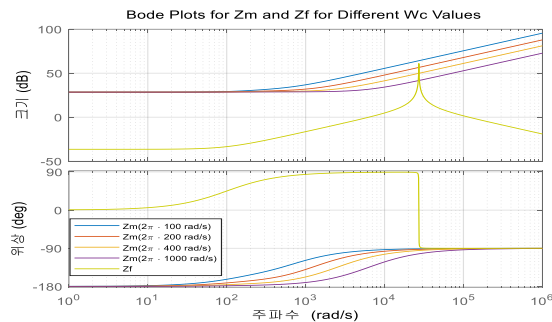
Parameter	Value
정격 토크, $T_{rated}$	12.04N·m
극수, $P$	4
직류단 전압, $V_{dc}$	380V
고정자 저항, $R_s$	0.5Ω
고정자 인덕턴스, $L_f$	3mH
영구자석에 의한 쇄교자속, $\lambda_f$	33.6mWb·t



(a) 토크 지령 변동



(b) 부하 속도 변동



(c) 제어기 대역폭 변동

그림 2. 안정도 분석을 위한 필터 출력 임피던스 및 모터 입력 임피던스의 보드 선도

그림 2는 각각 토크 지령, 부하 속도, 제어기 대역폭에 따른 입·출력 보드 선도를 나타낸다. 적용된 필터 및 모터 제정수 및

운전 조건은 각각 표 1, 표 2로 나타내었다. 단, 제어기 대역폭 변동 시 입력 전원 크기는 110 V<sub>ac</sub>으로 두었다. 입·출력 임피던스 크기가 동일 지점에서 ( $Z_f = Z_m$ ) 위상차에 의해 위상 여유(Phase margin, PM)을 확인할 수 있다. 이를 통해 토크 지령이 커질수록, 부하 속도가 빠를수록, 전류 제어기 대역폭이 넓을수록 입력 임피던스의 크기가 감소하면서 위상 여유가 감소하고 따라서 시스템의 안정도가 감소함을 확인할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

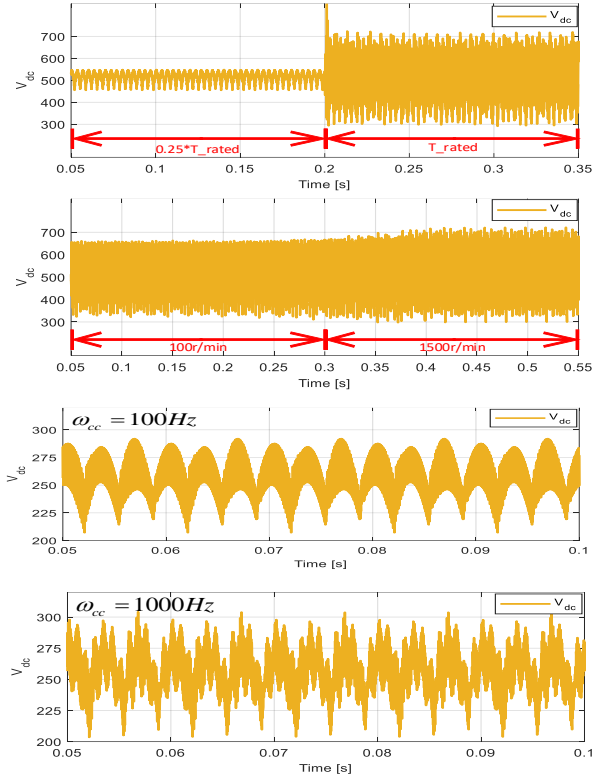


그림 3. 운전 조건에 따른 직류단 전압 변동 시뮬레이션 결과

그림 3은 각각 토크 지령, 부하 속도, 제어기 대역폭에 따른 직류단 전압 변동 파형이다. 이를 통해 시스템의 안정성이 감소함에 따라 직류단 전압의 맥동 성분이 비례하여 증가함을 확인할 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 운전 조건에 따른 임피던스 변동을 고려하여 3상 다이오드 정류 SPMSM 구동 시스템의 임피던스 안정도 판별을 수행하였다. 이를 통해 토크 지령, 부하 속도, 제어기 대역폭 크기가 증대할수록 입력 임피던스 크기가 작아짐을 확인할 수 있었다. 이는 위상 여유의 감소로 이어지며, 시스템 안정성이 감소하여 직류단 전압의 맥동이 커짐을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 이를 통해 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 PMSM 구동 시스템에서 보다 정확한 안정도 분석을 수행할 수 있었다. 또한, 소신호 모델링에 기반하여 제어기 개선에 따른 안정도 영향 분석도 가능할 것으로 기대된다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로  
한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2021400000060,  
Techno-Economics 기반 차세대에너지시스템융합대학원(학과) – STEP)

### 참 고 문 헌

- [1] 이육진, “소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동용 인버터의 직류단 전압 안정화에 관한 연구”, 공학박사 학위 논문, 서울대학교, 2009.
- [2] Junya Huo, Nannan Zhao, Gaolin Wang, Guoqiang Zhang, Lianghong Zhu, and Dianguo Xu, “An Active Damping Control Method for Reduced DC-Link Capacitance PMSM Drives with Low Line Inductance”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol 37, no 12, 14328-14341, Dec. 2022.
- [3] Jian Sun, “Impedance-Based Stability Criterion for Grid-Connected Inverters”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol 26, no 12, 3075-3078, Nov. 2011.