

계자권선형 동기전동기 구동을 위한 4-레그 인버터 제어방법

김한빛, 김도현, 김준석, 이준석
단국대학교

Four-Leg Inverter Control for Driving Wound Field Synchronous Motor

Han-Vit Kim, Do-Hyeon Kim, Joon-Seok Kim, June-Seok Lee
Dankook University

ABSTRACT

본 논문에서는 계자권선형 동기전동기(Wound Field Synchronous Motor, WFSM) 구동을 위한 4-레그 인버터(Four-Leg Inverter, FLI)의 토폴로지와 제어 방법을 제안한다. WFSM의 계자축 전류 제어 회로는 Buck-Converter, H-Bridge Inverter 등 다양한 토폴로지가 존재한다. 본 논문은 3상 인버터에 스위치 1개와 다이오드 1개로 구성된 레그를 추가한 FLI 토폴로지를 제안하고 옴셋 전압을 이용하여 FLI 토폴로지를 제어하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

최근 국내에서는 영구자석의 핵심재료인 희토류의 불안정한 수급과 가격 및 환경문제로 인해 비 희토류 전동기로 WFSM에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. WFSM은 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)와 다르게 영구자석 대신 회전자에 감긴 권선에 전류를 흘려 계자자속을 생성하게 된다. 따라서, WFSM의 계자 자속 생성을 위한 별도의 계자회로가 요구되며 일정한 계자 자속을 발생시키기 위해 권선에 직류 전류를 흘려줄 수 있는 Buck-Converter^[1]나 H-Bridge Inverter^[2]와 같은 계자회로를 이용하여야 한다.

Buck-Converter를 사용하는 경우, 계자 회로는 그림 1(a)와 같이 스위치 1개와 다이오드 1개로 구성되어 H-Bridge Inverter보다 시스템 부피면에서 유리하지만, 스위칭 주파수가 작아 출력전류 리플의 크기가 크다. 반면에 H-Bridge Inverter를 사용하는 경우, Buck-Converter보다 스위칭 주파수가 크므로 출력전류 리플의 크기가 작아 유리하지만, 그림 1(b)와 같이 스위치 2개와 다이오드 2개로 구성되어 시스템 부피가 크다는 단점이 있다. 그러나, H-Bridge Inverter를 계자 회로로 사용하여 FLI 토폴로지를 설계하는 경우, 3상 인버터에 스위치 1개와 다이오드 1개를 추가하여 구성되므로 시스템의 부피는 Buck-Converter와 동일하게 된다.

본 논문에서는 비 희토류 전동기인 WFSM의 구동을 위한 계자회로로 H-Bridge Inverter를 이용하며, 기존 계자회로의 시스템 부피를 감소시키기 위한 FLI 토폴로지를 제안한다. 이때, 전동기 구동을 위해 고정자의 회전자계가 생성되어야 하므로 평형 3상 교류전원을 출력해야 한다. 따라서, 평형 3상 교류전원을 출력하기 위해, 옴셋 전압을 사용하여 인버터 최대 출력으로 정규화하는 변조방식을 제안한다. 제안하는 방법의 타당성은 PLECS를 이용한 시뮬레이션을 통해 검증한다.

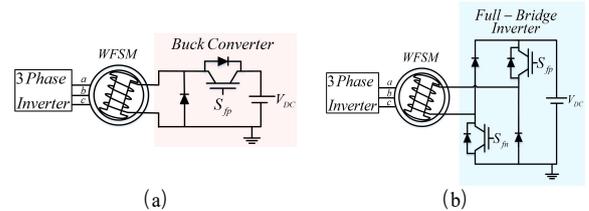


그림1 WFSM의 계자회로 토폴로지 (a)Buck 컨버터, (b)H-Bridge 인버터
Fig.1 Field Circuit Topology of WFSM (a)Buck Converter, (b)H-Bridge Inverter

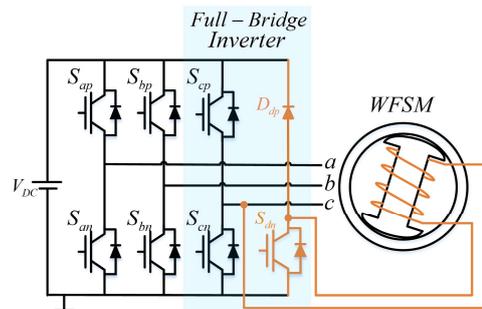


그림2 WFSM FLI 토폴로지
Fig.2 Topology of WFSM Four-Leg Inverter

2. WFSM FLI 토폴로지

2.1 FLI 토폴로지 회로 및 동작원리

일반적인 H-Bridge Inverter 회로는 IGBT 4개를 사용하게 된다. 하지만, WFSM의 계자자속 발생을 위한 계자전류가 단방향으로만 흐르기 때문에 그림 1(b)와 같이 IGBT 2개를 다이오드로 대체할 수 있다. 따라서, 3상 인버터에 스위치 1개와 다이오드 1개로 구성된 하나의 레그를 추가하여 FLI 토폴로지를 설계하면 그림 2와 같다.

WFSM은 계자회로에 전류를 흘려 생성된 전자석이 고정자의 회전자계와 동일한 속도로 회전하는 원리로 구동된다. 따라서, FLI 토폴로지를 사용하여 WFSM을 구동하기 위해 고정자의 회전자계를 생성하기 위한 평형 3상 교류전원을 출력해야 한다. 이때, FLI 토폴로지의 계자회로로 3상 인버터의 C상과 추가된 레그인 D상을 사용한다. 또한, 계자전압은 C상 출력 상전압과 D상 출력 상전압의 차이인 출력 선간 전압으로 3상 출력 상전압 지령에 더해진다. 전동기를 구동하는 경우, 인버터의 출력 상전압이 아닌 출력 선간 전압을 이용하기 때문에, 극전압 지령에 존재하는 옴셋전압이 서로 상쇄되어 평형 3상 교류전원을 출력할 수 있다.

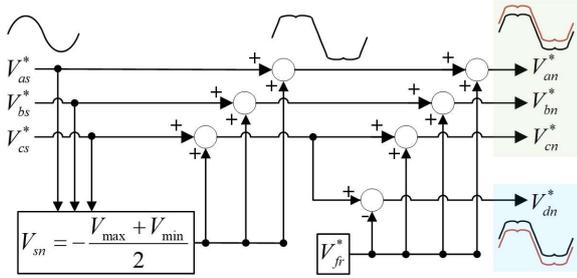


그림3 WFSM FLI 제어 블록도
Fig.3 WFSM FLI control block diagram

표 1 시뮬레이션에서 사용한 WFSM 파라미터 및 구동 조건

Table 1 WFSM parameters and driving condition for simulation

파라미터	값	파라미터	값
R_s	0.1[Ω]	L_{md}	4.1[mH]
R_f	0.16[Ω]	L_{mq}	2[mH]
N_s/N_f	1	L_{ls}	0.79[mH]
$Pole$	6	L_{lf}	18.5[mH]
V_{DC}	400[V]	f_{sw}	10[kHz]

2.2 윗셋전압을 이용한 FLI 토폴로지 구현

WFSM을 구동하기 위한 윗셋전압은 전압 변조범위의 확장을 위한 3차 고조파전압(V_{sn})과 계자전류를 위한 계자전압(V_f^*)의 합으로 구성되어 있다. 인버터의 출력 극전압 지령($V_{an}^*, V_{bn}^*, V_{cn}^*$)은 3상 출력 상전압($V_{as}^*, V_{bs}^*, V_{cs}^*$)과 윗셋전압을 더하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{an}^* &= V_{as}^* + V_{sn}^* + V_f^* \\ V_{bn}^* &= V_{bs}^* + V_{sn}^* + V_f^* \\ V_{cn}^* &= V_{cs}^* + V_{sn}^* + V_f^* \end{aligned} \quad (1)$$

또한, D상 출력 극전압 지령(V_{dn}^*)을 나타내면 다음과 같다.

$$V_{dn}^* = V_{ds}^* + V_{sn}^* - V_f^* \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 이용한 WFSM의 FLI 토폴로지 제어블록도는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

WFSM의 구동을 위한 FLI 토폴로지의 스위칭 상태를 결정하는 경우, 정현파의 전압지령을 삼각 반송파와 실시간으로 비교하는 SPWM 변조방식을 사용한다. 따라서, FLI 토폴로지의 전압 지령은 진폭이 1인 삼각 반송파보다 크지 않아야 하기 때문에, 3상 인버터의 최대 출력전압($V_{DC}/2$)과 계자회로의 최대 출력전압(V_{DC})으로 정규화하여 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{V_{as}^* + V_{sn}^*}{V_{DC}/2} + \frac{V_f^*}{V_{DC}}, & T_b &= \frac{V_{bs}^* + V_{sn}^*}{V_{DC}/2} + \frac{V_f^*}{V_{DC}} \\ T_c &= \frac{V_{cs}^* + V_{sn}^*}{V_{DC}/2} + \frac{V_f^*}{V_{DC}}, & T_d &= \frac{V_{cs}^* + V_{sn}^*}{V_{DC}/2} - \frac{V_f^*}{V_{DC}} \end{aligned} \quad (3)$$

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 기법의 타당성을 검증하기 위해서, 표 1의 WFSM 파라미터와 Plecs를 사용하여 토크부하에서 단위 전류당 최대 토크(MTPA) 제어 시뮬레이션을 진행하였다.

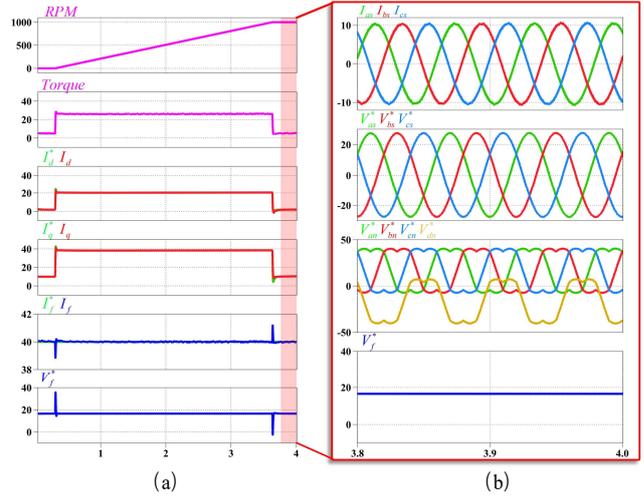


그림4 WFSM FLI MTPA 제어 시뮬레이션 결과
Fig.4 WFSM FLI MTPA control simulation results

계자 전류 지령(i_f^*)은 40A, 속도는 1000rpm, 토크부하는 5Nm로 설정하였다.

그림 4는 일정 토크 부하에서의 WFSM FLI 토폴로지 MTPA 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 4(a)에서 0초부터 0.3초까지는 속도 지령이 없기 때문에, 부하의 영향으로 토크가 일정하게 유지된다. 그러나 0.3초 이후 속도 지령이 발생하면 속도 제어를 위한 d축과 q축 전류 지령이 생성되어 일정하게 유지되던 토크가 증가하므로, 전동기의 실제속도도 증가하게 된다. 또한, 그림 4(b)는 그림 4(a)에서의 정상상태 파형으로, 3상 상전류(I_a, I_b, I_c)가 평형을 유지하며, 4상 출력 극전압 지령($V_{an}^*, V_{bn}^*, V_{cn}^*$)의 파형을 통해 3상 출력 상전압 지령($V_{as}^*, V_{bs}^*, V_{cs}^*$)에 윗셋전압이 더해진 변조 방식을 사용함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 WFSM 구동을 위한 FLI 토폴로지와 제어방법을 제안하였다. 제안된 기법은 FLI 토폴로지 설계를 위해 WFSM의 계자회로 토폴로지를 비교하였고 H-Bridge Inverter를 계자회로로 선정하였으며, 선정된 계자회로와 3상 인버터를 포함한 FLI 토폴로지 제어 방법을 윗셋전압을 이용하여 구현하였다. 또한, Plecs를 사용하여 MTPA 제어 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 현대모비스의 지원에 의해 연구되었음

참고 문헌

- [1] N. Janiaud and F.-X. Vallet, "Electric Vehicle Powertrain Architecture and Control", Electric Vehicles Symposium 24, pp. 685-686, 2009.
- [2] D. Hwang and B. Gu, "Field Current Control Strategy for Wound-Rotor Synchronous Motors Considering Coupled Stator Flux Linkage", in IEEE Access, vol. 8, pp. 111811-111821, 2020.