

대칭형 6상 Dual-Winding PMSM의 Fault-Tolerant 제어 알고리즘에 관한 연구

엄현종*, 원준희*, 임종석*, 방석현*, 김승주**, 조수연***, 이주*
 한양대학교*, 한국기계전기전자시험연구원**, 자동차부품연구원***

A Research on Fault-Tolerant Control Algorithm of Symmetric 6-Phase Dual-Winding PMSM

Hyun-Jong Eom*, Jun-Hui Won*, Jong-Suk Lim*, Seok-Hyeon Bang*, Seung-Ju Kim**, Su-Yeon Cho***, Ju Lee*
 Hanyang University*, Korea Testing Certification** Korea Automotive Technology Institute***

Abstract - 최근 산업에서 안정성확보의 필요성에 따른 Redundancy한 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 논문은 대칭형 6상 Dual-Winding 타입의 PMSM 구동 중에 고장발생시 이를 강인하게 제어할 수 있는 알고리즘을 제시하였으며 고장이 발생한 권선 외에 나머지 상의 전류 위상각을 조정하는 제어법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 고장 발생 시 본 논문에서 제안하는 보상 제어법을 통해 출력 성능이 개선되었음을 Matlab/Simulink로 검증하였다.

1. 서 론

회로류 자석과 같은 고성능 영구자석 발달로 인해 영구자석 전동기(PMSM)가 시스템의 소형화, 고출력, 고효율을 만족하게 되었다. 이에 따라 다양한 분야의 산업 현장에서 널리 사용되고 있으며 일반적인 3상 시스템에서의 출력과 효율 증가에 관한 많은 연구가 이루어졌다. 반면 최근에 항공, 우주, 자동차, 선박 등의 다양한 산업에서 전동기 시스템이 효율뿐만 아니라 안정성에 관한 기술 개발이 요구되고 있다. 이에 따라 여분의 시스템을 구성하여 높은 신뢰성을 확보하는 Redundancy 기술이 주목받기 시작하면서 이를 만족하는 다상 전동기 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1].

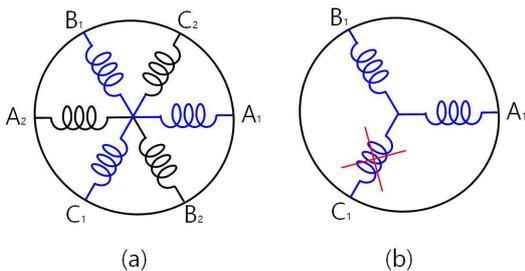
특히 다상 전동기 시스템 중에 Dual-Winding 시스템은 두 개의 권선 Set을 이용하여 한 개의 권선 Set의 고장 발생 시 나머지 Set을 이용하여 구동할 수 있기 때문에 권선 이외에도 스위칭 소자, 제어기의 여분의 시스템을 구성하여 높은 신뢰성을 확보할 수 있다.

Dual-Winding 전동기는 고정자 권선 배치에 따라 여러 가지로 나눌 수 있는데, 이 중에 대칭형은 각 고정자 권선이 일정한 간격으로 배치된다. 대칭형 구조는 한 개의 권선 Set만 구동할 때 토크 리플이 많이 발생하지만 상대적으로 더 큰 토크를 발생시킬 수 있기 때문에 고장운전 상황에서도 높은 토크가 요구되는 견인용 전동기, EPS 시스템에서의 이용에 적합하다[2]-[3].

본 논문에서는 대칭형 Dual-Winding PMSM의 1상 고장시에도 권선Set을 탈락시키지 않고 정상동작 시스템을 최대한 이용하는 고장에 강인한 제어법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 상 고장시 Fault-tolerant 제어 전략



〈그림 1〉 대칭형 3상 Dual-Winding 전동기

〈그림 1〉의 (a)와 같은 대칭형 3상 Dual-Winding 전동기의 권선 배열에서, 권선이나 인버터의 단락 고장이 발생 할 경우는 시스템에 치명적인 과전류가 흐르기 때문에 단락이 발생한 권선 Set을 탈락시키고 남은 3상을 이용하여 구동해야 한다.

반면 권선이나 인버터 1상에 개방 회로 고장이 발생할 경우에는 〈그림 1〉의 (b)와 같이 남은 2상과 나머지 권선Set을 이용하여 구동이 가능하다. 하지만 남은 2상에서는 불평형 성분이 존재하기 때문에 온전한 회전자계가 형성되지 않는다. 이로 인해 출력토크가 감소하고 토크 리플이 증가한다. 하지만 남은 2상의 전류위상각을 조정할 수 있기 때문에 이를 통해 불평형 성분을 제거하게 되면 온전한 회전자계를 형성하여 1상 개방 회로 고장에도 리플이 저감된 출력을 낼 수 있게 된다.

2.1.1 회전 기저력 발생을 위한 전류 위상각 조정

〈그림 1〉의 (a)의 구조에서 (b)와 같이 1상 개방 회로 고장이 발생했을 때 남은 2상의 불평형 성분을 제거하기 위해 조정해야 할 전류의 위상각을 다음의 과정을 통해 구할 수 있다.

$$f_{a_1} = F_m \cos \omega t \sin \theta \quad (F_m = kI_a) \quad (1)$$

$$f_{b_1} = F_m \cos(\omega t - x) \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \quad (2)$$

f_{a_1} 은 a_1 상의 기저력을 나타내며 이때 크기가 $F_m \cos \omega t$ 인 기저력이 공간에 분포하게 되며 전류를 함축하고 있다. 이때 기저력이 발생하는 공간적인 위치를 θ 라고 할 때, b_1 상의 기저력 또한 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 x 는 a_1 상과의 전류의 위상차로써 이를 조정하여 회전 기저력을 형성 할 수 있다.

$$f_{a_1} = \frac{F_m}{2} \sin(\theta - \omega t) + \frac{F_m}{2} \sin(\theta + \omega t) \quad (3)$$

$$f_{b_1} = \frac{F_m}{2} \sin(\theta - \omega t - x) + \frac{F_m}{2} \sin(\theta + \omega t + x - \frac{4}{3}\pi) \quad (4)$$

식 (1)과 식 (2)를 정리해보면 다음 식 (3)과 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 식 (3)과 식 (4)의 우측 첫 번째 항을 기저력의 정상분, 두 번째 항을 역상분으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{F_m}{2} \sin(\theta + \omega t) + \frac{F_m}{2} \sin(\theta + \omega t + x - \frac{4}{3}\pi) \\ &= F_m \cos(\theta + \omega t + \frac{x}{2} - \frac{2}{3}\pi) \cos(\frac{x}{2} - \frac{4}{3}\pi) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

회전 기저력의 역상분의 특성에 따라 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 이를 이용하여 위상각을 구하면 식 (6)과 같다.

$$\cos\left(\frac{x}{2} - \frac{4}{3}\pi\right) = 0 \quad (6)$$

$$\therefore x = \frac{1}{3}\pi$$

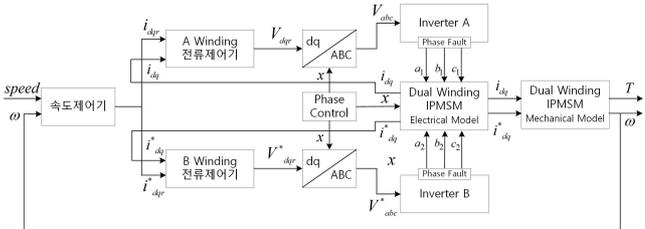
따라서 c_1 상 단선시 a_1 상과 b_1 상의 위상차가 60도일 때 고정자에서 회전 기자력이 생성된다[4]. 식 (3)과 식 (4)의 정상분의 합과 식 (6)을 이용하여 식 (7)을 도출해 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{F_m}{2} \sin(\theta - \omega t) + \frac{F_m}{2} \sin(\theta - \omega t - x) \\ = F_m \cos\left(\omega t - \frac{1}{6}\pi\right) \cos\left(\frac{1}{6}\pi\right) \\ = \frac{F_m}{2} \cos\left(\omega t - \frac{1}{6}\pi\right) \end{aligned} \quad (7)$$

a_1 상과 b_1 상에 의해 발생한 회전 기자력의 위상은 정상운전에 비해 30도 앞서게 된다. 따라서 전기적 각도를 전체적으로 30도 뒤진 위상으로 보정해야 원하는 회전 자계를 만들 수 있다.

2.1.2 위상각 조정을 적용한 Fault-Tolerant 제어 기법

3상 Dual-Winding IPMSM의 벡터 제어를 기반으로 1상 개방 고장 시 Fault-Tolerant 제어가 가능한 제어 블록도를 아래의 <그림 2>를 통해 나타내었다.



<그림 2> 보정 제어 기법을 적용한 IPMSM의 제어 블록도

정상운전 시 3상 Dual-Winding 전동기에서는 두 권선 Set에 인가해 주는 전류를 각각 제어하여 토크를 발생시킨다[5]. 만약 전동기 권선 혹은 인버터에 1상 개방 고장 발생 시 나머지 2상의 인가 전압의 위상각을 고려하여 지령전압을 생성한다. 벡터 제어 시 조정된 위상각을 고려하여 좌표변환해야 한다.

2.2 시뮬레이션

Matlab/Simulink를 이용하여 <표 1>의 사양의 IPMSM에 대한 시뮬레이션을 진행하였으며 정상동작 중에 1상 개방 고장이 발생 했을 때 앞 절에서 제안한 제어법을 적용하여 결함에 대한 보정을 진행하였다.

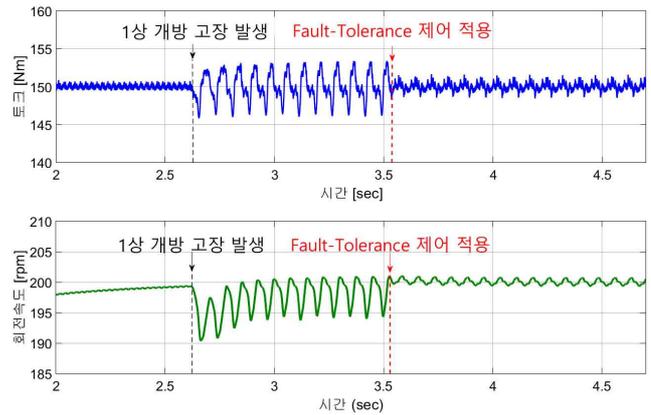
<표 1> 시뮬레이션 전동기/제어기 파라미터

Parameter	Spec	Parameter	Spec
Rate Torque	160[Nm]	DC Voltage	48[V]
Pole	4[EA]	Phase Current Peak	300[A]
Phase Resistance	8.31[mΩ]	Phase Voltage Peak	27.7[V]
1 st d-axis Inductance	0.1533[mH]		
2 nd d-axis Inductance	0.2574[mH]	Inertia Moment	0.2[kg-m ²]
1 st q-axis Inductance	0.1533[mH]	C.C frequency	20[kHz]
2 nd q-axis Inductance	0.2574[mH]	S.C frequency	0.5[kHz]
Linkage Flux	0.0789[Wb]		

시뮬레이션 상황은 IPMSM의 일정속도 운전중에 1상 개방 고장이 발생하여 고장운전이 진행되며, 그 이후에 Fault-Tolerant 제어를 적용하여 상 고장에 대한 보정 운전을 진행한다.

2.2.1 시뮬레이션 결과

IPMSM의 지령속도 200rpm, 부하토크 150Nm의 저속, 고 토크의 정속도 구간에서 1상 개방 고장이 발생 했을 때의 토크와 회전속도의 추이를 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.



<그림 3> Fault-Tolerant 제어법 적용 시 시뮬레이션 파형

시뮬레이션을 통해 6상 Dual-Winding 전동기의 1상 개방 고장 상황에서 본 논문에서 제안한 제어법 적용했을 때, 토크의 리플과 회전속도의 Haunting이 감소됨을 확인 하였다.

3. 결론

전동기를 구동할 때, 상 고장이 발생하는 경우 진동, 소음, 발열과 같은 추가적인 영향이 나타나며 이는 전동기나 주변기기의 2차 고장의 요인이 될 수 있다. 이러한 영향을 감소시키기 위해 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용하면 전동기의 안정성을 높이고 시스템의 신뢰성을 증가시킬 수 있다.

앞서 살펴본 시뮬레이션의 결과를 통해 Fault-tolerant 제어이 용 시 상 고장의 악영향을 감소시킬 수 있으며 시스템의 안정성을 증가시키는 것을 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업입니다.

(19TBIP-C143153-02)

이 성과는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

(NO. 2016R1A2A1A05005392)

[참고 문헌]

- [1] Del Pizzo A, Di Noia L. P, Pizza A, "Analysis of Five Phase Electrical Drive for the propulsion of All Electric Aircraft", 2016 AEIT International Annual Conference, 1-6, 2016
- [2] Mikihiro Hiramane, Yshitaka Hayashi, Takashi Suzuki "2-Drive Motor Control Unit for Electric Power Steering", SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst. VOL 10, Issue 2, pp. 337-344, 2017
- [3] M. Barcaro, N. Bianchi, F. Magnussen, "Faulty Operations of a PM Fractional-Slot Machine With a Dual Three-Phase Winding", IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL 58, NO. 9, pp. 3825-3832, 2011
- [4] Dong Ting, Li Fenghui, Shen Li "Fault-Tolerant Method for Six-Phase PMSM by adjusting Phase Angle", 2017 IEEE ICEMS, 10. 1109, 2017
- [5] Shunsuke Noguchi, Hideo Dohmeki "Improvement of torque ripple characteristics of double winding PMSM with using twin inverters" 2018 IEEE INTERMAG, 1-5, 2018