

전자기 해석을 통한 3상 독립 2병렬 전동기 고정자 권선 고장 분석

고 덕 화^{*1)} · 김 동 영¹⁾ · 정 길 은¹⁾ · 김 태 훈¹⁾ · 이 일 남²⁾

(주삼현 해석팀¹⁾ · 삼현 기술연구소²⁾

A Study on Stator Winding Failure of a 3-Phase Dual Motor Using Electromagnetic Analysis

Dukhwa Koh^{*1)} · Dongyeong Kim¹⁾ · Gileun Kim¹⁾ · Tachun Kim¹⁾ · Ilnam Lee²⁾

Samhyun CAE team¹⁾, Samhyun R&D center²⁾

Key words : 3-Phase Dual Motor(3상 듀얼 모터), Stator Winding Failure(고정자 권선 고장), Electromagnetic Analysis(전자기 해석), Electric Power Steering(전동식 조향 장치), Open Circuit(단락 회로)

교신저자, E-mail: gdh@samhyun.co.kr

전동식 조향장치(Electric Power Steering, EPS)는 조향 보조 기능을 전기모터 기반으로 제공하는 시스템으로, 운전자의 안전성과 승차감에 직결되는 핵심 구성요소다. EPS 모터에 요구되는 주요 성능 요건으로는 응답성, 효율성, 그리고 고장 발생 시에도 일정 수준의 기능을 유지하는 신뢰성(fault tolerance)이 포함된다. 특히, 자동차 산업에서의 기능 안전 표준인 ISO 26262에 따라 EPS 시스템은 고장 시에도 ASIL D 수준의 안정성을 보장해야 한다.

이러한 요구사항을 만족시키기 위해 EPS 모터에는 일반적으로 6상 구조, 즉 독립된 두 개의 3상 권선을 병렬로 구성한 이중 권선 구조가 널리 사용된다. 이 구조는 한 쪽 권선에 고장이 발생하더라도 나머지 정상 권선만으로 제한된 수준의 동작을 지속할 수 있어 신뢰성 확보에 유리하며, 토크 리플 감소 및 자기장 고조파 안정화, 전류 분산에 따른 효율 향상 등의 전자기적 이점도 제공한다.

하지만 현재까지 관련 연구는 주로 실험 기반의 고장 특성 분석에 집중되어 있으며, 고장 발생 시 전자기적 성능 변화에 대한 수치 해석적 접근은 상대적으로 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 유한 요소해석(Finite Element Method, FEM)을 활용하여, 3상 독립 2병렬 구조를 갖춘 EPS 모터의 고정자 권선 고장 시 전자기 성능 변화를 정량적으로 분석하고, 고장 허용성 확보를 위한 설계 및 진단 관점에서의 기초 데이터를 제시하고자 한다.

본 논문에서는 3상 독립 2병렬 구조를 갖는 전동기에서 Open-Circuit fault와 Phase-to-Phase fault 발생 시의 자계 및 전기적 특성 변화를 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, Open-Circuit fault의 경우 전류는 정상 상태 대비 최대 16% 감소($32 \rightarrow 26.8$ [Arms])하고, 피크 기전력은 오히려 최대 378% 증가($3.7 \rightarrow 17.7$ [Apeak])하는 경향을 나타냈다. 이는 회로 일부가 개방됨으로써 자속 경로 및 전압 분포에 비정상적인 집중 현상이 발생하기 때문으로 해석된다. 또한 토크는 최대 50% 저하($4.92 \rightarrow 2.47$ Nm)되어 출력 성능이 현저히 저하되는 결과를 보였다.

한편, Phase-to-Phase fault에서는 상간 단락에 의해 전류가 급격히 증가하며, 최대 180% 상승($32 \rightarrow 89.6$ Arms) 하는 양상을 보였다. 반면, 기전력은 최대 59% 감소($2.72 \rightarrow 1.07$ V[rms]) 하여 자계의 왜곡이 심화된 것으로 판단된다. 토크 또한 최대 47% 감소($4.92 \rightarrow 2.62$ Nm) 하였으며, 이는 모터 운전 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있는 요소로 분석된다. 이와 같은 결함 분석을 통해, 각 결함 유형이 전기적 · 기계적 출력 특성에 미치는 영향을 정량적으로 규명할 수 있었으며, 향후 결함 진단 및 보호 알고리즘 개발에 유의미한 기초자료로 활용될 수 있다.

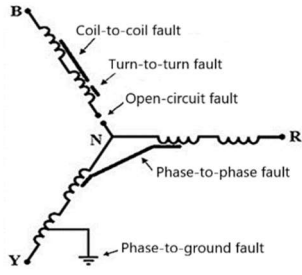


Fig. 1 Type of Fault

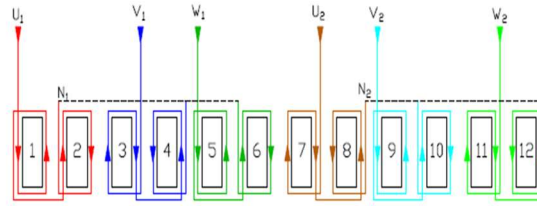


Fig. 5 Winding Pattern

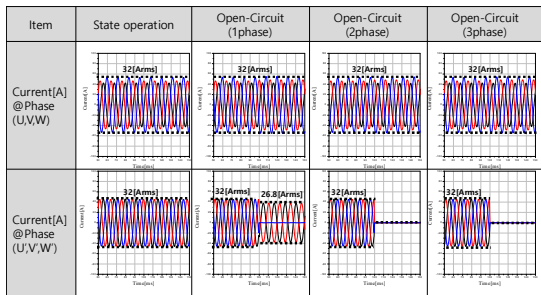


Fig. 2 Fault Current @Open Circuit

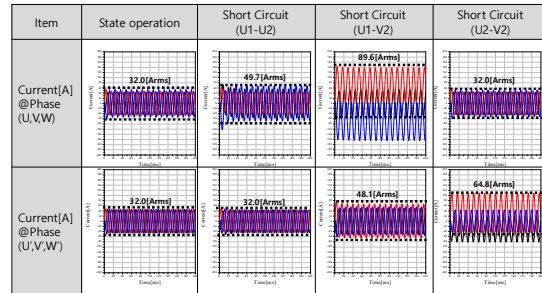


Fig. 6 Fault Current @Phase-to-phase

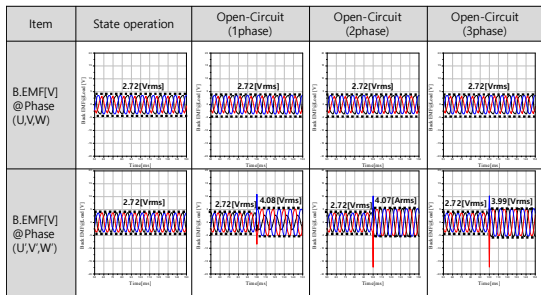


Fig. 3 Fault B.EMF @Open Circuit

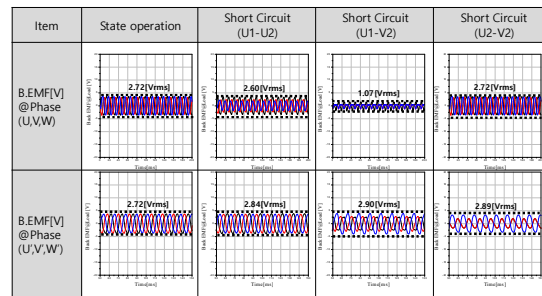


Fig. 7 Fault B.EMF @Phase-to-phase

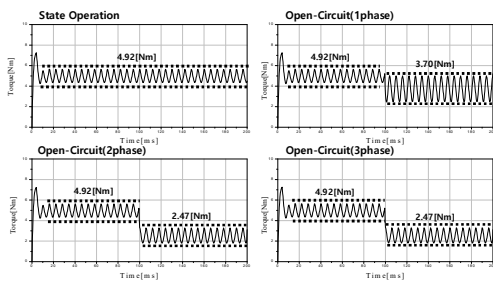


Fig. 4 Fault Torque @Open Circuit

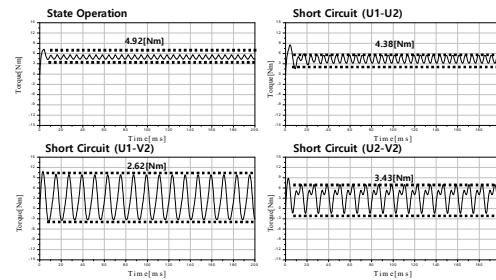


Fig. 8 Fault Torque @Phase-to-phase