

## 다상 영구자석 동기전동기의 고장특성 해석에 관한 연구

최세권, 조준석, 김주용, 정태욱  
경남대학교

### Faults Analysis and Dynamic Simulation Method for Poly-Phase PM Synchronous Motor

Se-Kwon Choi, Jun-Seok Cho, Ju-Yong Kim, Tae-Uk Jung  
Kyungnam University

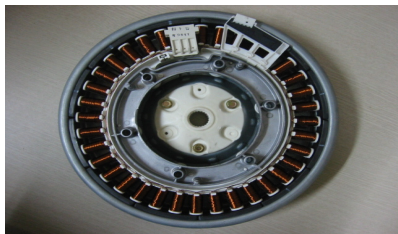
**Abstract** - This paper introduces major potential faults of Poly-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor and their simulation realization methods. The faults of Poly-Phase PM Synchronous Motor, generally, stator turn faults, demagnetizing field. Based on the derived expressions, Poly-Phase PM synchronous Motor simulation model, which is capable of representing stator turn faults, is implemented in Maxwell.

### 1. 서 론

최근 전동기의 설비 시스템이 대형화, 고비용화 되면서 전동기의 사후 보수에 대한 관심이 높아지고 있다. 따라서 미리 고장을 진단하거나 검출 할 수 있는 시스템 확보가 필요해지기 시작했다. 전동기의 결함을 분류하면 기계적 결함과 전기적 결함으로 나눌 수 있다. 기계적 결함은 축 굽힘, 질량불평형, 조임의 헐거움, 적열불량, 공진 등이 있으며, 전기적 결함하에는 공극편심, 회전자봉과손, 적층단락등이 있다. 고장이 생기는 원인을 보면 고장부분이 부하로 작용하여 전압의 불평형이 생기거나, 영구자석의 부분감자현상으로 인해 쇠교자속을 만들어 내지 못하기 때문에 유도기전력 불평형이 발생하고, 권선의 단락으로 인해 중성점의 상 불평형이 발생한다. 본 논문은 첫째로, 권선단락에 대해서 임의의 한상을 단락시켜 전압불평형 만들어 해석 하였고, 둘째로 회전자 부분의 부분감자특성에 대해서 자석의 B-H Curve의 감자곡선을 주어 해석하였고, 이런 고장현상에 대하여 시뮬레이션을 통하여 증명 하였다.

### 2. 다상 동기전동기 고장특성해석

전동기의 고장 해석을 위한 방법은 진동이나 소음특성을 이용하여 고장특성을 하는 경우 대한 논문이 나와 있지만, 비슷한 진동의 경우 정확한 고장의 원인을 찾기가 힘들다. 본 연구에서는 전기적 측면에서 각 상들의 전압 불평형, 부분감자특성에 의한 유도기전력 불평형 등을 이용하여 보다 정확한 고장진단을 하여 고장 부분을 검출 하는 것에 초점을 두었다. 아래의 그림 1은 실험에 사용한 동기 전동기의 실제 모델 형상이다.



〈그림 1〉 3상/6상 실제 동기전동기 모델

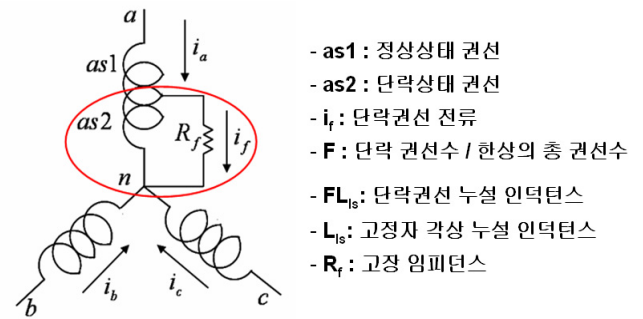
〈표 1〉 동기 전동기 설계사양

Parts	Item	Value
Phase	Number of Phase	6
	Number of poles	48
Magnet	Residual Flux Density	0.41-0.43T
	Number of coils	36
Coil	Number of turns	108
	Material of coil	Copper
	Material of rotor plate	SCP

### 3. 다상전동기 고장특성 모델링

#### 3.1 권선단락

고정자 권선의 단락에 의한 3상의 고장 회로의 구성은 아래의 그림 2과 같으며, 식 (1)의 전압방정식으로 나타낼 수 있다. 그림 2의 A상에 의한 권선을 단락에 의해 단락권선전류가 흐르게 되고, 중성점의 전위가 '영'이 아니게 된다.



〈그림 2〉 A상 고정자 권선단락 회로도

- as1 : 정상상태 권선
- as2 : 단락상태 권선
- i<sub>f</sub> : 단락권선 전류
- F : 단락 권선수 / 한상의 총 권선수
- FL<sub>s</sub> : 단락권선 누설 인덕턴스
- L<sub>s</sub> : 고정자 각상 누설 인덕턴스
- R<sub>f</sub> : 고장 임피던스

$$v_{sn} = r_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + \omega \frac{dL_s(\theta_r)}{d\theta_r} i_s + \omega_e \frac{d\lambda_{sr}(\theta_r)}{d\theta_r} \quad (1)$$

$$-F \begin{bmatrix} r_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_f + \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_r) \\ L_{ab}(\theta_r) \\ L_{ac}(\theta_r) \end{bmatrix} \frac{di_f}{dt} + \omega_e \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_r) \\ L_{ab}(\theta_r) \\ L_{ac}(\theta_r) \end{bmatrix} i_f$$

이는 유도된 각상의 전압방정식에 의해 표현 될 수 있으며, 여기서  $F = \frac{\text{고장권선수}}{\text{한상 총권선수}}$ ,  $i_f$  = 단락권선 고장전류를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} v_{sa1} + v_{sa2} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_r) & L_{ab}(\theta_r) & L_{ac}(\theta_r) \\ L_{ab}(\theta_r) & L_{bb}(\theta_r) & L_{bc}(\theta_r) \\ L_{ac}(\theta_r) & L_{bc}(\theta_r) & L_{cc}(\theta_r) \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$+ \omega_e \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_r) & L_{ab}(\theta_r) & L_{ac}(\theta_r) \\ L_{ab}(\theta_r) & L_{bb}(\theta_r) & L_{bc}(\theta_r) \\ L_{ac}(\theta_r) & L_{bc}(\theta_r) & L_{cc}(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \omega_e \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} \lambda_{ar}(\theta_r) \\ \lambda_{br}(\theta_r) \\ \lambda_{cr}(\theta_r) \end{bmatrix}$$

$$- F \left( \begin{bmatrix} r_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_f + \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_r) \\ L_{ab}(\theta_r) \\ L_{ac}(\theta_r) \end{bmatrix} \frac{di_f}{dt} + \omega_e \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_r) \\ L_{ab}(\theta_r) \\ L_{ac}(\theta_r) \end{bmatrix} i_f \right)$$

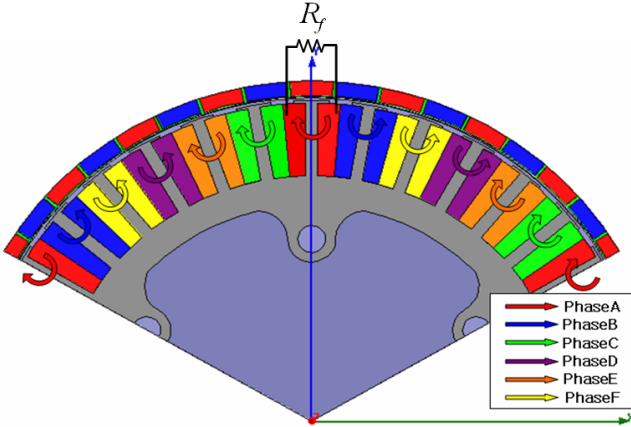
만약 고장이 발생하지 않는다면  $F=0$ 이 되어 수식적으로 정상 운전상태의 전압평형을 유지하며, 각상(상-중성점) 중성점전압  $v_{as} + v_{bs} + v_{cs} = 0$ 이 되므로 정상운전 하게 된다. 반대로 고장이 발생하게 되면 다음 식(3)과 같이 나타낸다.

$$v_{as} + v_{bs} + v_{cs} = -F \left[ r_s i_f + L_s \frac{di_f}{dt} \right] \quad (3)$$

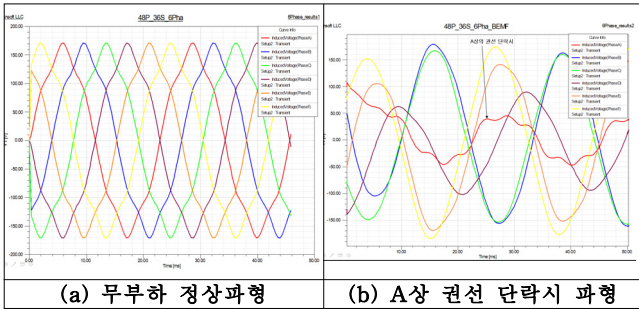
그림 3은 위의 식(3)에 의해 유도된 방정식을 바탕으로 모델링 하였다. 위 식(3)에서 보는 바와 같이 임의의 한상의 권선에 대하여 고장을 발생 시킨다. 즉,  $v_{as} + v_{bs} + v_{cs} \neq 0$  이므로, F의 값이 생기면서 중성점에서의 전압 불평형이 생기는 것이다.

그림 3은 6상 48극 36슬롯의 동기전동기를 나타낸다. 3상의 경

우는 집중권으로 설계 하는 것이 일반적 이지만, 6상 모델의 경우는 집중권으로 설계하기가 어려워 분포권 방식을 이용하여 권선을 배치하였다. 아래의 그림 3에서 보듯이 임의의 한 상인 A 상에 고장을 주어 불평형 전압을 만들어 해석한 결과 그림 4의 파형을 보여준다. 그림 4의 (a)에서는 6상 무부하 상태의 BEMF 파형을 나타내고 있으며, 고장 발생시 (b)의 출력파형처럼 A상의 파형이 심하게 떨리는 것을 볼 수 있다.



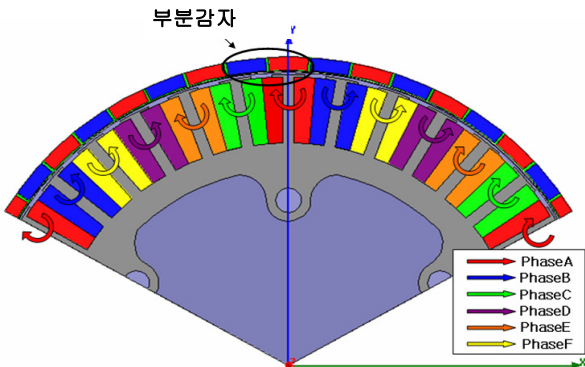
〈그림 3〉 고정자 권선의 단락특성 모델링



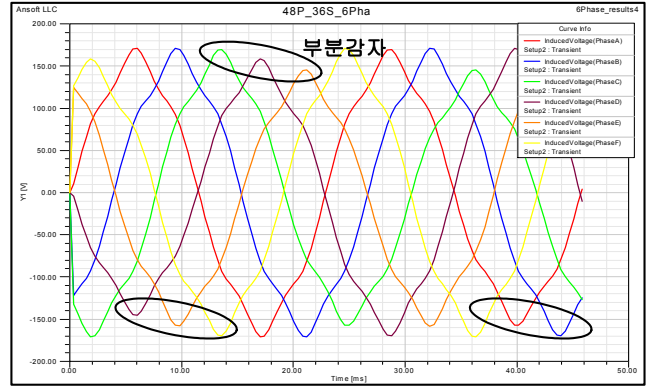
〈그림 4〉 6상 고정자 권선단락 특성에 의한 출력파형

### 3.2 회전자 영구자석의 부분감자

영구자석의 감자현상에는 크게 2가지가 있다. 첫 번째는 쇠교 자속의 방향과 반대방향으로 큰 자속이 생기면 영구자석은 자력을 회복하지 못하고 감자된다. 두 번째의 경우는 온도에 의한 감자현상이 있다. 즉, 일정온도 이상으로 올라가게 되면 Knee Point에서 본래의 자력을 잃어버리게 되어 영구자석의 의한 쇠교 자속을 만들어 낼 수 없기 때문에 역기전력의 불평형이 발생한다. 논문에서 사용한 영구자석의 경우 온도특성에 민감하기 때문에 감자현상을 관찰하기에 적합하다. 그림 5는 회전자 자석의 부분감자 특성을 시뮬레이션 하기 위한 모델이다.



〈그림 5〉 회전자 자석의 부분감자 특성 모델링



〈그림 6〉 회전자 자석의 부분감자현상에 의한 출력파형

## 4. 결 론

다상 영구자석 동기전동기의 고장진단은 복잡하여 현재도 계속 연구되고 있는 과제이다. 본 연구에서는 유한요소법을 사용하여 다상 동기전동기의 고장 진단을 제안하였다. 고정자 권선에 임의의 한상이 단락되는 경우 권선에 고장 전류가 유입되어 단락부분에 순환하게 된다. 이러한 현상을 이용하여 고정자 권선의 고장 정도를 모의 하여 시뮬레이션 하여 특징을 분석하였다. 6상전동기의 고장에 대하여 시뮬레이션한 결과 권선단락특성과, 영구자석의 부분감자현상에 대하여 고장이 검출됨을 증명하였다. 실제 전동기에 고장을 주어 모의실험을 통해 해석한 결과와 비교하여 볼 예정이며, 보다 안정적이고, 정확한 고장검출법을 연구할 예정이다.

## [참 고 문 헌]

[1] 손도, 이석희, 홍경표, "Faults Analysis and Dynamic Simulation method for Interior PM Synchronous Motor", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, Vol. B, pp.874 - 875, July, 2007.  
 [2] Youngkook Lee and Thomas G. Habetler, "A Phase Variable Simulation Model for Interior PM Synchronous Motor Drives with Stator Turn Faults", IEEE Trans, vol.3. No. 12, pp. 1074 - 1079, aug. 2006.