

## 등가회로를 이용한 100kW급 동기전동기 회전자와 착자 전류 산정

**이정종**, 전찬기, 유세현, 정인성  
전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터

### Magnetizing Current Analysis of 100kW-class Permanent Magnet Synchronous Motor Rotor Using Equivalent Circuit

Jeong-Jong Lee\*, Chan-Gi Jeon, Se-Hyun Rhyu, In-Soung Jung  
Intelligent Mechatronics Research Center, Korea Electronics Technology Institute

**Abstract** - 본 논문에서는 대용량 착자요크의 설계과정에서 최대입력 전류의 크기를 산정하기 위하여 해석적인 방법을 이용하여 산정하였다. 착자요크의 등가회로로부터 회로방정식을 도출하고 2차 미분방정식으로 표현하여 입력전류를 산정하였다. 산정된 입력전류는 회로해석 툴 및 유한요소해석을 이용한 상용소프트웨어와 비교하여 해석방법의 타당성을 검증하였다.

#### 1. 서 론

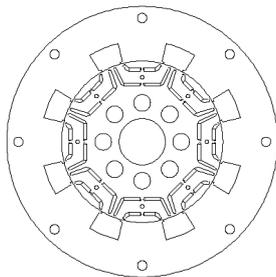
착자기는 자성을 띠지 않는 자석소재에 강한 자계를 가하여 소재에 자기적 성질을 유지하는 장치를 일컫는다. 착자기는 착자회로 및 착자요크(yoke)로 이루어지며, 착자요크는 회전자의 형상에 따라서 변경되고, 착자기 전류의 크기는 영구자석의 종류 및 착자요크의 형상에 따라서 결정 하여야 한다. 발생하는 자계의 세기는 전류의 크기에 비례하지만 착자요크 철심의 자기 포화현상으로 매우 강한 비선형 특성을 나타낸다.

본 논문에서는 순간적으로 매우 강한 대전류를 생성시키기 위한 착자기 회로에서 착자 전류 및 충전된 전압이 방전되는 시간 및 착자 커패시턴스를 산정하기 위한 회로 해석 방법을 연구하였다. 착자기에서 주요 설계값인 전류 산정하기 위하여 입력전압, 커패시턴스, 저항, 인덕턴스를 이용하여 2차 회로의 과도응답 해석으로 나타내는 방법을 연구하였으며, 타 회로 해석 툴과 비교하여 해석 방법의 타당성을 검토하였다.

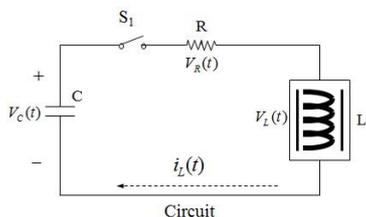
#### 2. 본 론

##### 2.1 착자기 회로 해석

그림 1은 100kW급 동기전동기의 회전자와 영구자석 착자를 위한 착자기의 형상을 보여준다. 그림 2는 착자기 회로의 모습을 보여준다. 착자기 회로의 해석은 2차 회로의 완전응답 해석방법을 이용하여 해석한다. 2차회로의 완전응답은 정상상태응답해석, 초기조건도출, 미분방정식 도출, 주파수 및 감쇠비 도출, 일반해 작성 및 최종 식 도출의 순서로 진행된다.



〈그림 1〉 100kW 회전자 및 착자 요크



〈그림 2〉 착자기 등가회로

〈표 1〉 100kW 착자기 주요 사양

항목	Value	항목	Value
입력전압 [V]	6000	극수	8
커패시터 [uF]	5000	적층길이 [mm]	200
저항 [Ohm]	0.54	요크내경 [mm]	174
인덕턴스 [mH]	1.046	요크외경 [mm]	292

정상상태는 시간  $t$ 가 0일 때와  $\infty$ 일 때로 구분되며  $t$ 가 0일 때, 즉 초기조건 전압은 커패시터 충전전압과 같고 전류는 0이다. 또한  $t$ 가  $\infty$ 일 때, 즉 최종조건에서의 전압은 0이고 전류 또한 0이다. 식 (3)을 사용하여 초기 전류 변화량 나타낼 수 있다. 여기서  $V_L(t)$ ,  $V_C(0)$ ,  $i_L(t)$ 는 각각 시간에 따른 인덕터에 걸리는 전압, 시간이 0일 때 커패시터에 걸리는 전압, 시간에 따라 인덕터에 흐르는 전류를 나타낸 것이다.

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \tag{1}$$

$$V_C(0) + Ri_L + L \frac{di_L(0)}{dt} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{di_L(0)}{dt} = \frac{V_C(0)}{L} \tag{3}$$

그림 2에 키르히호프의 전압법칙(KVL)을 적용하여 식 (4)를 얻는다. 식 (5)는 커패시터 양단에 걸리는 전압에 관한 관계식이다. 식 (4)에 식 (5)를 대입하면 식 (6)이 도출되고 식 (7)을 식 (6)에 대입하면 2차 상미분 방정식의 형태로 식 (8)이 도출된다.

$$V_C(0) + Ri_L + L \frac{di_L(0)}{dt} = 0 \tag{4}$$

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int i_L(t) dt \tag{5}$$

$$\frac{1}{C} \int i_L(t) dt + Ri_L(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} = 0 \tag{6}$$

$$i_L(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt} \tag{7}$$

$$LC \frac{d^2 i_L(t)}{dt^2} + RC \frac{di_L(t)}{dt} + i_L(t) = 0 \tag{8}$$

2차 상미분 방정식의 특성을 나타내는 상수는 진동주파수  $\omega_n$ 과 감쇠비  $\zeta$ 로서 (9)와 (10)의 식을 사용하여 나타낼 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{9}$$

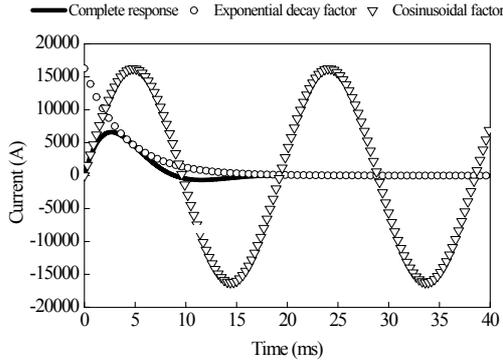
$$\zeta = \frac{R}{C} \sqrt{\frac{C}{L}} \tag{10}$$

식 (13)은 자연응답과 강제응답의 합을 나타낸 식으로 전류의 완전응답을 나타낼 수 있다. 여기서  $x_N(t)$ ,  $x_F(t)$ 는 각각 자연응답과 강제응답을 나타낸 것이다. 강제응답은 시간  $t$ 이  $\infty$ 일 때 이므로 0이다.

$$x(t) = x_N(t) + x_F(t) \quad (11)$$

$$x(t) = (\alpha_1 e^{(-\zeta\omega_n + j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})t} + \alpha_2 e^{(-\zeta\omega_n - j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})t}) + x(\infty) \quad (12)$$

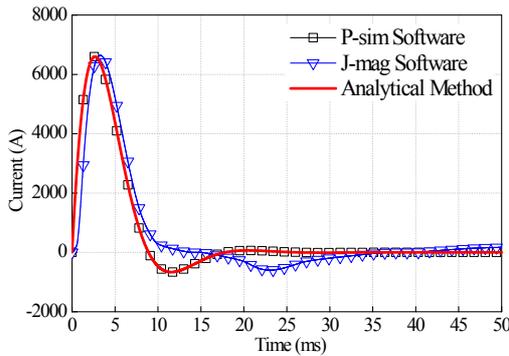
$$i_L(t) = \alpha_1 e^{(-\zeta\omega_n + j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})t} + \alpha_2 e^{(-\zeta\omega_n - j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})t} \quad (13)$$



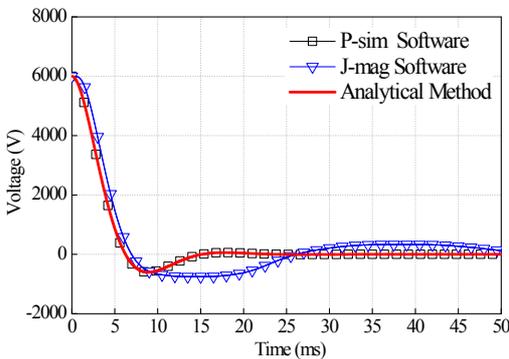
<그림 3> 착자기 회로의 완전응답

그림 3은 착자기 회로의 완전응답이 감쇠응답계수와 코사인 계수의 합성으로 인한 응답이라는 것을 보여준다. 감쇠응답계수는 식 (10)의 감쇠비를 사용하여 나타낼 수 있고, 코사인 계수는 식 (9)를 이용하여 나타낼 수 있다. 그리고 식 (13)를 통해 시간에 따른 전류를 구할 수 있으므로 식 (14)을 사용하여 시간에 따른 전압을 구할 수 있다. 여기서  $V_{co}(t)$ 는 캐패시터에서 방전되는 전압을 시간에 따라 나타낸 것이다.

$$V_{co}(t) = V_c(t) - \frac{1}{C} \int i_L(t) dt \quad (14)$$



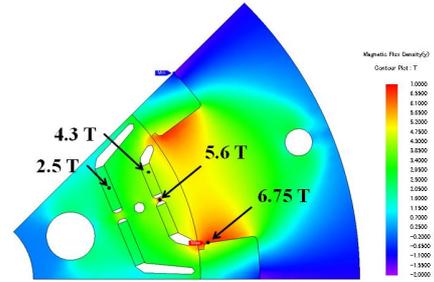
<그림 4> 전류 비교



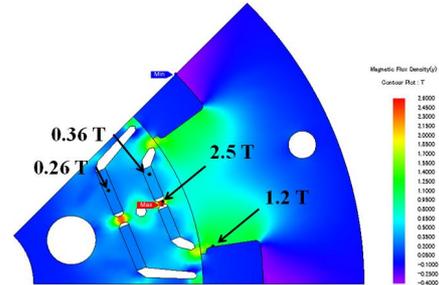
<그림 5> 전압 비교

## 2.2 해석 결과 비교

그림 4는 식 (13)을 이용한 시간에 따른 흐르는 전류이고 그림 5는 식 (14)를 이용한 시간에 따른 전압의 방전을 나타낸 그림이다. 수식을 이용한 해석의 타당성을 검증하기 위해 해석 프로그램과 비교를 해보았다. 해석에 사용된 프로그램은 회로해석 Software인 P-sim과 FEM Tool인 J-mag이다. 그림 6은 그림 4의 최대 전류 지점에서의 자속밀도를 나타낸 그림이다. 그림에서 Magnet 부분은 각각 4.3 T와 2.5 T를 나타내며, 착자요크 부분이 6.75 T로 자속밀도 최대점으로 나타나고 있다. 그림 7은 착자 진행 후 안정상태일 때의 자속밀도를 나타낸 그림으로써 그림 4에서 50ms일 때의 자속밀도를 나타낸 그림이다.



<그림 6> 최대 전류 지점에서의 자속밀도



<그림 7> 안정상태 일 때의 자속밀도

## 3. 결론

본 논문에서는 FEM Tool을 사용하지 않고 착자기의 전압 및 전류를 해석하는 방법을 제안하였다. Analytical Method과 FEM Tool을 비교했을 때, 전류의 최대치는 동일하므로, 해석 시간의 단축을 고려한다면 활용 가능성이 높은 방법이라고 판단된다. 현재 Analytical Method 방법은 비선형적인 자계 포화특성을 고려하지 못했기 때문에 FEM 해석과 차이가 있는 것으로 판단된다. 추후 비선형적인 자계 포화특성을 고려하여 2차회로의 과도응답을 해석하는 방법의 연구가 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(No. 20132020102550)

### [참고 문헌]

- [1] 홍정표, 박관수, 이항범, 배동진, 한승업, 최홍순, 주관정, “다극착자기에서 착자전류가 잔류자속밀도에 미치는 영향”, 한국자기학회논문지, pp.145-149, 1992
- [2] 강동우, 김영관, 김광립, “자속집중형 영구자석 동기전동기의 착자에 관한 연구”, 2013년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 하계학술대회 논문집, pp.883-884, 2013
- [3] 김원호, 박성혁, 김성일, 임성택, “불가역 감자와 조립후 착자를 고려한 Bridged-Spoke PMSM의 회전자 설계”, 2014년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 하계학술대회 논문집, pp.669-670, 2014