

유도 전동기의 고정자 권선 사고에 대한 모델링 방법

남 순열 홍 정기 박 종근
 호성 중공업 연구소 서울대학교

Modeling Method for Induction Machines With Stator Winding Faults

Soon-Ryul Nam Jung-Gi Hong Jong-Keun Park
 Hyosung Power&Industrial Systems R&D Center Seoul National Univ.

Abstract - 유도 전동기 보호를 위한 계전기 개발을 위해서는 유도 전동기의 내부 사고에 대한 모델링이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 유도 전동기의 내부사고 중에서 고정자 권선의 지락 사고에 대한 모델링 방법을 제시하였으며 이를 MATLAB을 이용하여 모의하였다. 제시한 모델링 방법을 이용하여 유도 전동기의 기동 현상을 모의하였으며 이를 EMTP에서 모의한 기동 현상과의 비교를 통하여 제시한 모델링 방법의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

전력 기기 보호를 위한 계전기 개발을 위해서는 이에 대한 모델링이 필수적이다. 대표적인 전력 기기로는 변압기, 동기기 및 유도기 등이 있으며, 변압기 내부 사고에 대한 모델링은 국내외에서 상당 부분 진행되었으나 동기기 및 유도기의 내부 사고에 대한 모델링은 아직 초기 단계에 있다.

본 논문에서는 유도 전동기의 고정자 권선 지락 사고에 대한 모델링 방법을 제시하였으며 이를 MATLAB을 이용하여 모의하였다.

2. 본 론

2.1 고정자 권선의 지락 사고 모델링

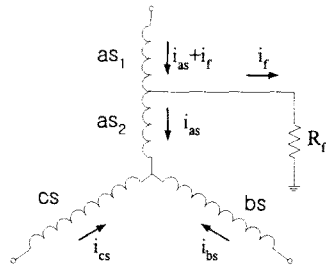


그림 1. 고정자 권선의 지락 사고

그림 1은 a 상 고정자 권선에 지락 사고가 발생한 경우를 보여주고 있다. 정상 상태에서는 사고 저항 Rf를 ∞로 설정한 후 사고 시점에 원하는 값으로 변경함으로써 고정자 권선의 지락 사고를 모의할 수 있다.

고정자 권선 및 회전자 권선의 전압, 전류는 다음 관계식을 만족한다.

$$v_s^E = R_s^E i_s^E + \frac{d\lambda_s^E}{dt} \quad (1)$$

$$v_r = 0 = R_r i_r + \frac{d\lambda_r^E}{dt} \quad (2)$$

여기서,

$$a_{s1} : a_{s2} = (1 - u) : u$$

$$v_s^E = [v_{as1} \ v_{as2} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T$$

$$i_s^E = [(i_{as} + i_f) \ i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T$$

$$i_r = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T$$

$$\lambda_s^E = [\lambda_{as1} \ \lambda_{as2} \ \lambda_{bs} \ \lambda_{cs}]^T = L_{ss}^E i_s^E + L_{sr}^E i_r$$

$$\lambda_r^E = [\lambda_{ar} \ \lambda_{br} \ \lambda_{cr}]^T = L_{rs}^E i_s^E + L_{rr} i_r$$

$$R_s^E = r_s \cdot \text{diag}[(1 - \mu) \ \mu \ 1 \ 1]$$

$$R_r = r_r \cdot \text{diag}[1 \ 1 \ 1]$$

$$L_{ss}^E = L_s^E + L_{ms}^E$$

$$L_{ls}^E = l_s \cdot \text{diag}[(1 - \mu) \ \mu \ 1 \ 1]$$

$$L_{ms}^E =$$

$$l_{ms} \cdot \begin{bmatrix} (1-u)^2 u(1-u) - \frac{1-u}{2} & -\frac{1-u}{2} & & \\ u(1-u) & u^2 & -\frac{u}{2} & -\frac{u}{2} \\ -\frac{1-u}{2} & -\frac{u}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1-u}{2} & -\frac{u}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$L_{sr}^E = (L_{rs}^E)^T =$$

$$l_{ms} \cdot \begin{bmatrix} (1-u)\cos(\theta) & (1-u)\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & (1-u)\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ u \cdot \cos(\theta) & u \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & u \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} l_{lr} + l_{ms} & -\frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} \\ -\frac{l_{ms}}{2} & l_{lr} + l_{ms} & -\frac{l_{ms}}{2} \\ -\frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} & l_{lr} + l_{ms} \end{bmatrix}$$

식 (1)에서는 고정자 권선의 전압을 기준으로 표현되어 있으나 실제 모의를 위해서는 상전압을 기준으로 표현되어야 한다. 이를 위해서 중성점 전압 vn을 이용하여 정리를 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_s = r_s i_s + \frac{d\lambda_s}{dt} + i_f \cdot [r_{s1} \ 0 \ 0]^T + v_n i_n \quad (3)$$

$$0 = r_r i_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \quad (4)$$

여기서,

$$r_{s1} = (1 - u) \cdot r_s$$

$$v_s = [v_a \ v_b \ v_c]^T$$

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_s &= [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T \\ \mathbf{i}_n &= \text{diag}[1 \ 1 \ 1] \\ \mathbf{i}_r &= [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T \\ \mathbf{A}_s &= [\lambda_{as} \ \lambda_{bs} \ \lambda_{cs}]^T = [(\lambda_{as1} + \lambda_{as2}) \ \lambda_{bs} \ \lambda_{cs}]^T \\ &= \mathbf{L}_{ss}\mathbf{I}_s + \mathbf{L}_{sr}\mathbf{I}_r + i_f \cdot \mathbf{A}_1 \end{aligned}$$

$$\mathbf{A}_r = [\lambda_{ar} \ \lambda_{br} \ \lambda_{cr}]^T = \mathbf{L}_{rs}\mathbf{I}_s + \mathbf{L}_{rr}\mathbf{I}_r + i_f \cdot \mathbf{A}_2$$

$$\mathbf{L}_{ss} = \begin{bmatrix} l_{is} + l_{ms} - \frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} \\ -\frac{l_{is}}{2} & l_{is} + l_{ms} - \frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} \\ -\frac{l_{is}}{2} & -\frac{l_{is}}{2} & l_{is} + l_{ms} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{sr} = \mathbf{L}_{rs}^T$$

$$= l_m \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_1 = (1-u) \cdot [l_{ms} - \frac{l_{ms}}{2} \ -\frac{l_{ms}}{2}]^T$$

$$\mathbf{A}_2 = (1-u)l_{ms}[\cos(\theta) \ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})]^T$$

또한 고정자 권선과 회전자 권선의 전류는 각각 식 (5)와 식 (6)의 관계식을 만족하므로,

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (5)$$

$$i_{ar} + i_{br} + i_{cr} = 0 \quad (6)$$

식 (3)과 식 (5), 식 (4)와 식 (6)을 정리하면 각각 식 (7)과 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{V}_s^D = \mathbf{R}_s^D \mathbf{I}_s + \frac{d\mathbf{A}_s^D}{dt} + i_f \cdot [r_{s1} \ 0 \ -r_{s1}]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_s^D = \mathbf{L}_{ss}^D \mathbf{I}_s + \mathbf{L}_{sr}^D \mathbf{I}_r + i_f \cdot \mathbf{A}_1^D \quad (8)$$

여기서,

$$\mathbf{V}_s^D = \begin{bmatrix} v_a - v_b \\ v_b - v_c \\ v_c - v_a \end{bmatrix}, \mathbf{R}_s^D = \begin{bmatrix} r_s - r_s & 0 \\ 0 & r_s & -r_s \\ 0 & r_s & 2r_s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_s^D = \begin{bmatrix} \lambda_{as} - \lambda_{bs} \\ \lambda_{bs} - \lambda_{cs} \\ \lambda_{cs} - \lambda_{as} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{ss}^D =$$

$$\begin{bmatrix} L_{ss}^{11} - L_{ss}^{21} & L_{ss}^{12} - L_{ss}^{22} & L_{ss}^{13} - L_{ss}^{23} \\ L_{ss}^{21} - L_{ss}^{31} & L_{ss}^{22} - L_{ss}^{32} & L_{ss}^{23} - L_{ss}^{33} \\ 0 & L_{ss}^{11} + L_{ss}^{32} - L_{ss}^{12} - L_{ss}^{31} & L_{ss}^{11} + L_{ss}^{33} - L_{ss}^{13} - L_{ss}^{31} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{sr}^D =$$

$$\begin{bmatrix} L_{sr}^{11} - L_{sr}^{21} & L_{sr}^{12} - L_{sr}^{22} & L_{sr}^{13} - L_{sr}^{23} \\ L_{sr}^{21} - L_{sr}^{31} & L_{sr}^{22} - L_{sr}^{32} & L_{sr}^{23} - L_{sr}^{33} \\ 0 & L_{sr}^{11} + L_{sr}^{32} - L_{sr}^{12} - L_{sr}^{31} & L_{sr}^{11} + L_{sr}^{33} - L_{sr}^{13} - L_{sr}^{31} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_1^D = (1-u) \cdot [(l_{is} + \frac{3}{2}l_{ms}) \ 0 \ -(l_{is} + \frac{3}{2}l_{ms})]^T$$

사고 전류 i_f 는 식 (9)에 의해서 구할 수 있으며,

$$i_f = \frac{v_f}{R_f} = \frac{v_a - v_{as1}}{R_f} \quad (9)$$

T_e , ω 와 θ 는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$T_e = \frac{\text{Pole}}{2} \cdot I_s^E \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta} I_r \quad (10)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L) \quad (11)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = w \quad (12)$$

이상의 관계식을 이용하여 고정자 권선의 지락 사고를 모의할 수 있으며 그림 2는 이에 대한 흐름도를 보여 주고 있다.

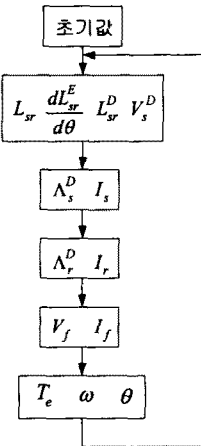


그림 2. 고정자 권선의 지락 사고 모의를 위한 흐름도

2.2 모 의

제안된 모델링 방법의 타당성을 검증하기 위하여 EMTP에서 모의한 기동 현상과 제안된 모델링 방법에 의해 모의한 기동 현상을 비교한다. 이를 위해 미국 Minnesota 대학의 EMTP 교육 강좌 교재에 수록된 사례를 이용하여 모의 조건은 다음과 같다.

○ 전동기 정격: 3마력(2238W), 4극, 60Hz, 220V, 농형

○ 파라미터:

$$r_s = 0.435 \Omega, r_r = 0.435 \Omega, l_{ms} = 22.733 \Omega,$$

$$l_{is} = 0.764 \Omega, l_{fr} = 0.764 \Omega, J = 0.089 \text{ kgm}^2$$

○ 부하: 전동기를 무부하 상태에서 기동한 후 0.8초에 $T_m = 11.9 \text{ Nm}$ 인 부하 연결

그림 3은 EMTP를 이용하여 유도 전동기의 기동 현상을 모의한 결과를 보여 주고 있으며 그림 4는 제안된 모델링 방법을 Matlab으로 구현하여 모의한 결과를 보여 주고 있다. 약간의 차이는 있으나 거의 동일한 결과를 보여 주고 있음을 알 수 있다.

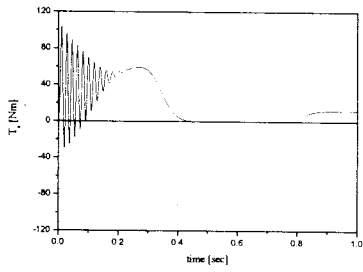
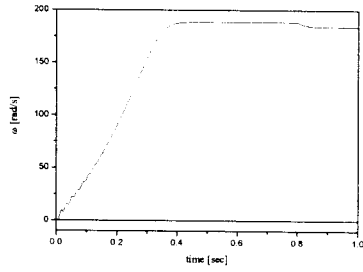
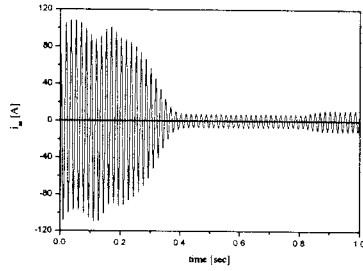


그림 3. EMTP에 의한 모의 결과

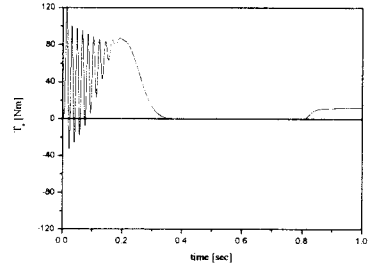
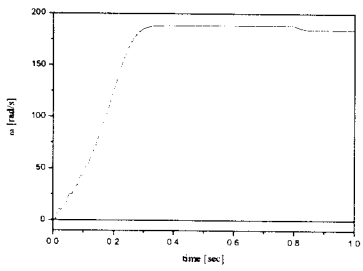
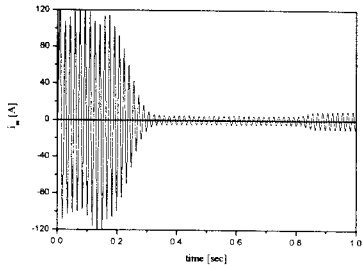
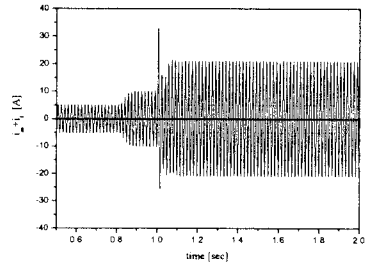
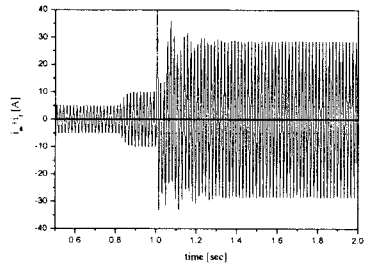


그림 4. 제안된 모델링에 의한 모의 결과

그림 5는 0.8초에 부하를 투입한 후 1.0 초에 $u=0.5$ 인 a상 권선의 위치에서 사고 저항 R_f 가 20Ω 인 경우와 10Ω 인 경우의 모의 결과를 보여 주고 있다.



(a) $R_f = 20\Omega$



(b) $R_f = 10\Omega$

그림 5. 고정자 권선의 지락 사고 모의 결과

3. 결 론

본 논문에서는 유도 전동기의 고정자 권선 지락 사고에 대한 모델링 방법을 제시하였으며 이를 MATLAB을 이용하여 모의하였다. 유도 전동기의 기동 현상에 대한 EMTP 모의 결과와 제시한 모델링 방법에 의한 모의 결과를 비교하여 제시한 모델링 방법의 타당성을 검증하였으며 권선의 지락 사고에 대한 모의 결과를 나타내었다. 제시한 모델링 방법은 유도 전동기 보호용 계전기의 개발에 필요한 데이터를 생성하는데 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

[1] Xiaogang Luo 외 4인, "Multiple Coupled Circuit Modeling of Induction Machines," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 31, No. 2, 311~318, 1995
 [2] Tallam R. M., 외 2인, "Transient Model for Induction Machines with Stator Winding Turn Faults," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 38, No. 3, 632~637, 2002