

Design of Linear Transverse Flux Machine with Permanent Magnet Using Equivalent Magnetic Circuit Network Method

Sungin Jeong*

Department of Electrical Engineering, Gwangju University, Gwangju 61743, Korea

(Received 2 June 2025, Received in final form 29 September 2025, Accepted 1 October 2025)

There are many achievements of study on various electrical machines such as brush type, induction type and reluctance type, and it is on-going study. Recently, the demand for fast and accurate designs of the transverse flux machine is increasing due to the advantage of more than three times compared to the conventional machine and the expansion of the applications. Applying the linear machine to the production process of semiconductors by the expansion of the AI industry, it can achieve higher output. However, there is a disadvantage that it is difficult to design and takes a long time to analyze by finite elements method due to the complexity of the structure. This study proved the validity of the design process by analyzing and designing the equivalence magnetic circuit network method by 2D and 3D for the high reliability and the quick design of the linear Transverse Flux Machine with Permanent Magnet.

Keywords : equivalent magnetic circuit network, leakage reluctance, magnetic energy, transverse flux machine

등가자기회로방법을 이용한 영구자석형 횡자속 선형 전기기기의 설계 방법에 관한 연구

정성인*

광주대학교 전기공학과, 광주광역시 남구 효덕로 277, 61743

(2025년 6월 2일 받음, 2025년 9월 29일 최종수정본 받음, 2025년 10월 1일 게재확정)

기존 직류기, 유도기, 릴럭턴스 형태의 다양한 전기기기에 관한 많은 연구 업적과 진행이 계속되고 있다. 최근 종래의 전기기기에 비해 3배 이상의 고출력의 장점으로 인한 관심 증가와 응용 분야의 확대에 따른 횡자속 전기기기에 관한 빠르고 정확한 설계에 관한 수요가 증가하고 있다. 특히 인공지능 산업의 확대에 따른 반도체 수요 증가로 인해 생산공정의 설비에 횡자속 기기를 선형기에 적용하면 동일 조건 대비 큰 출력을 얻을 수 있다. 그러나 3차원 비대칭 구조의 특징을 가진 횡자속 기기는 구조의 복잡성으로 인해 설계 과정의 어려움과 유한요소 분석 시 해석시간이 오래 걸린다는 단점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 영구자석이 매입된 횡자속 선형 전기기기의 높은 신뢰성과 빠른 설계를 위한 등가자기회로방법을 2차원 및 3차원으로 분석과 설계를 수행함으로써 설계 과정의 타당성을 입증하였다.

주제어 : 등가자기회로망, 누설 릴럭턴스, 자기 에너지, 횡자속 기기

I. 서 론

에너지 변환 장치로서 회전 및 직선 운동의 필요성은 날이 갈수록 산업분야에서 급속히 증대되고 있다. 이러한 에너지 변환기 중, 현재 반도체 제조산업 및 생산 자동화 공정에서 회전 운동을 직선 운동으로 변환하는 선형 운동의 필요성과 수요가 증가하고 있다. 회전 운동에 의한 시스템은 기계부품

수의 증가와 이에 따른 기계적 손실 발생, 복잡한 구조와 낮은 효율 등으로 동작 속도의 제한과 프레임의 제한을 초래한다. 반면 선형 운동은 회전 운동의 단점을 극복한 메커니즘과 시스템으로 직선으로 이동하는 반도체 제조 생산 공정에서 매우 적합하다[1]. 직류기, 유도기 및 릴럭턴스 형태의 회전운동을 직선으로 운동하는 기기로 변환 가능하지만, 이러한 전동기들은 기계적 스위치 존재에 따른 유지보수, 구조적 한

계에 따른 효율 상승 억제, 소음 및 진동 발생 등으로 선형기로 적용하기에는 단점이 존재한다. 본 연구에서는 이러한 회전운동기기 대비 3배 이상[2]의 고효율 및 고효율의 횡자속 선형기의 제안과 설계 방법을 제안함으로써 생산 공정의 효율 증가와 이로 인한 생산비용의 절감을 기대할 수 있다.

II. 횡자속 선형기

선형 운동기기의 유형을 분류하는 여러 가지 방법 중에서 한가지 방법은 자속의 방향에 따라 분류하는 것이다. 이는 종방향 자속 선형기와 횡자속 선형기의 구분이다. 종방향 자속 선형기는 자속의 방향과 이동자의 움직임이 같은 방향이고, 횡자속 선형기는 자속의 방향이 이동자의 운동방향과 직교한다. 즉, 인가 전류의 방향은 종자속 선형기의 경우 이동자의 방향과 수직인 반면, 횡자속 선형기는 이동자의 방향과 동일함을 의미한다.

종방향 자속 선형기와 비교하여 횡자속 선형기의 특징은 다

음과 같다.

- 극 수의 증가는 극 당 기자력을 감소시키지 않는다.
- 자속 형상과 코일 부분은 서로 영향을 주지 않으면서 설계에 있어서 자유롭다.
- 매우 간단한 전기자 코일이 사용되며, 총 도체의 길이는 상대적으로 짧다.
- 횡자속 선형기의 상은 자기적으로 독립이며, 이러한 구조는 제어를 쉽게 할 수 있다.

일반적인 성층 철심 코어를 통한 제작 측면에서 횡자속 선형기는 3차원 구조로 복잡하고 제작 비용이 상대적으로 고가이므로 SMC(Soft Magnetic Composite) 재질 사용을 통해 제작 비용 절감과 생산 효과를 증대할 수 있다[3].

본 연구에서는 영구자석 매입 형태의 횡자속 선형기의 설계 방법과 결과를 비교·분석하였다. Fig. 1에서와 같이, 누설 성분을 고려한 빠르고 정확한 2차원 및 3차원 등가자기회로법을 이용한 설계 방법과 분석 결과를 통해 영구자석형 횡자속 선형기 설계과정의 타당성을 검증하였다.

1. 제안 토폴로지

Fig. 2에서 나타낸 바와 같이, 본 연구에서 제안하는 영구자석 횡자속 선형기는 고정자가 상부와 하부에 위치하고, 이들 사이의 중간에 영구자석 이동자가 삽입된 형태이다. U자형 고정자 철심 코어가 상·하부 서로 한 극만큼 비정렬되어 있으며, 자속 경로의 집중화와 극대화를 위하여 이동자는 철심 코어 사이에 이동방향으로 자화된 한 극의 영구자석이 교대로 삽입되어 있다. 특히 성층된 U자형 고정자 철심 코어

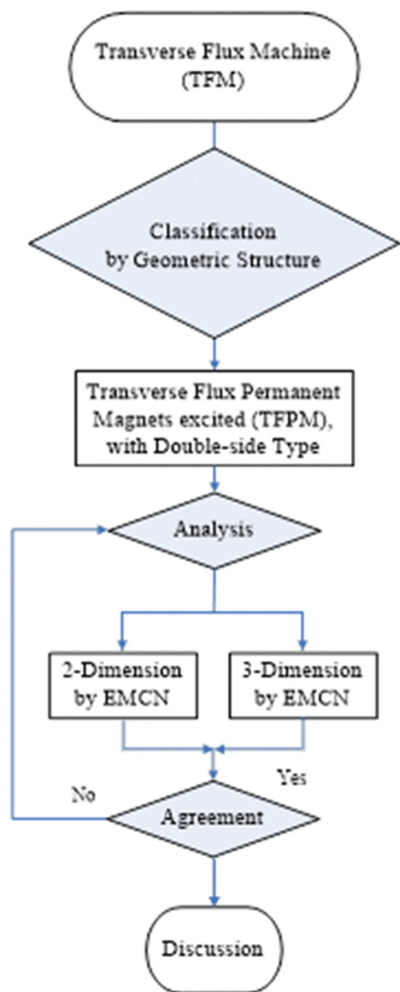


Fig. 1. (Color online) Analysis process.

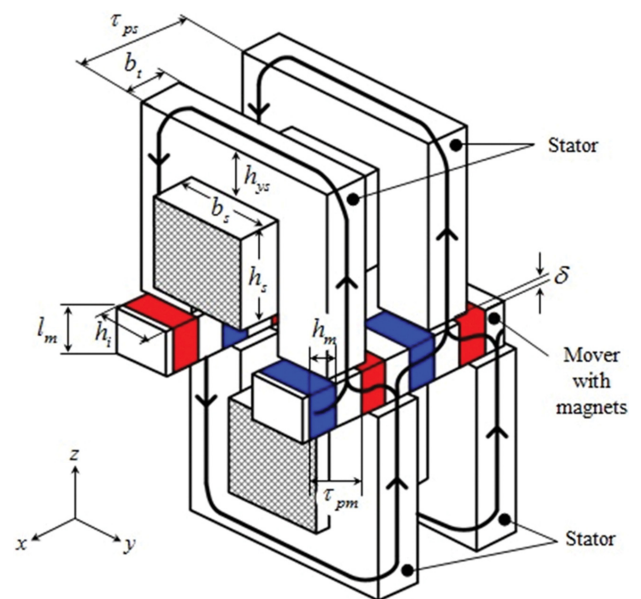


Fig. 2. (Color online) Double-sided Linear Transverse Flux Machine (LTFM) with Permanent Magnet (PM).

사이에는 동작 시 발생하는 열을 효과적으로 소산하기 위해 알루미늄이 순차적으로 구성된다. 본 토폴로지는 고정자가 전기적으로 180° 위치한다.

본 연구에서는 윗면과 아래면에 두개의 전기자가 한 치만큼 어긋난 형태로 위치하고, 그 사이에 영구자석과 철 코어가 교대로 장착된 이동자 형태의 양면 토폴로지의 영구자석형 횡자속 선형기의 설계 방법을 제안한다.

상·하부 2중 고정자 사이에 위치한 이동자는 영구자석과 철심의 강자성체가 번갈아 구성되어 힘 생성에 효과적이다. 또한 이동자의 한편은 N극이면, 반대쪽 이동자는 S극의 반대칭 구조로 전체 추력을 생성한다. 즉, 이동자 N극의 영구자석에서 발생된 자속은 이동자 철심을 통하여 고정자 요크를 교차하여 반대쪽 이동자 S극으로 연결된 자속 경로를 지나게 된다.

2. 힘과 에너지를 이용한 수학적 모델링

횡자속 선형 전기기기의 힘 계산은 암페어의 법칙, 자기 텐서 및 자기 에너지의 3가지 방법에 의해 구할 수 있다. 이 중에서 자기 텐서에 의한 방법은 자기장의 국부적 분포를 필요로 하며, 해석적 계산에서는 매우 복잡하고 해석 시간의 소요 등으로 사용이 드물다[4]. 본 연구에서는 횡자속 선형 전기기기 시스템의 자기 에너지를 이용한 변위와 힘 밀도 계산을 통한 설계 방법의 제안과 특성을 고찰한다.

Fig. 3은 횡자속 선형 전기기기 시스템의 에너지를 이용한 힘 계산을 위한 모델링 방법을 나타낸다.

$$\delta W = \delta A + \delta W_m \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \delta W &= VI dt = Id\psi \\ \delta A &= Fds \end{aligned} \quad (2)$$

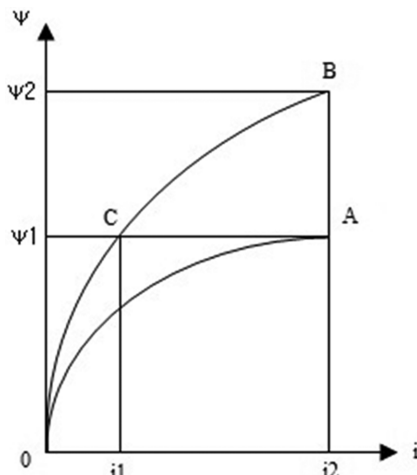


Fig. 3. Magnetic energy.

을 나타낸다.

$$\delta W_m = d \int_0^\psi id\psi = d[I\psi - \int_0^I \psi di] \quad (3)$$

$$F = I \frac{d\psi}{ds} - \frac{d}{ds} \int_0^\psi id\psi = I \frac{d\psi}{ds} - \frac{d}{ds} [I\psi - \int_0^I \psi di] = -\psi \frac{dI}{ds} + \frac{d}{ds} \int_0^I \psi di \quad (4)$$

전류가 일정하면, 식(4)는 다음과 같이 간략할 수 있다.

$$F = \frac{d}{dt} \int_0^I \psi di = \frac{dW_{cm}}{ds} \quad (5)$$

자속이 일정하면,

$$F = - \frac{d}{dt} \int_0^\psi id\psi = - \frac{dW_m}{ds} \quad (6)$$

III. 등가자기회로방법

1. 2차원 등가자기회로방법

등가자기회로방법은 릴럭턴스, 기자력 및 자속으로 표현된다. 힘 계산을 위한 등가자기회로방법의 가장 일반적인 접근 방식은 두 점에서의 에너지 차이 평가 방법 또는 자속과 전류에 기반한 등가 전기회로를 통한 공극 릴럭턴스의 편미분을 이용한 분석에 기반한다. 본 연구에서는 등가자기회로 모델에서의 자속 분포를 통해 구현된다.

Fig. 4는 본 논문에서 제시하는 영구자석형 횡자속 선형 전기기기의 직각 좌표형태의 x축 방향으로 자화된 배열을 보여준다.

기자력 Θ_a 와 공극 릴럭턴스 R_δ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\Theta_a = Nr \cdot coil \cdot I \quad (7)$$

$$R_\delta = \frac{2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot h_i \cdot W_t} \quad (8)$$

여기서, $Nr \cdot coil$ 는 권선 수, h_i 는 영구자석의 폭을 나타낸다.

$$R_M = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\frac{h_M}{\mu_r}}{h_i \cdot l_M} \quad (9)$$

$$R_\sigma = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\tau - W_t + h_M}{h_i \cdot (\tau - h_M)} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot h_i} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{\tau - h_M}{\delta}\right)} \quad (10)$$

식(9)와 (10)을 통해 영구자석의 릴럭턴스와 비자성체에서의 누설 릴럭턴스를 각각 표현할 수 있다.

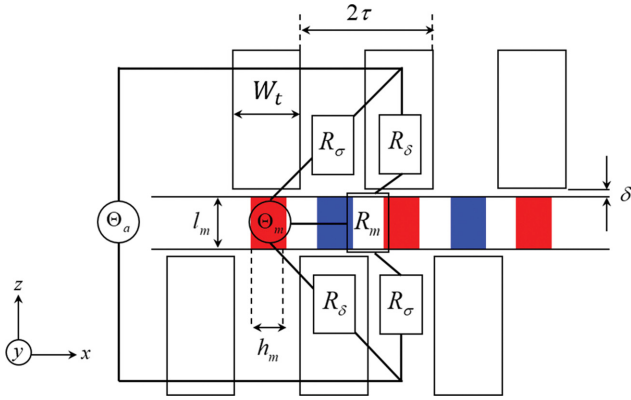


Fig. 4. (Color online) Arrangement of LTFM and Equivalent Magnetic Circuit (EMC) by 2D.

Fig. 4의 영구자석형 횡자속 선형기의 배열을 통한 등가 회로 변환은 전기자와 이동자의 자속으로 다음과 같이 표현 된다.

$$\phi_{a\delta} = \frac{\Theta_a(R_\sigma + R_M)}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta)R_M} \quad (11)$$

$$\phi_{a\sigma} = \frac{\Theta_a(R_\delta + R_M)}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta)R_M} \quad (12)$$

$$\phi_{M\delta} = \frac{\Theta_M R_\delta}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta)R_M} \quad (13)$$

$$\phi_{M\sigma} = \frac{\Theta_M R_\delta}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta)R_M} \quad (14)$$

최대 및 최소의 두 위치에서의 자기 비에너지의 차이는 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta W_m &= \Delta W_m|_{x=0} - \Delta W_m|_{x=r} \\ &= [2(\phi_{a\delta} + \phi_{M\delta})^2 R_\delta + 2(\phi_{a\sigma} - \phi_{M\sigma})^2 R_\sigma \\ &\quad + (\phi_{a\delta} - \phi_{a\sigma} + \phi_{M\delta} + \phi_{M\sigma})^2 R_M] \\ &\quad - [2(\phi_{a\delta} - \phi_{M\delta})^2 R_\delta + 2(\phi_{a\sigma} + \phi_{M\sigma})^2 R_\sigma \\ &\quad + (\phi_{a\delta} - \phi_{a\sigma} - \phi_{M\delta} - \phi_{M\sigma})^2 R_M] \end{aligned} \quad (15)$$

결과적으로 힘과 힘 밀도는 식(15)에 의한 자기 에너지를 이용하여 구할 수 있다. 영구자석형 횡자속 선형기의 힘 계산은 이동 변위의 하나의 극 피치 τ 의해 계산된다.

$$F_{average} = \frac{\Delta W_m}{\tau} \quad (16)$$

$$F_{density} = \frac{F_{average}}{2\tau \cdot h_i} \quad (17)$$

2. 3차원 등가자기회로방법

x, y, z축이 서로 비대칭 구조의 영구자석형 횡자속 선형기의 더욱 정확한 분석에 기반한 설계를 위해 3차원 등가자기회로방법이 제시되었다. 이와 같은 대칭성이 없는 횡자속 선형기의 복잡한 구조로 인해 3차원 분석이 필수적이며, 더욱 정확한 자계의 특성에 따른 자기회로 구성과 그 결과 힘 특성의 분석을 가능하게 한다[5]. 따라서 앞 장에서 제시한 2차원 등가자기회로방법에 의한 분석 결과와 3차원 등가자기회로방법에 의한 결과 간의 비교 및 일치성에 관한 평가가 필요하다.

3차원 등가자기회로방법에 의한 모델링은 정렬 및 비정렬 위치에서의 등가회로를 구성하여 그 회로를 구성하는 릴럭턴스를 정식화함으로써 최대 및 최소 자기에너지의 차를 이용하여 힘을 계산한다.

Fig. 5와 6은 Fig. 2에 기반한 최대 및 최소 자기에너지의 3차원 등가자기회로방법과 이를 2차원으로 변환한 등가회로를 각각 보여준다.

등가자기회로를 통한 수학적 표현의 릴럭턴스는 다음과 같다.

R_{ysr} 와 R_{ysa} 는 각각 x축 방향의 고정자 요크와 고정자 사이의 공기 영역의 릴럭턴스를 나타낸다.

$$R_{ysr} = \frac{b_t}{\mu_0 \mu_{fe} h_{ys} (b_s + 2h_i)} \quad (18)$$

$$R_{ysa} = \frac{\tau_{ps} - b_t}{\mu_0 h_{ys} h_i} \quad (19)$$

R_{ts} 와 R_{tsa} 는 각각 고정자 철심의 z축 방향과 x축 방향의 릴럭턴스를 나타낸다.

$$R_{ts} = \frac{1}{\mu_0 \mu_{fe} h_i b_t} \left(h_s + \frac{h_{ys}}{2} \right) \quad (20)$$

$$R_{tsa} = \frac{b_t}{\mu_0 \mu_{fe} h_i \left(h_s + \frac{h_{ys}}{2} \right)} \quad (21)$$

R_s 와 R_{sa} 는 각각 슬롯의 y축 방향과 z축 방향 누설 릴럭턴스를 나타낸다.

$$R_s = \frac{b_s}{\mu_0 h_s b_t} \quad (22)$$

$$R_{sa} = \frac{\tau_{ps}}{\mu_0 h_s b_s} \quad (23)$$

R_{δ} 과 $R_{\delta a}$ 는 각각 공극에서의 z축 방향과 x축 방향의 릴럭턴스를 나타낸다.

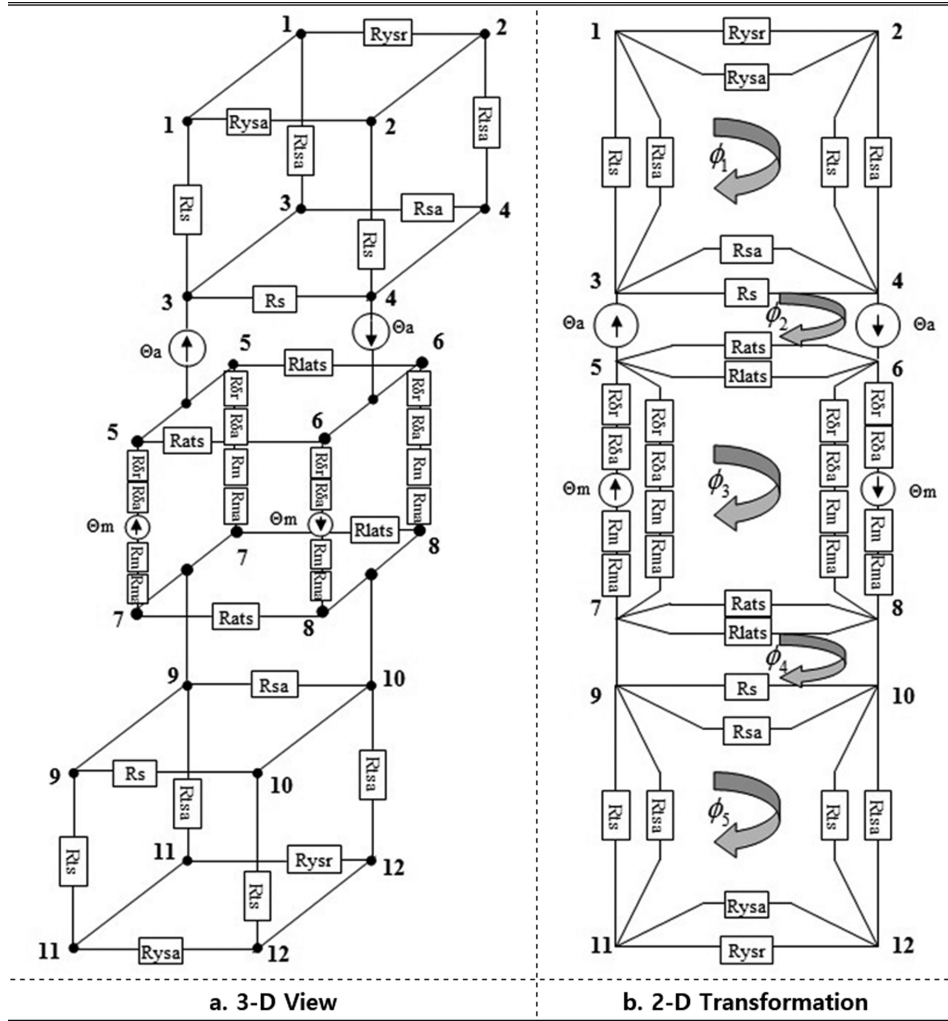


Fig. 5. Maximum magnetic energy in LTFM.

$$R_{\delta r} = \frac{\delta}{\mu_0 h_i h_m} \quad (24)$$

$$R_{\delta a} = \frac{\tau_{pm} - h_m}{\mu_0 h_i l_m} \quad (25)$$

R_{ats} 와 R_{lats} 는 각각 고정자 치 사이의 공기 영역에서의 y축 방향과 x축 방향의 릴럭턴스를 나타낸다. 이는 Fig. 7과 같이, y축과 z축의 2차원 좌표계를 통해 표현된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{b_s + h_i}{h_s} \right) \quad (26)$$

$$l_d = \sqrt{(b_s + h_i)^2 + h_s^2} \quad (27)$$

$$R_{ats} = \frac{\theta \cdot l_d}{\mu_0 h_i b_t} \quad (28)$$

$$R_{lats} = \frac{\theta \cdot l_d}{\mu_0 h_i (\tau_{ps} - b_t)} \quad (29)$$

여기서 R_m 와 R_{ma} 는 각각 영구자석의 x축 방향과 y축 방향의 릴럭턴스를 나타낸다.

$$R_m = \frac{h_m}{\mu_0 h_i l_m} \quad (30)$$

$$R_{ma} = \frac{h_m}{\mu_0 h_i (\tau_{pm} - l_m)} \quad (31)$$

2-1. 최대 자기에너지

Fig. 5의 등가회로를 바탕으로 최대 자기에너지의 자속 성분은 릴럭턴스 성분으로 구성된 등가회로를 통해 식(32)와 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

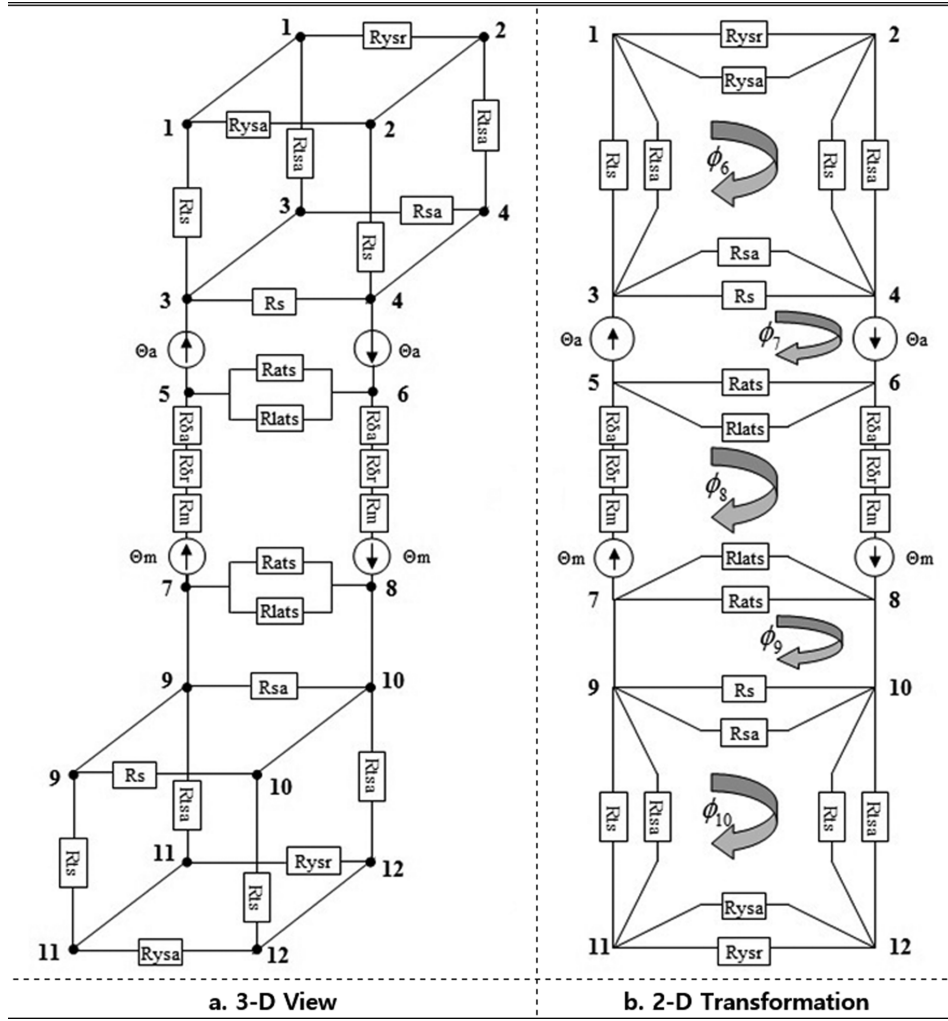


Fig. 6. Minimum magnetic energy in LTFM.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{R_{ysr} \cdot R_{ysa}}{R_{ysr} + R_{ysa}} + 2 \cdot \left(\frac{R_{tsa} \cdot R_{ts}}{R_{tsa} + R_{ts}} \right) + \frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} & -\frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} & \frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} + \frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2\theta_a \\ 2\theta_m \end{bmatrix}^{-1} \\
 &+ \begin{bmatrix} -\frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} + 2 \cdot \left(\frac{R_{ts} \cdot R_{tsa}}{R_{ts} + R_{tsa}} \right) + \frac{R_{ysa} \cdot R_{ysr}}{R_{ysa} + R_{ysr}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 2\theta_a \\ 2\theta_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 2 \cdot \left(\frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} \right) + 2 \cdot (R_{da} + R_{dr} + R_m) & -\frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} & \frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} + \frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} & -\frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 2\theta_a \\ 2\theta_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (32)$$

Figure 7 shows a right-angled triangle used for defining the geometry of the magnetic circuit. The vertical side is labeled h_s , the horizontal side is $b_s + h_i$, and the hypotenuse is l_d . The angle at the top vertex is θ . A coordinate system is defined with the z -axis pointing vertically upwards, the y -axis pointing horizontally to the left, and the x -axis pointing out of the page (indicated by a circle with a dot).

Fig. 7. Configuration for R_{ats} and R_{lats} .

2-2. 최소 자기에너지

Fig. 6의 등가회로를 바탕으로 최소 자기에너지의 자속 성분은 릴럭턴스 성분으로 구성된 등가회로를 통해 식(33)과 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \phi_6 \\ \phi_7 \\ \phi_8 \\ \phi_9 \\ \phi_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{ysr} \cdot R_{ysa}}{R_{ysr} + R_{ysa}} + 2 \cdot \left(\frac{R_{tsa} \cdot R_{ts}}{R_{tsa} + R_{ts}} \right) + \frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} & -\frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} \\ -\frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} & \frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} + \frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} \\ 0 & -\frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} & 0 \\ 2 \cdot \left(\frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} \right) + 2 \cdot (R_{\delta a} + R_{\delta r} + R_m) & -\frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} \\ -\frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} & \frac{R_{ats} \cdot R_{lats}}{R_{ats} + R_{lats}} + \frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} \\ 0 & -\frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} & 0 \\ -\frac{R_{sa} \cdot R_s}{R_{sa} + R_s} + 2 \cdot \left(\frac{R_{ts} \cdot R_{tsa}}{R_{ts} + R_{tsa}} \right) + \frac{R_{ysa} \cdot R_{ysr}}{R_{ysa} + R_{ysr}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 2\theta_a \\ 2\theta_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

2-3. 에너지와 힘

힘과 힘 밀도는 2차원 등가자기회로법과 같이 자기 에너지를 이용하여 구할 수 있다. 영구자석형 횡자속 선형기의 힘 계산은 이동 변위의 하나의 극 피치 τ_{pm} 의해 계산된다.

$$F_{ave} = \frac{W_m}{\tau_{pm}} \quad (34)$$

$$F_{den} = \frac{F_{ave}}{2\tau_{pm} \cdot h_i} \quad (35)$$

2-4. 결과 비교 분석

앞서 분석한 2차원 및 3차원 등가자기회로방법을 통한 수학적 모델링을 통해 자기에너지 및 힘 특성을 각각 계산하였다. 2차원과 3차원 등가자기회로방법을 통한 분석 결과는 1% 오차 범위 내로 결과에 관한 높은 신뢰성을 제공한다.

Table I. Comparison energy and force.

EMCNM	LTFM	
	2-D	3-D
Magnetic Energy [J]	0.080	0.081
Average Force [N]	8.893	8.959
Force Density [N/mm ²]	49.42	49.77

IV. 결 론

본 연구는 영구자석형 횡자속 선형 전기기기의 설계 방법으로 빠르고 정확한 결과를 위한 등가자기회로방법을 2차원 및 3차원 측면에서 비교 분석하였다. 상·하부 이중 고정자와 그 사이의 영구자석이 매입된 이동자로 구성된 복잡한 구조로 인해 유한요소 정식화 과정을 통한 횡자속 선형기기의 설계는 쉽지 않다. 그러나 유한요소 정식화 과정에서 영구자석 및 전기자 자속의 예측을 통한 수정을 통해 근사한 결과값을 얻을 수 있으나 이때에도 x, y 및 z축 서로 비대칭 구조로 인해 2차원이 아닌 3차원 분석이 필수적으로 요구된다. 따라서 이동자의 이동방향과 전기자 권선 방향이 같은 방향이면서 누설 자속을 분석하기가 매우 까다롭기 때문에 등가자기회로방법을 이용한 설계 방법이 매우 효과적이다. 본 연구 결과는 영구자석형 횡자속 선형 전기기기의 설계 규칙과 정보에 관한 중요한 정보를 제공할 뿐만 아니라, 전기기기의 전자기 이론을 바탕으로 한 수학적 모델링과 설계에도 적용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2025년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-23524170).

References

- [1] S. Jeong, J. Magn. **27**, 42 (2022).
- [2] N. Dehlinger and M. R. Dubois, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines (2008).
- [3] S. I. Jeong, Comparative Study of Linear Oscillating Generators, Cuvillier Verlag, Göttingen (2015) pp. 83~87.
- [4] D.-C. Popa, V. Iancu, and L. Szabó, 6th International Symposium on Linear Drives for Industrial Application (LDIA), France (2007).
- [5] J. D. Law, T. J. Busch, and T. A. Lipo, IEEE Trans. Energy Convers. **11**, 49 (1996).