



라인 기동식 릴럭턴스 전동기의 동기화 특성에 관한 연구

Study on the Synchronization Characteristics of Line-Start Synchronous Reluctance Motor

저자 (Authors)	김현우, 박예지, 강준호, 김정원, 정동훈, 원성홍, 이주 Hyunwoo Kim, Yeji Park, Junho Kang, Jeongwon Kim, Dong-Hoon Jung, Sung-Hong Won, Ju Lee
출처 (Source)	전기학회논문지 71(1) , 2022.1, 61-70 (10 pages) The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers 71(1) , 2022.1, 61-70 (10 pages)
발행처 (Publisher)	대한전기학회 The Korean Institute of Electrical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10960008
APA Style	김현우, 박예지, 강준호, 김정원, 정동훈, 원성홍, 이주 (2022). 라인 기동식 릴럭턴스 전동기의 동기화 특성에 관한 연구. 전기학회논문지, 71(1), 61-70.
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.104.66.*** 2022/03/10 11:26 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Study on the Synchronization Characteristics of Line-Start Synchronous Reluctance Motor

라인 기동식 릴럭턴스 전동기의 동기화 특성에 관한 연구

Hyunwoo Kim · Yeji Park · Junho Kang · Jeongwon Kim · Dong-Hoon Jung · Sung-Hong Won · Ju Lee

김현우* · 박예지* · 강준호* · 김정원* · 정동훈** · 원성홍*** · 이주†

Abstract

Line-start synchronous reluctance motor(LS-SynRM) has the high efficiency than the induction motor that is almost used in the industrial application. However, LS-SynRM must be operated in the synchronous speed for the high efficiency. When the load has high inertia, LS-SynRM fail to reach the synchronous speed. In this paper, the synchronization characteristics of LS-SynRM are analyzed based on the mathematical model and finite element analysis (FEA). The synchronization characteristics and the synchronous process of LS-SynRM are analyzed based on the mathematical model in s - δ plane. Furthermore, the condition of the synchronization is obtained by the kinetic energy and the motor energy. The three models are selected according to the rotor bar to analyze the synchronization characteristics using FEA. Using the time-harmonic analysis, the equivalent circuit parameters of the three models are calculated, and the starting characteristics and performance of LS-SynRM are compared.

Key Words

Critical slip, line-start synchronous reluctance motor, maximum inertia, starting characteristics, synchronization characteristics

1. 서론

최근 환경 문제가 증가함에 따라 에너지 효율 규제에 대한 강화가 이뤄지고 있다. 에너지 효율 규제 중 최저효율제(Minimum Efficiency Performance Standard, MEPS)는 극수와 용량에 따른 전동기의 효율을 IE1부터 IE4까지 정의하고 있다[1-2]. 최근 에너지 절감에 대한 규제가 강화됨에 따라 IE4급 효율의 전동기를 요구하고 있으며 근래에 전동기의 IE5급 효율을 정의하고 있다. 간단한 구조와 저렴한 가격으로 산업용 전동기 중 70%는 유도전동기를 사용하고 있지만 유도전동기는 회전자 상대속도인 슬립이 존재하여 회전자 동손이 발생하게 된다. 이러한 회전자 동손은 전체 손실의 약 25%정도를 차지하므로 유도전동기의 효율을 향상시키는데 한계가 존재한다[3-4]. 따라서 효율규제 강화를 고려했을 때 산업용 유도전동기를 대체하기 위한 고효율 전동기의 연구가 지속적으로 이뤄지고 있다[5-7].

라인 기동형 동기전동기(Line-Start Synchronous Motor)는 유

도전동기와 동기전동기의 구조를 같이 사용하여 인버터 없이 기동할 수 있는 전동기이다. 초기 기동 시 유도전동기의 원리로 구동하여 동기속도에서 동기전동기로 구동하여 효율을 향상시킬 수 있다[8-9]. 이러한 라인 기동형 동기전동기는 라인 기동형 영구자석 동기전동기(Line-Start Permanent Synchronous Motor, LSPM)과 라인 기동형 동기 릴럭턴스 전동기 (Line-Start Synchronous Reluctance Motor, LS-SynRM)으로 분류할 수 있다[10]. LSPM은 에너지밀도가 높은 희토류계 영구자석을 사용하므로 유도전동기에 비해 우수한 효율을 가지고 있다. 하지만 중국의 자원 무기화에 의해 유도전동기 대비 가격이 비싸다는 단점이 있다. 하지만 LS-SynRM은 영구자석을 사용하지 않으므로 LSPM보다 저렴하고 유도전동기와 비슷한 가격을 가지고 있으며 회전자 동손이 없으므로 유도전동기 대비 월등한 효율을 가질 수 있다. 이러한 이유로 최근에 LS-SynRM에 대한 많은 연구가 이뤄지고 있다[11-12].

산업용 어플리케이션에 따라 부하 관성의 차이가 있으며 라인 기동형 전동기의 경우 부하 관성에 따라 적용할 수 있는

† Corresponding Author: Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.
E-mail: julee@hanyang.ac.kr
https://orcid.org/0000-0003-0251-6492

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.
https://orcid.org/0000-0003-4121-1851 https://orcid.org/0000-0002-0095-2103
https://orcid.org/0000-0003-4904-3987 https://orcid.org/0000-0001-5158-4809

** School of Smart Mobility, Halla University, Korea.
https://orcid.org/0000-0002-2165-6397

*** Dept. of Electrical Engineering, Dongyang Mirae University, Korea.
https://orcid.org/0000-0003-3517-4505

Received : Oct. 6, 2021 Revised : Dec. 6, 2021 Accepted : Dec. 17, 2021

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

어플리케이션의 범위가 결정된다. 유도전동기의 경우 부하 관성이 크더라도 기동토크에 의해 부하 토크를 만족하는 슬립에 도달할 수 있다. LS-SynRM은 유도전동기와 달리 동기속도에서 운전을 해야하며 부하의 관성이 클 경우 동기화 특성에 의해 동기속도에 도달하지 못하는 특성을 가지고 있다[13-14]. 동기속도에 도달하지 못할 경우 LS-SynRM의 어플리케이션이 제약되므로 넓은 어플리케이션에 적용하기 위해서는 동기화 특성에 대한 연구가 이뤄져야한다.

본 논문은 LS-SynRM의 동기화 특성에 대한 연구이다. LS-SynRM은 유도전동기에 비해 효율이 높은 장점을 가지고 있으나 동기속도에서 운전을 해야 한다. LS-SynRM의 기동 특성을 분석하기 위하여 수학적 모델을 기반으로 비동기 시 특성을 분석하였다. 또한, s- δ 평면에서 기계적 방정식을 기반으로 동기화 프로세스에서 발생하는 물리적 특성을 분석하였고, 동기속도까지 기동하기 위한 조건을 에너지 식을 통해 도출하였다. LS-SynRM의 농형바 위치에 따른 특성을 분석하기 위하여 동일한 배리어 구조에서 농형바 위치에 따른 3가지 모델을 선정하였다. 3가지 모델에 대한 등가회로 파라미터를 분석하기 위하여 유한요소해석을 사용하였고 각 모델에 대한 특성을 비교 분석하였다.

2. LS-SynRM의 수학적 모델

2.1 LS-SynRM의 등가회로

그림 1은 4극 LS-SynRM의 기본적인 구조를 나타내고 있다. LS-SynRM은 릴럭턴스 전동기의 구조에 알루미늄을 삽입한 구조를 가지고 있다. 이러한 구조적 특징에 의하여 LS-SynRM은 유도전동기의 특성과 릴럭턴스 전동기의 특성을 모두 가지고 있으며 LS-SynRM의 전압방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[15].

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - (1-s)\omega_e \lambda_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + (1-s)\omega_e \lambda_{ds} \\ 0 &= R_{dr} i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \\ 0 &= R_{qr} i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 v_{ds} , v_{qs} 는 dq축 전압, R_s 는 권선 저항, i_{ds} , i_{qs} 는 dq축 고정자 전류, i_{dr} , i_{qr} 는 dq축 회전자 전류, λ_{ds} , λ_{qs} 은 dq축 고정자 쇄교자속, λ_{dr} , λ_{qr} 은 dq축 회전자 쇄교자속, R_{dr} , R_{qr} 은 dq축 회전자 저항, s 는 슬립, ω_e 는 인가 주파수이다.

식 (1)의 좌측항은 입력으로 고정자는 인가 전압을 나타내고, 회전자는 엔드링으로 단락되어 있으므로 0으로 나타난다. 식 (1)의 우측항 중 첫 번째 항은 저항에 의한 전압강하, 두

번째 항은 변압기 기전력, 세 번째 항은 속도기전력을 나타낸다. dq축 쇄교자속은 고정자에 의한 자속과 회전자에 의한 자속이므로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_{ds} i_{ds} + L_{dm} i_{dr} \\ \lambda_{qs} &= L_{qs} i_{qs} + L_{qm} i_{qr} \\ \lambda_{dr} &= L_{dm} i_{ds} + L_{dr} i_{dr} \\ \lambda_{qr} &= L_{qm} i_{qs} + L_{qr} i_{qr} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 L_{ds} , L_{qs} 는 dq축 고정자 인덕턴스, L_{dm} , L_{qm} 은 dq축 고정자와 회전자 상호인덕턴스, L_{dr} , L_{qr} 은 dq축 회전자 인덕턴스이다.

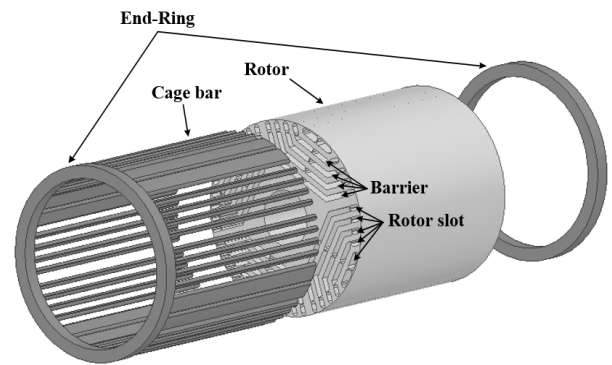


그림 1 4극 LS-SynRM 구조

Fig. 1 Structure of 4-pole LS-SynRM

식 (1)과 (2)를 기반으로 인가 전압에 따른 전류 특성을 분석할 수 있으며 쇄교자속과 전류의 식을 통해 식 (3)과 같이 토크를 계산할 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (3)$$

여기서 T_e 는 모터의 토크, P 는 극수이다.

LS-SynRM은 라인 기동식 전동기이므로 기동토크에 의해 가속되며 기계적인 특성은 식 (4)에 의해서 결정된다.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L \quad (4)$$

여기서 J 는 모터와 부하의 전체 관성, ω_m 은 기계적 각속도, T_L 은 부하 토크이다.

LS-SynRM의 회로 파라미터가 주어진 상태에서 식 (1)~(4)를 기반으로 LS-SynRM의 기동특성을 분석할 수 있다.

2.2 비동기속도에서의 특성

비동기속도에서의 특성을 분석하기 위하여 식 (1)을 페이저 식으로 표현하면 식 (5)와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ds} &= R_s \dot{I}_{ds} + js\omega_c \dot{A}_{ds} - (1-s)\omega_c \dot{A}_{qs} \\ \dot{V}_{qs} &= R_s \dot{I}_{qs} + js\omega_c \dot{A}_{qs} + (1-s)\omega_c \dot{A}_{ds} \\ 0 &= R_{dr} \dot{I}_{dr} + js\omega_c \dot{A}_{dr} \\ 0 &= R_{qr} \dot{I}_{qr} + js\omega_c \dot{A}_{qr} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 V_{ds}, V_{qs} 는 dq축 고정자 전압의 페이저, I_{ds}, I_{qs} 는 dq축 고정자 전류의 페이저, A_{ds}, A_{qs} 는 dq축 고정자 쇠교자속의 페이저, A_{dr}, A_{qr} 은 dq축 회전자 쇠교자속의 페이저이다.

식 (2)의 쇠교자속 식을 식 (5)의 회전자 전압방정식에 대입하여 연립하면 dq축 회전자 전류와 고정자 전류의 관계식을 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{I}_{dr} &= -\frac{js\omega_c L_{dm}}{R_{dr} + js\omega_c L_{dr}} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qr} &= -\frac{js\omega_c L_{qm}}{R_{qr} + js\omega_c L_{qr}} \dot{I}_{qs} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (2)의 고정자 쇠교자속에 대입하여 정리하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{A}_{ds} &= \left(L_{ds} - \frac{js\omega_c L_{dm}}{R_{dr} + js\omega_c L_{dr}} \right) \dot{I}_{ds} = \dot{Z}_{ds} \dot{I}_{ds} \\ \dot{A}_{qs} &= \left(L_{qs} - \frac{js\omega_c L_{qm}}{R_{qr} + js\omega_c L_{qr}} \right) \dot{I}_{qs} = \dot{Z}_{qs} \dot{I}_{qs} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)을 연립하면 식 (8)과 같이 고정자 전압과 전류의 관계를 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ds} \\ \dot{V}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + js\omega_c \dot{Z}_{ds} & -(1-s)\omega_c \dot{Z}_{qs} \\ (1-s)\omega_c \dot{Z}_{ds} & R_s + js\omega_c \dot{Z}_{qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)을 기반으로 dq축 전압에 따른 전류를 구하기 위해서 식 (9)와 같이 3상 평형 전압이 인가되었다고 가정한다.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin(\omega_c t + \delta_0) \\ V_m \sin\left(\omega_c t + \delta_0 - \frac{2}{3}\pi\right) \\ V_m \sin\left(\omega_c t + \delta_0 + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (9)$$

회전자 기준 좌표계로 dq축 전압을 표현하면 식 (10)과 같이 좌표변환을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_m^e t & \cos\left(\theta_m^e t - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta_m^e t + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin\theta_m^e t & -\sin\left(\theta_m^e t - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta_m^e t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \\ &= V_m \begin{bmatrix} \sin(s\omega_c t + \delta_0) \\ -\cos(s\omega_c t + \delta_0) \end{bmatrix} \\ \theta_m^e &= (1-s)\omega_c t + \theta_{m0} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 페이저로 표현하여 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{ds} &= -jV_m e^{j\delta_0} \\ V_{qs} &= -V_m e^{j\delta_0} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)을 식 (8)에 대입하면 전류를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s + js\omega_c \dot{Z}_{ds} & -(1-s)\omega_c \dot{Z}_{qs} \\ (1-s)\omega_c \dot{Z}_{ds} & R_s + js\omega_c \dot{Z}_{qs} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -jV_m e^{j\delta_0} \\ -V_m e^{j\delta_0} \end{bmatrix} \\ &= \frac{V_m e^{j\delta_0}}{D} \begin{bmatrix} jR_s + (1-2s)\omega_c \dot{Z}_{qs} \\ R_s - j(1-2s)\omega_c \dot{Z}_{ds} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} I_{ds}^{re} + jI_{ds}^{im} \\ I_{qs}^{re} + jI_{qs}^{im} \end{bmatrix} \\ D &= R_s^2 + js\omega_c R_s (\dot{Z}_{ds} + \dot{Z}_{qs}) + (1-2s)\omega_c^2 \dot{Z}_{ds} \dot{Z}_{qs} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 윗 첨자 re와 im는 각각 실수성분과 복소수성분을 의미한다.

식 (12)를 식 (7)에 대입하면 쇠교자속은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{A}_{ds} &= \dot{Z}_{ds} \dot{I}_{ds} = A_{ds}^{re} + jA_{ds}^{im} \\ \dot{A}_{qs} &= \dot{Z}_{qs} \dot{I}_{qs} = A_{qs}^{re} + jA_{qs}^{im} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (12)와 (13)의 페이저 식을 시간의 함수로 변환하면 식 (14)와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} i_{ds} &= I_{ds}^{re} \cos s\omega_c t - I_{ds}^{im} \sin s\omega_c t \\ i_{qs} &= I_{qs}^{re} \cos s\omega_c t - I_{qs}^{im} \sin s\omega_c t \\ \lambda_{ds} &= \lambda_{ds}^{re} \cos s\omega_c t - \lambda_{ds}^{im} \sin s\omega_c t \\ \lambda_{qs} &= \lambda_{qs}^{re} \cos s\omega_c t - \lambda_{qs}^{im} \sin s\omega_c t \end{aligned} \quad (14)$$

전동기의 토크는 식 (3)과 같이 쇠교자속과 전류의 곱으로 표현할 수 있으므로 식 (14)를 대입하여 정리하면 식 (15)와 같이 평균토크와 슬립주파수의 2배의 진동하는 토크를 도출할 수 있다.

$$T_e = T_{cage} + T_{rel} \cos(2s\omega_c t + \alpha) \quad (15)$$

여기서 T_{cage} 는 토크의 평균값, T_{rel} 은 토크의 변동분, α 는 토크의 위상이다.

식 (15)에 의해 비동기속도에서 LS-SynRM의 토크는 농형바에 의한 토크와 릴럭턴스 토크의 합이 되며 릴럭턴스 토크는 슬립 주파수의 2배로 진동하는 성분을 가진다. 그림 2는 식 (1)을 기반으로 동적 해석을 한 결과를 슬립과 토크에 대하여 나타낸 것이다. 슬립에 따른 토크는 평균 토크를 중심으로 릴

력토크에 의해 진동하는 토크를 가지는 것을 알 수 있다.

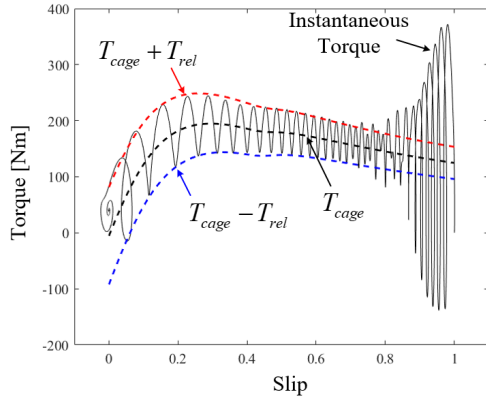


그림 2 슬립에 따른 토크 특성

Fig. 2 Torque characteristic according to the slip

2.3 동기속도에서의 특성

동기속도에서는 슬립이 0이므로 식 (18)에 의해 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_c L_{qs} \\ \omega_c L_{ds} & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (16)$$

식 (14)를 기반으로 dq 축 전류를 구하면 식 (17)과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} I_{ds} &= \frac{R_s V_{ds} + \omega_c L_{qs} V_{qs}}{R_s^2 + \omega_c^2 L_{ds} L_{qs}} \\ I_{qs} &= \frac{R_s V_{qs} - \omega_c L_{ds} V_{ds}}{R_s^2 + \omega_c^2 L_{ds} L_{qs}} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)과 (10)을 식 (3)의 토크 식에 대입하고 고정자 저항을 무시하면 동기속도에서의 토크는 식 (18)과 같이 나타난다.

$$T_e = \frac{3P}{8\omega_c^2} \left(\frac{1}{L_{qs}} - \frac{1}{L_{ds}} \right) V_m^2 \sin 2\delta_0 \quad (18)$$

식 (18)로부터 동기속도에서의 LS-SynRM은 dq 축 인덕턴스와 부하각에 의해서 결정되는 것을 알 수 있다. 또한, 동기속도에서는 속도의 변화가 없으므로 LS-SynRM의 부하각은 부하 토크를 만족하는 부하각에서 운전하게 된다.

3. LS-SynRM의 동기화 특성

LS-SynRM의 동기화 특성을 분석하기 위하여 표 1과 같이 등가회로 파라미터를 선정하였다. 표 1의 등가회로 파라미터는 7.5kW LS-SynRM의 한 형상에 대한 Time-harmonic 해석을

통해 얻은 파라미터이며 2절에서 분석한 수학적 모델을 기반으로 동기화 특성을 분석하였다.

표 1 동기화 특성을 분석하기 위한 등가회로 파라미터

Table 1 Equivalent circuit parameters for analysis of synchronization capability

항목	값	단위
고정자 저항	0.27	Ω
d 축 고정자 인덕턴스	99.290	mH
q 축 고정자 인덕턴스	10.187	mH
d 축 회전자 저항	0.338	Ω
q 축 회전자 저항	0.881	Ω
d 축 회전자 누설인덕턴스	3.408	mH
q 축 회전자 누설인덕턴스	5.457	mH

3.1 s - δ 평면에서의 특성 분석

LS-SynRM의 과도상태는 수학적 모델을 기반으로 분석할 수 있으나 복잡한 미분방정식을 풀어야한다. 비동기시 토크는 식 (15)에 의해서 슬립과 부하각에 의해 결정된다. 식 (4)의 기계적 방정식을 s - δ 평면으로 변환하면 시간과 무관하게 부하각과 슬립에 대한 방정식으로 변환할 수 있다. 따라서 동기화 특성을 분석하기 위하여 식 (3)을 s - δ 평면으로 변환하면 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다[16].

$$-\frac{2}{P} J s \omega_c^2 \frac{ds}{d\delta} = T_e - T_L \quad (19)$$

여기서 s 는 슬립, δ 는 부하각으로 회전자 d 축과 회전자계 사이의 각도를 의미한다.

그림 3 (a)는 시간에 따른 슬립과 부하각, 그림 3 (b)는 슬립과 부하각의 관계를 나타낸다. 초기에 가속력에 의해 가속하면 회전자의 속도가 동기속도보다 작으므로 부하각이 계속 커지며 슬립은 작아지는 것을 알 수 있다. 회전자의 속도가 동기속도에 가까워질 경우 슬립은 0에 가까워지며 부하각은 부하토크를 만족하는 부하각으로 수렴하게 된다. 그림 3 (b)에 의하면 동기속도 근처에서 슬립이 증가했다가 감소하는 특성을 보이고 있다. 이러한 특성을 LS-SynRM의 풀인 특성이라 하며 동기화를 결정하는 중요한 특성이다.

3.2 동기화 프로세스 분석

LS-SynRM의 동기화 프로세스를 분석하기 위하여 부하각에 따른 동기속도에서의 토크를 분석하였다. 그림 4는 동기속도에서 부하각에 따른 토크와 부하 토크를 나타낸다. LS-SynRM은 동기속도에서 부하 토크를 만족하는 부하각에서 운전하므로 그림 4로부터 부하각은 총 4개가 존재하는 것을 알 수 있다. 4개의 부하각 중 2개는 안정점(㉔, ㉕), 나머지 2개는 불안정점(㉖, ㉗)이 된다.

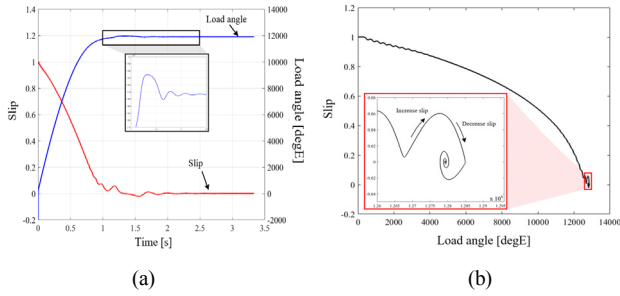


그림 3 과도해석을 통한 부하각과 슬립 특성 (a) 시간에 따른 슬립과 부하각 (b) 부하각과 슬립의 관계

Fig. 3 Load angle and slip characteristics using transient analysis (a) time vs slip and load angle (b) relationship with load angle and slip

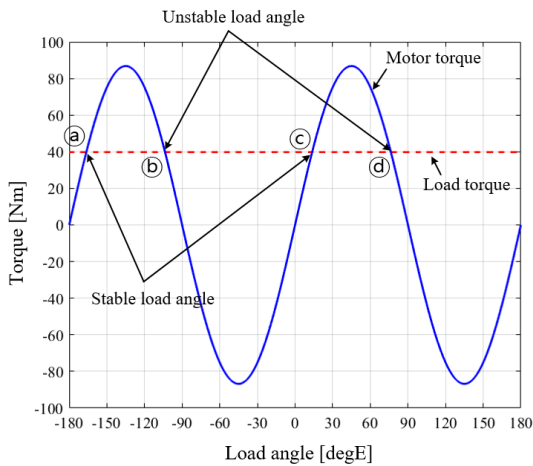


그림 4 동기속도에서 부하각에 따른 토크 특성
Fig. 4 Torque characteristic according to the load angle in synchronous speed

그림 5 (a)와 5 (c)는 안정한 점에서의 특성을 나타내고 그림 5 (b)와 5 (d)는 불안정점에서의 동작 특성을 나타낸다. 안정한 점에서 부하각이 증가할 경우 회전자 가속하므로 부하각이 증가하고 부하각이 감소할 경우 회전자 감속하여 부하각이 감소하므로 안정한 부하각에서 지속적인 운동이 가능하다. 반면, 불안정한 부하각에서는 부하각이 증가하면 회전자가 감속하고 부하각이 감소하면 회전자가 가속하므로 지속적인 운전이 불가능하다. 따라서 LS-SynRM이 동기속도에 도달할 경우의 부하각은 안정한 부하각에서 운전해야한다.

그림 6 (a)는 시간에 따른 속도 그래프를 나타내며, 그림 6 (b)는 동기속도 근처에서의 슬립과 부하각의 특성을 나타낸다. 그림 6 (a)에서 LS-SynRM의 동기화 프로세스는 ①→②→③ 순으로 이루어진다. 그림 6 (b)에서 각 포인트에 따른 부하각을 나타내면 ①과 ③은 동기속도 근처에서 불안정한 부하각을 가진다. LS-SynRM이 동기속도에 도달하더라도 불안정한 부하각에서 운전할 경우 속도가 감소한 후 농형비에 의한 토크로 다시 가속하여 안정한 부하각으로 이동하게 된다. 이때 가장 낮은 슬립은 특성 슬립(critical slip)이라고 정의하며 특성 슬립에서부터 동기속도까지 도달하지 못할 경우 LS-SynRM은 동기속도에서 동작할 수 없다.

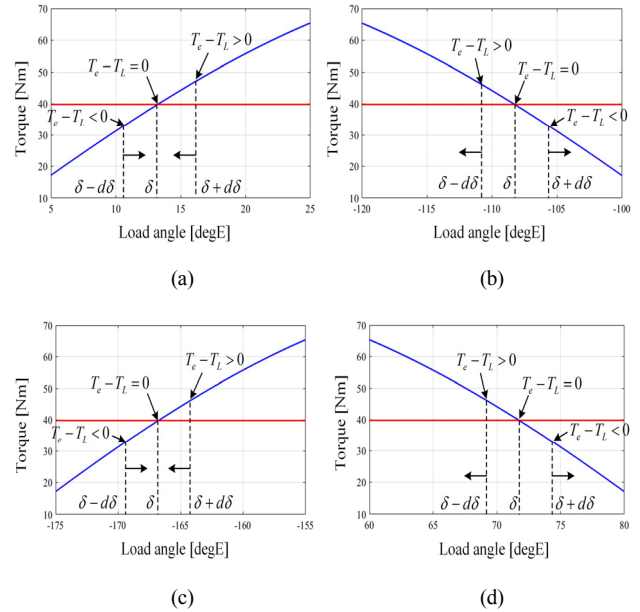


그림 5 부하각에 따른 동작 특성 분석 (a) 운전 포인트 (b) 운전 포인트 (c) 운전 포인트 (d) 운전 포인트
Fig. 5 Operating characteristic analysis according to the load angle (a) operating point (b) operating point (c) operating point (d) operating point

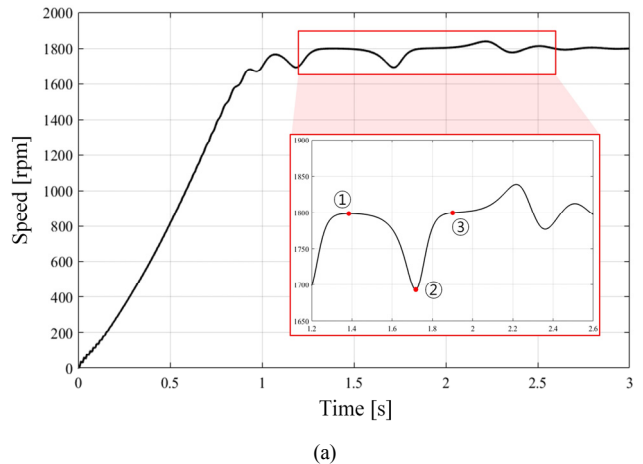


그림 6 LS-SynRM의 동기화 프로세스 (a) 시간에 따른 속도 곡선 (b) 부하각에 따른 토크 및 슬립 특성
Fig. 6 Synchronization process of LS-SynRM (a) speed curve (b) torque and slip characteristic according to load angle

3.3 LS-SynRM의 최대허용관성 분석

LS-SynRM은 특성 슬립에서 동기속도까지 도달여부는 과도 해석을 통해 알 수 있으나 복잡한 미분방정식을 풀어야한다. 미분방정식으로 접근하지 않고 운동에너지와 전동기의 풀인 에너지를 비교하여 동기화 여부를 분석할 수 있다. 그림 6 (b)로부터 동기화 시 슬립과 부하각의 관계는 식 (20)과 같이 정현적인 관계를 가진다고 가정한다[17].

$$s = s_{cr} \sin(\delta_{syn} - \delta) \tag{20}$$

여기서 s 는 슬립, s_{cr} 은 특성 슬립, δ 는 부하각, δ_{syn} 는 부하토크의 부하각을 나타낸다.

식 (20)의 δ_{syn} 은 식 (18)로부터 구할 수 있다. 슬립과 부하각의 관계를 정현적으로 가정하였고 그림 6 (a)의 ②에서는 속도의 변화율이 없으므로 특성 슬립은 식 (21)에 의해서 결정된다.

$$T_{cage}(s_{cr}) + T_{rel}(\delta_{syn} - \frac{\pi}{2}) - T_L(s_{cr}) = 0 \tag{21}$$

식 (19)의 양변을 부하각에 대하여 적분하면 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{s_{cr}}^0 -\frac{2}{P} Js\omega_c^2 ds = \int_{\delta_{syn} - \pi/2}^{\delta_{syn}} [T_{cage}(s) + T_{rel}(\delta) - T_L(s)] d\delta \tag{22}$$

식 (22)에서 좌측항은 운동에너지를 나타내며 우측항은 모터에서 부하로 전달되는 에너지를 의미한다. 동기속도까지 도달하기 위해서는 모터에서 부하로 전달되는 에너지가 운동에너지보다 커야하므로 LS-SynRM의 최대허용관성은 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{cr} = \frac{P}{s_{cr}^2 \omega_c^2} \int_{\delta_{syn} - \pi/2}^{\delta_{syn}} [T_{cage}(s) + T_{rel}(\delta) - T_L(s)] d\delta \tag{23}$$

식 (23)으로부터 LS-SynRM이 동기속도까지 도달할 수 있는 부하관성은 특성 슬립에 반비례하는 것을 알 수 있다. 따라서 특성 슬립이 작을수록 최대허용관성이 크므로 동기속도 근처에서 토크가 클수록 최대허용관성이 크다는 것을 알 수 있다. 그림 7는 동기화 여부를 결정하는 부하토크와 관성의 관계를 나타낸다. 부하토크와 관성의 곡선에서 우측 영역은 동기화가 불가능하며 좌측 영역에서는 동기화가 가능함을 의미한다.

동기화 가능 여부를 확인하기 위하여 그림 7에서 3가지 부하조건에 대하여 과도해석을 진행하였다. 표 2는 3가지 부하조건을 정리한 것을 나타내고, 그림 8은 3가지 부하조건에 대하여 과도해석을 한 결과이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 동기

화가 가능한 Case 1과 Case 2는 동기속도까지 도달하지만 Case 3은 동기속도까지 도달하지 못한다.

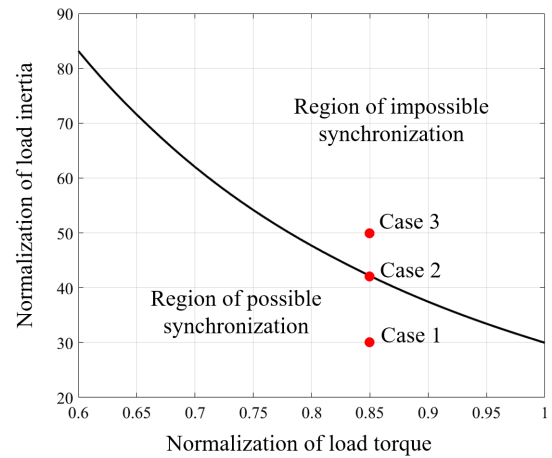


그림 7 동기화 특성을 고려한 부하토크와 관성의 관계
Fig. 7 Relationship with load angle and inertia considering the synchronization capability

표 2 기동특성 분석을 위한 부하 조건

Table 2 Load condition for analysis of starting characteristic

항목	Case 1	Case 2	Case 3	단위
모터 관성	0.0208			kg·m ²
부하 관성/모터 관성	30	42	50	-
부하 관성	0.624	0.874	1.04	kg·m ²
부하 토크	33.82			Nm

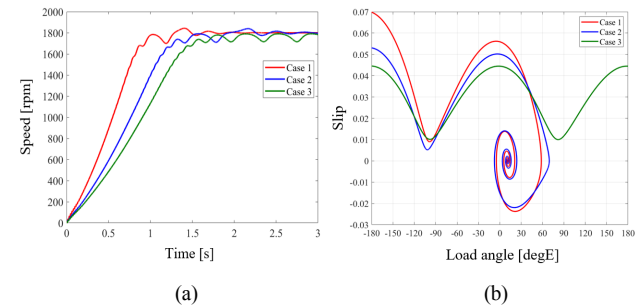


그림 8 3가지 Case에 대한 과도해석 (a) 시간에 따른 속도 (b) 부하각과 슬립의 관계
Fig. 8 Transient analysis of three cases (a) speed curve (b) relationship with load angle and slip

4. 유한요소해석을 통한 특성 비교

LS-SynRM의 동기화 특성을 분석하기 위하여 배리어 형상은 동일한 조건에서 농형비에 따른 3가지 모델을 선정하였다. 그림 9는 7.5kW LS-SynRM의 3가지 모델을 나타내며 표 3은 각 모델의 공통 설계 사양을 나타낸다. 유한요소해석을 통해 3가지 모델에 대한 파라미터를 분석하였고, 동기화 특성 및 성능을 비교하였다. 본 논문에서 유한요소해석 프로그램은

ANSYS의 MAXWELL 2021R1를 사용하였다.

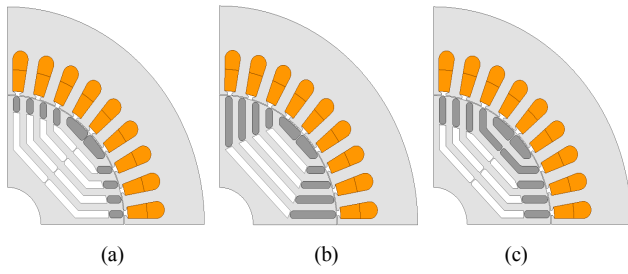


그림 9 7.5kW LS-SynRM의 유한요소해석 모델 (a) Model 1 (b) Model 2 (c) Model 3

Fig. 9 FEM model of 7.5kW LS-SynRM (a) Model 1 (b) Model 2 (c) Model 3

표 3 각 모델의 공통 설계 사양

Table 3 Common specification of each models

항목	Case 1	단위
고정자 외경	235	mm
고정자 내경	140	mm
회전자 내경	40	mm
공극 길이	0.45	mm
적층길이	155	mm
슬롯당 턴수	34	-
병렬회로수	1	-
결선	Y	-
극수	4	-
선간전압	380	Vrms
인가 주파수	60	Hz
출력	7.5	kW
토크	39.8	Nm
속도	1800	rpm
Core 재질	50PN470	-
회전자 도체 재질	Aluminum	-

4.1 등가회로 파라미터 비교

LS-SynRM의 동기화 특성은 등가회로 파라미터에 의해서 결정되므로 3가지 모델에 대한 등가회로 파라미터를 구해야 한다. LS-SynRM의 구조는 농형바가 일정하게 분포되어 있지 않으므로 등가회로 파라미터를 구하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 FEA의 Time-harmonic 해석을 이용한 파라미터 추정법을 통하여 LS-SynRM의 등가회로 파라미터를 비교 분석하였다[18]. Time-harmonic 해석 시 등가회로는 그림 10과 같이 나타낼 수 있으므로 해석 결과인 쇠교자속과 전류의 관계식으로부터 식 (24)와 같이 등가 저항 및 인덕턴스를 계산할 수 있다.

$$R_{eq,dq} = -\omega_e \text{Im} \left(\frac{\Lambda_{dq}}{I_{dq}} \right), \quad L_{eq,dq} = \text{Re} \left(\frac{\Lambda_{dq}}{I_{dq}} \right) \quad (24)$$

여기서 $R_{eq,dq}$ 는 dq 축 등가저항, $L_{eq,dq}$ 는 dq 축 등가인덕턴스, Λ_{dq} 는 쇠교자속, I_{dq} 는 인가 전류이다.

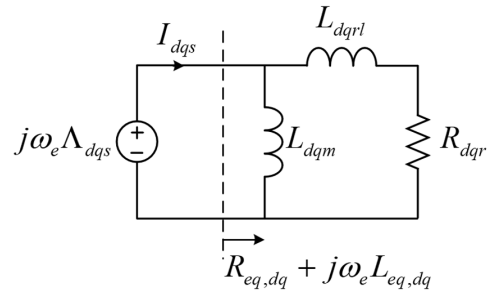


그림 10 Time-harmonic 해석 시 dq 축 등가회로

Fig. 10 dq -axis equivalent circuit in time-harmonic analysis.

그림 10의 등가회로와 식 (24)의 등가 저항 및 인덕턴스를 기반으로 회전자 저항 및 누설 인덕턴스를 계산할 수 있다. 표 4는 Time-harmonic 해석을 기반으로 각 모델별 파라미터를 계산한 결과를 나타낸다. Model 1은 Model 2와 3에 비해 알루미늄 사용량이 작으므로 dq 축 회전자 저항이 가장 크다. Model 2와 3의 경우 동일한 알루미늄 사용량을 사용하였더라도 농형바의 배치에 따라 차이가 발생하며 Model 3가 Model 2에 비해 dq 축 회전자 저항이 작다. 동기속도에서 성능을 결정하는 dq 축 고정자 인덕턴스의 경우 Model 2가 중앙에 브릿지 구조가 없으므로 가장 크다.

표 4 Time-harmonic 해석을 통한 각 모델별 등가회로 파라미터 분석

Table 4 Equivalent circuit parameter analysis of each models using time-harmonic analysis

항목	Model 1	Model 2	Model 3	단위
총 알루미늄 사용량	0.17	0.297	0.297	kg
고정자 저항	0.27	0.27	0.27	Ω
d 축 고정자 인덕턴스	99.290	98.529	98.846	mH
q 축 고정자 인덕턴스	10.187	9.622	9.868	mH
d 축 회전자 저항	0.338	0.305	0.283	Ω
q 축 회전자 저항	0.881	0.725	0.657	Ω
d 축 회전자 누설인덕턴스	3.408	3.458	3.558	mH
q 축 회전자 누설인덕턴스	5.457	6.573	6.314	mH

4.2 모델별 특성 비교

그림 11 (a)는 표 4의 각 모델의 파라미터를 기준으로 TN곡선을 비교한 결과를 나타낸다. Model 1, 2, 3을 비교하면 회전자 저항이 작아지므로 유도전동기의 비레추이 특성에 의해 TN곡선이 동기속도 근처에서 토크가 향상된다. 따라서 특성 슬립이 감소하여 식 (23)에 의해 최대허용관성이 증가하고, 부하가 큰 관성을 가지더라도 동기속도까지 기동할 수 있다. 그림 11 (b)는 모델별 부하 토크에 따른 관성 특성을 나타낸다.

특성 슬립이 제일 작은 Model 3이 Model 1과 Model 2에 비해 동일한 부하 조건에서 최대허용관성이 가장 큰 것을 알 수 있다.

그림 12는 동일한 부하토크(39.8Nm)와 및 관성(0.416kg·m²)에 대하여 기동해석을 한 결과이다. 슬립이 1에 가까울수록 Model 1, Model 2, Model 3 순으로 토크가 크게 발생한다. 따라서 초기 기동 시 토크가 큰 Model 1이 가속력이 크므로 더 짧은 시간에 속도가 증가하게 된다.

표 5 각 모델별 동기속도에서의 특성 비교

Table 5 Comparison with characteristics of each models in synchronous speed.

항목	Model 1	Model 2	Model 3	단위
d 축 인덕턴스 (L_d)	99.290	98.529	98.846	mH
q 축 인덕턴스 (L_q)	10.187	9.622	9.868	mH
돌극차 (L_d-L_q)	89.1	88.91	88.97	mH
돌극비 (L_d / L_q)	9.747	10.24	10.016	-
전류	15.41	15.31	15.47	A _{rms}
출력	7.55	7.55	7.55	kW
효율	93.63	93.69	93.61	%
역률	79.30	79.79	79.00	%

을 알 수 있다. 그림 11 (b)에서 알 수 있듯이 최대허용관성은 Model 3가 가장 우수하나 효율과 역률이 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

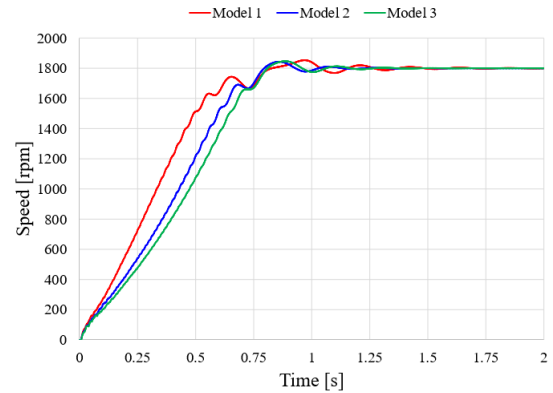
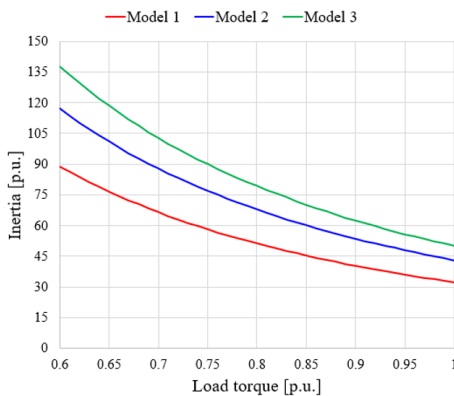


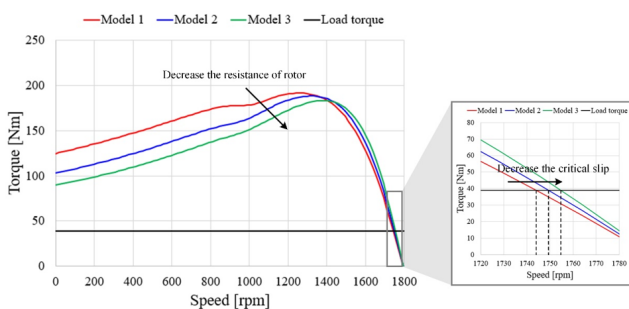
그림 12 3가지 모델에 대한 기동 특성 비교
Fig. 12 Comparison with starting characteristics of three models

5. 결론

본 논문에서는 7.5kW 4극 LS-SynRM의 동기화 특성을 분석하였다. LS-SynRM의 등가회로 모델을 기반으로 토크 특성을 분석하였다. 또한, LS-SynRM의 동기화 특성을 슬립과 부하각의 관계를 통해 s - δ 평면에서의 궤적을 분석하였고, 동기화 조건을 에너지 관점에서 분석하였다. 동기화 프로세스를 유한요소해석을 통해 분석하기 위하여 동일한 배리어에 대하여 농형바 배치에 따른 3가지 모델을 선정하였다. Time-harmonic 해석을 통해 3가지 모델에 대한 파라미터를 분석하였고 최대허용관성과 성능을 비교 분석하였다. 산업에서 주로 사용하는 유도전동기를 IE4급 효율의 LS-SynRM으로 대체하기 위해서는 최대허용관성과 역률 등의 효율 외의 특성들도 IEC규격을 만족하도록 설계할 필요가 있다. 본 연구의 동기화 특성 연구를 통해 광범위한 어플리케이션에 적용할 수 있는 LS-SynRM 설계 기법에 대한 연구가 가능하다.



(a)



(b)

그림 11 회로파라미터 기반 특성 비교 (a) TN 곡선 (b) 부하 토크와 관성의 관계

Fig. 11 Comparison with characteristics of each models based on the circuit parameters. (a) TN curve (b) relationship with load torque and inertia

표 5는 동기속도에서의 특성을 비교한 결과이다. 효율과 역률을 고려할 경우 Model 2가 가장 우수한 성능을 가지는 것

Acknowledgements

이 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업입니다. (21CTAP-C157784-02)
This work was supported by a Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning grant funded by the Korea government (20192010106780, A Construction and Operation of Open Platform for Next-Generation Super Premium Efficiency (IE4) Motors)

References

[1] R. Ni, D. Xu, G. Wang, X. Gui, G. Zhang, H. Zhan and C. Li, "Efficiency Enhancement of General AC Drive

- System by Remanufacturing Induction Motor With Interior Permanent-Magnet Rotor,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 2, pp. 808-819, Feb. 2016.
- [2] F.J.T.E. Ferreira, B. Leprettre and A.T.de Almeida, “Comparison of protection requirements in IE2, IE3, and IE4-class motor,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 52, no. 4, pp. 3603-3610, Jul. 2016.
- [3] H.-C. Liu and J. Lee “Optimum Design of an IE4 Line-Start Synchronous Reluctance Motor Considering Manufacturing Process Loss Effect,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 4, pp. 3104-3114, Apr. 2018.
- [4] A. T. Almeida, F.J.T.E. Ferreira and G. Baoming, “Beyond Induction Motors-Technology Trends to Move Up Efficiency,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 3, pp. 2103-2114, May/June. 2014.
- [5] H. Kim, Y. Park, H.-C. Liu, P.-W. Han and J. Lee, “Study on Line-Start Permanent Magnet Assistance Synchronous Reluctance Motor for Improving Efficiency and Power Factor,” ENERGIES, vol. 13, no. 2, pp. 1-13, Jan. 2020.
- [6] K.-J. Joo, I.-G. Kim, J. Lee and S.-C. Go, “Robust Speed Sensorless Control to Estimated Error for PMA-SynRM,” IEEE Trans. Magn., vol. 53, no. 6, Jun. 2017, Art no. 8102604.
- [7] J.-K. Lee, D.-H. Jung, J. Lim, K.-D. Lee and J. Lee, “A Study on the Synchronous Reluctance Motor Design for High Torque by Using RSM,” IEEE. Trans. Magn., vol. 54, no. 3, Mar. 2018, Art no. 8103005.
- [8] F. Ghoroghchian, A. D. Aliabad and E. Amiri, “Design Improvement of dual-pole LSPM synchronous motor,” IET Electr. Power Appl., vol. 13, no. 6, pp.742-749, Jun. 2019.
- [9] D. Mingardi and N. Bianchi, “Line-Start PM-Assisted Synchronous Motor Design, Optimization and Tests,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 64, no. 12, pp. 9739-9747, Dec. 2017.
- [10] H. Kim, Y. Park, S.-T. Oh, H. Jang, S.-H. Won, Y.-D. Chun and J. Lee, “A Study on the Rotor Design of Line Start Synchronous Reluctance Motor for IE4 Efficiency and Improving Power Factor,” ENERGIES, vol. 13, no. 21, pp. 1-15, Nov. 2020.
- [11] H.-C. Liu, H.-S. Seol, J.-Y. Kim and J. Lee, “Design and Analysis of an IE4 Class Line-Start Synchronous Reluctance Motor Considering Total Loss and Starting Performance,” Journal of Elec Materi., vol. 48, no. 3, pp. 1386-1394, 2019.
- [12] H.-C. Liu, H.-S. H, S. Cho, J. Lee and C.-S. Jin, “Bubbles and Blisters Impact on Diecasting CAGE to the Designs and Operations of Line-Start Synchronous Reluctance Motors,” IEEE Trans. Magn., vol. 53, no. 6, Jun. 2017, Art no. 8202504.
- [13] Y. Hu, B. Chen, Y. Xiao, J. Shi, X. Li and L. Li, “Rotor Design and Optimization of a Three-Phase Line-Start Synchronous Reluctance Motor”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 57, no. 2, pp. 1365-1374, Mar/Apr. 2021.
- [14] C.-T. Liu, P.-C. Shih, Z.-H. Cai, S.-C. Yen, H.-N. Lin, Y.-W. Hsu, T.-Y. Luo and S.-Y. Lin, “Rotor Conductor Arrangement Designs of High-Efficiency Direct-on-Line Synchronous Reluctance Motors for Metal Industry Applications,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 56, no. 4, pp. 4337-4344, Jul./Aug. 2020.
- [15] A. Kersten, Y. Liu, D. Pehrman, and T. Thiringer, “Rotor Design of Line-Start Synchronous Reluctance Machine With Round Bars,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 55, no. 4, pp. 3685-3696, Jul/Aug. 2019.
- [16] T. J. E. Miller, “Synchronization of Line-Start Permanent-Magnet AC Motors,” IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 7, pp. 1822-1828, Jul. 1984.
- [17] S. F. Rabbi and M. A. Rahman, “Critical Criteria for Successful Synchronization of Line-Start IPM Motors,” IEEE
- [18] S. T. Boroujeni, N. Bianchi and L. Alberti, “Fast Estimation of Line-Start Reluctance Machine Parameters by Finite Element Analysis,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 26, no. 1, pp. 1-8, Mar. 2011.

저자소개

김현우 (Hyunwoo Kim)



2017년 : 한양대학교 전기공학부 졸업
 2017년~현재 : 동 대학원 전기공학과 석박통합과정
 Tel : 02-2220-0349
 E-mail : khw7481@hanyang.ac.kr

박예지 (Yeji Park)



2017년 : 한경대학교 전기전자제어공학부 졸업
 2017년~현재 : 한양대학교 대학원 전기공학과 석박통합과정
 Tel : 02-2220-0349
 E-mail : yejipark@hanyang.ac.kr

강준호 (Junho Kang)



2019년 : 충북대학교 전기공학부 졸업
 2019~현재 : 한양대학교 전기공학과 석박통합과정
 Tel : 02-2220-0349
 E-mail : rwg1783@hanyang.ac.kr

김정원 (Jeongwon Kim)



2019년 : 동국대학교 전자전기공학과 졸업
 2019~현재 : 한양대학교 전기공학과 석박통합과정
 Tel : 02-2220-0349
 E-mail : kjw0427@hanyang.ac.kr



정동훈 (Dong-Hoon Jung)

2016년 : 한양대학교 전기공학과 석사 졸업
 2020년 : 동 대학원 전기공학과 박사 졸업
 2020년~현재 : 한라대학교 스마트모빌리티공학부
 조교수

Tel : 033-760-1224

E-mail : dh.jung@halla.ac.kr



원성홍 (Won Sung Hong)

1993.2. : 한양대학교 전기공학과 졸업
 1995.2. : 한양대학교 전기공학과 석사
 1995~2004 : CAE 삼성전기 중앙연구소 그룹
 2007.2. : 한양대학교 전기공학과 박사
 2007~2008 : BK21 한양대학교 연구교수
 2009~현재 : 동양미래대학교 전기공학과 부교수/
 학과장

Tel : 02-2610-5180

Fax : 02-2610-1854

E-mail : sagewide@dongyang.ac.kr



이 주 (Ju Lee)

1986년 : 한양대학교 전기공학과 졸업
 1988년 : 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
 1988~1993년 : 국방과학연구소 연구원
 1997년 : 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과
 졸업(박사)

1997년 : 한국철도기술연구원 선임연구원

1997년~현재 한양대학교 전기생체공학부 교수

Tel : 02-2220-0342

E-mail : julee@hanyang.ac.kr