

Analysis of the operating characteristics of high-temperature superconducting synchronous motors according to turn-to-turn contact resistance of field coil

Jung Hoon^a, Yoon Seok Chae^a, Ho Min Kim^a, Sung Hoon Lee^b, and Ji Hyung Kim^{b,*}

^a Faculty of Applied Energy System Electrical Engineering, Jeju National University, Jeju, South Korea

^b Electric Energy Research Center, Jeju National University, Jeju, South Korea

(Received 29 November 2024; revised or reviewed 23 December 2024; accepted 24 December 2024)

Abstract

Recently, as the sense of crisis over global climate change has grown, the international community is implementing carbon emission regulations and carbon neutrality policies. Efforts to reduce emissions are being strengthened in the transportation and transport sectors, which account for 25% of global greenhouse gas emissions. In response to these regulations and policies, efforts are being made to apply eco-friendly electric propulsion technology to aircraft, ships, and automobiles. Researches are being conducted to improve power density and efficiency by using superconductors that have a high current density compared to the copper wire and whose electrical resistance becomes “0” below the critical condition. Among the electromagnet technologies utilizing the high-temperature superconductors (HTS), the non-insulated (NI) winding technique that removes insulation between winding turns can dramatically improve thermal, electrical, and mechanical stability compared to the existing insulation method. However, technical problems arise due to current leakage, such as magnetic field charging-delay and -loss. Especially, when applying the NI technique to the field coil of a HTS synchronous motor, the output responsiveness may be degraded due to current leakage when the motor speed or load changes. Therefore, in this paper, the dynamic characteristics of a HTS motor were analyzed by changing the contact resistance of the NI field coil, which determine the current leakage. By modeling the $d-q$ equivalent circuit for a HTS motor, the motor speed, torque, field leakage current, and field voltage according to the change in d -axis current were analyzed when controlling the maximum torque operation per unit current.

Keyword: $d-q$ equivalent circuit simulation, electric ship propulsion, field leak current, NI-HTS synchronous motor

1. 서 론

저온초전도체 대비 임계성능 및 전기적/열적 안정성이 크게 개선된 고온초전도체를 전동기용 계자코일에 적용하는 연구가 현재 대체를 이루고 있다. 이러한 고온초전도체를 이용한 전자석 절연 기술 중 권선 턴간 절연을 제거한 무절연(Non-insulated, NI) 권선 기법은 턴간 절연을 제거하지 않은 절연(Insulated, INS) 권선 기법 대비 인접 턴간의 전기적/열적 접촉을 바탕으로 안정성을 획기적으로 향상시킬 수 있다 [1-3]. 하지만 전기회로상 턴간 접촉저항 성분이 병렬로 추가되기에 전자석의 절연저항이 감소하여 전류의 누설이 발생하게 된다. 이에 따라 자기장 응답 지연 문제가 발생하게 된다. 계자권선형 동기전동기의 경우 전기자와 계자 권선 사이에 전자기적 커플링으로 인해 쇄교자속이 변화할 경우 계자코일의 유도전압이 발생하고, 유도전압에 의해 발생한 전류가 계자전류의 리플을 발생시켜 전동기의 동적 특성을 저하시킨다 [4, 5]. 마찬가지로 고온초전도 계자코일을 사용하는 고온초전도 동기전동기의 경우에도 접촉저항이 존재하는 경우 유도전압으로 인해 발생한 전류가 누설되어 전동기 출력 발생 및 운전-제어상의 어려움을 초래한다 [6-8].

본 논문에서는 무절연 계자코일을 적용한 140 kW급 초전도 동기전동기 모델을 기준으로 계자코일의 턴간 접촉저항 크기 변화에 따른 전동기 출력 특성을 비교 분석하였다. 무절연 특성의 초전도 계자코일의 등가회로를 반영하여 고온초전도 동기전동기 전용의 $d-q$ 등가회로를 구현하였다. 전동기 기동 시점을 기준으로 하여 접촉저항의 크기 차이에 따른 누설전류 특성을 고려하여 전동기 동특성에 미치는 영향을 분석한다.

2. d -축 전기자 전류 변화에 의한 고온초전도 동기전동기 계자 코일의 누설전류

2.1. 고온초전도 동기전동기의 $d-q$ 등가회로 모델

권선 턴간 절연물을 완전히 제거하거나 전도성 재료를 공동으로 권선하는 무절연 계열 권선기법을 적용한 계자코일은 초전도 저항과 인덕턴스 성분만으로 구성되었던 등가회로에서 접촉저항이 병렬로 추가된 형태로 구성된다. 따라서 무절연 계자코일이 적용된 전동기는 그림 1과 같이 무절연 코일의 집중정수회로와 권선계자형 동기전동기의 $d-q$ 등가회로를 결합하여 모델링을 구현할 수 있다 [6, 7]. 본 논문에서 사용된 전동기 모델의 파라미터 사양은 표 1에 나타나 있다 [9].

* Corresponding author: jihkim@jejunu.ac.kr

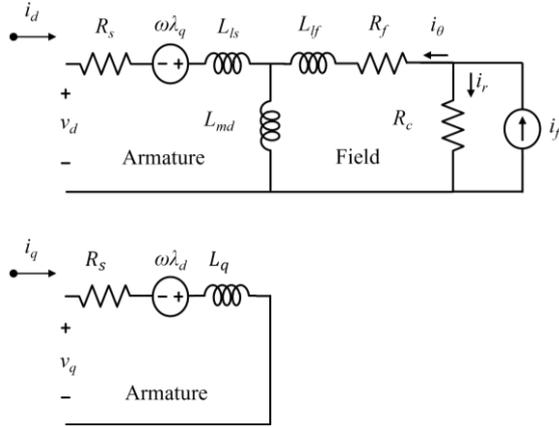


Fig. 1. d - q equivalent circuit model for high-temperature superconducting synchronous motor using non-insulated field coil.

TABLE I
SPECIFICATION OF 140 kW CLASS HIGH-TEMPERATURE
SUPERCONDUCTING SYNCHRONOUS MOTOR.

Parameters	Unit	Values
MOTOR		
Rated Power	kW	140
Rated Speed	RPM	3600
Rated Torque	Nm	375
Rated Voltage	V _{peak}	750
Rated Current	A _{peak}	180
ARMATURE WINDING		
Armature Resistance R_s	mΩ	96.5
D-axis Inductance L_d	mH	3.9
Q-axis Inductance L_q	mH	3.2
D-axis Mutual Inductance L_{md}	mH	10.1
FIELD WINDING		
HTS Field Coil Inductance, L_f	mH	34
Critical Current I_c	A	196
Critical Voltage V_c @ 1μV/cm	mV	10
n-value	-	25

고온초전도 동기전동기 모델은 소형 선박에 탑재될 목적으로 설계되었으며 선박의 프로펠러 부하를 모사하기 위해 팬부하의 속도-토크 특성을 기준으로 동특성 모델링을 하였다.

고온초전도 동기전동기의 d - q 축 전압방정식과 초전도 계자코일의 전압방정식을 정리하면 식(1)–(3)과 같다. 여기서 v_{dq} 와 i_{dq} 는 d - q 축 전압과 전류, v_f , i_f , i_c , i_r 는 계자코일의 전체 전압, 운전전류, 권선방향 전류, 누설전류이다. ω_e 는 전기 각속도를 나타내고, V_c , I_c , n 는 초전도 계자코일의 임계전압, 임계전류, n-value를 나타낸다. R_s 와 L_{dq} 는 전기자 상저항과 d - q 축 인덕턴스를 나타내고, L_{ls} 와 L_{md} 는 전기자 누설 인덕턴스와 d 축 상호 인덕턴스를 나타낸다. L_f 와 L_{lf} 는 계자코일의 자기 인덕턴스와 누설 인덕턴스, R_f 는 초전도층의 저항을 나타낸다. λ 는 계자 권선에서 발생하는 쇄교자속을 나타내고, d 축과 계자는 전자기적으로 커플링 되어 있기 때문에 L_{md} 와 i_{ϕ} 의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$v_d = R_s i_d + L_{ls} \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q + L_{md} \frac{di_d}{dt} \quad (1)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_{ls} i_d + \lambda_f) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_f &= L_{lf} \frac{di_{\phi}}{dt} + L_{md} \frac{di_{\phi}}{dt} + L_{md} \frac{di_d}{dt} + R_f i_{\phi} \\ &= L_{lf} \frac{di_{\phi}}{dt} + L_{md} \frac{di_{\phi}}{dt} + L_{md} \frac{di_d}{dt} + V_c \left(\frac{i_{\phi}}{I_c} \right)^n \end{aligned} \quad (3)$$

2.2. 고온초전도 동기전동기의 전기자-계자 상호 커플링에 의한 무절연 계자 코일측 누설전류

무절연 고온초전도 동기전동기는 전기자 d 축과 계자 회로가 전자기적으로 커플링 되어 있어 d 축 전류의 시간 변화 시 쇄교자속 변화로 인하여 계자코일에 유도성 전압을 발생시킨다 [6–8]. 식(4)와 같이 d 축 전류가 계자 축으로 유도되는 전류와 d 축 상호 인덕턴스에 흐르는 전류로 나뉘서 표현하고, i_{md} , i_c 에 의한 전압 방정식을 정리하면 식(5)와 같다. 식(5)에 식(4)를 대입하면 식(6)과 같이 정리할 수 있고, 식(6)은 d 축 전류변화에 의한 계자축 유도성 전압을 나타낸다. 식(6)을 라플라스 변환 후, i_c 에 대하여 i_r 의 전달함수를 구하면 식(7)을 도출할 수 있다. 식(7)은 유도성 전압으로 인해 초전도 계자 코일의 누설 전류를 의미하며, 여기서 $s = \delta + j\omega$ 는 라플라스 변수를 의미한다.

$$i_d = i_r + i_{md} \quad (4)$$

$$L_{md} \frac{di_{md}}{dt} = L_{lf} \frac{di_r}{dt} + R_f i_r + R_c i_r \quad (5)$$

$$L_{md} \frac{di_d}{dt} = R_s i_d + (L_{md} + L_{lf}) \frac{di_r}{dt} + R_c i_r \quad (6)$$

$$i_r = \frac{s L_{md}}{s(L_{md} + L_{lf}) + R_f + R_c} \times i_d \approx \frac{s L_{md}}{s L_f + R_c} \times i_d \quad (7)$$

식(8)과 같이 크기가 A인 d 축 전류가 $t = t_a$ 초에서 계단 함수 형태로 흐른다고 가정한다. 식(8)을 라플라스 변환하면 식(9)와 같다. 이를 식(7)에 대입하면 크기가 A인 d 축 계단 전류가 인가될 시 발생하는 누설전류는 식(10)과 같다. 식(10)을 라플라스 역변환해두면 식(11)과 같고 이는 계단 전류가 d 축 회로에 흐르는 경우 시간에 따른 누설전류를 나타낸다. 식(11)에서 알 수 있듯이 최대 누설전류의 크기는 d 축 계단 전류 크기 A와 상호 인덕턴스, 계자코일의 자기 인덕턴스 비 L_{md}/L_f 에 의해 결정되고, 발생된 누설전류가 0 A로 감소하는 시간은 코일의 시정수와 관련된 것을 알 수 있다.

그림 2는 0초에서 d 축 계단 전류 인가 시 접촉저항에 따른 누설전류의 크기를 d 축 전류 크기를 기준으로 정규화하여 나타낸다. 이때 표 1의 인덕턴스를 사용하여 해석을 진행하였다. 절연 코일을 제외한 나머지 코일의 최대 누설전류는 0.29이다. 이는 식(11)에서 알 수 있듯이 해석에 사용된 상호 인덕턴스, 계자 코일 자기 인덕턴스의 비인 0.29와 동일하고, 누설전류가 0 A로 감소하는 시간은 접촉저항이 증가할수록 시정수 L_f/R_c 가 감소하여 빠르게 감소한다. 절연 코일에서는 접촉저항의 크기가 ∞ 이므로 누설전류가 발생하지 않는다. 식(12)는 절연된 고온초전도 전동기의 전자기 토크를 나타낸다.

$$i_{\text{step}}(t) = u(t - t_a) \quad (8)$$

$$i_{\text{step}}(s) = \frac{A}{s} e^{-t_a s} \quad (9)$$

$$i_r(s) = \frac{s L_{md}}{s L_f + R_c} \times \frac{A}{s} e^{-t_a s} = \frac{A L_{md}}{s L_f + R_c} e^{-t_a s} \quad (10)$$

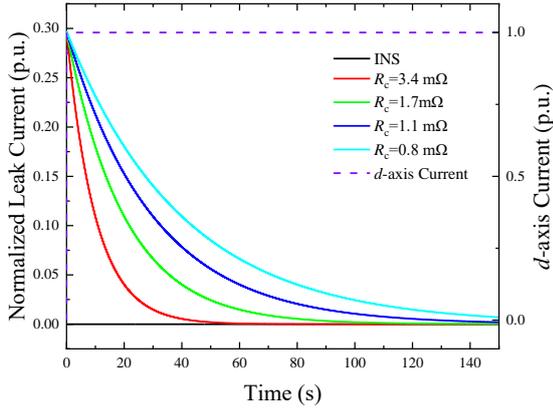


Fig. 2. Normalized leakage current in the field coil as a function of the R_c when a step current is applied to the d -axis of the armature.

$$i_r(t) = A \frac{L_{md}}{L_f} e^{-\frac{R_c}{L_f}(t-t_a)} u(t-t_a) \quad (11)$$

여기서 무절연 계자 회로의 턴 간 누설 전류를 고려한 전동기 토크는 식(13)과 같다. λ_f 은 입력 전류 i_f 와 누설 전류 i_r 의 차에 비례하므로, 턴 간 누설 전류는 전동기의 전자기 토크의 손실을 발생시킬 수 있다.

$$T_c = \frac{3P}{2} [\lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (12)$$

$$T_c = \frac{3P}{2} [L_{md}(i_f - i_r) i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (13)$$

전동기의 동특성 방정식은 식 (14)와 같다. 여기서 J , B , ω_m , T_L 은 각각 관성 모멘트, 마찰 계수, 기계 각속도, 부하 토크이다. 이때 관성모멘트는 회전자를 원통형으로 가정하여 1.346 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 으로 설정하였고 회전자 관성이 지배적이라고 가정하여 마찰 계수는 “0”으로 설정하였다. 식 (14)에서 알 수 있듯이 식 (13)과 같은 전동기 토크 손실은 전동기의 동특성에 영향을 미치게 된다.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m = T_c - T_L \quad (14)$$

3. 무절연 고온초전도 전동기 기동 특성 해석

3.1. 레이스트랙형 무절연 계자코일의 접촉저항

무절연 계열 권선기법 사용에 있어 코일의 턴간 접촉저항 (R_{ct})은 설계 파라미터로서 코일 권선 시 발생하는 권선장력 및 공동으로 권선하는 절연재료의 종류와 청결도, 거칠기, 산화도와 같은 초전도체 및 절연물의 표면 조건에 의해 결정된다 [10–16]. 일반적으로 순수 무절연의 경우 접촉저항이 가장 작으며 수~수십 $\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 의 수치를 보이며 전도성 절연물을 사용하여 공동으로 권선하는 변형 무절연의 경우 순수 무절연보다 큰 수치를 보인다 [17, 18]. 본 논문에서는 각 절연방식의 접촉저항을 대표하는 평균적 수치를 고려하여 순수 무절연의 경우 $10^2 \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$, 금속 테이프를 공동으로 권선하는 금속절연(Metal

Parameters	Unit	Values			
R_{ct}	$\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$	10^2	10^3	10^5	10^7
N	-	100			
l	mm	403			
r_{in}	mm	85			
r_{out}	mm	91.86	97.55	100	
w_d	mm	0.14	0.25	0.42	
R_c	m Ω	0.09	0.85	85.46	8331.04

d-q Equivalent Circuit

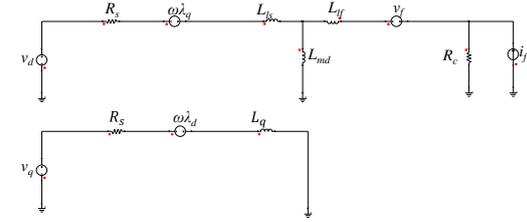


Fig. 3. Simulation model of 140 kW class HTS synchronous motor using ANSYS Electromagnetics Suite.

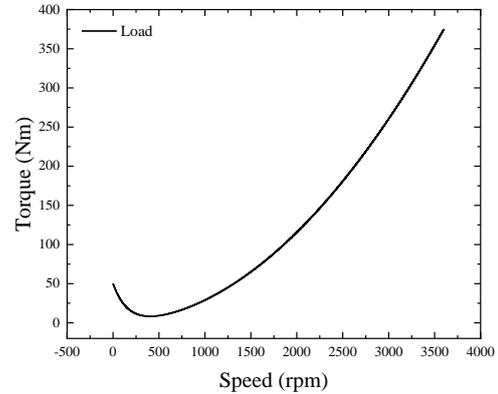


Fig. 4. Speed-torque characteristics of motor's load.

insulation, MI)의 경우 $10^3\text{--}10^5 \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$, 온도에 따라 저항 특성이 변화하는 산화 바나듐 (Vanadium trioxide, V_2O_3) 절연의 경우 $10^7 \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로 가정하였다 [19–25]. 또한 특성 비교를 위한 절연 방식의 경우 턴간 접촉저항을 ∞ 로 설정하였다. 각 절연방식의 대표 접촉저항 수치와 레이스트랙형 계자코일의 설계치를 바탕으로 식(14)를 이용하여 각 경우의 접촉저항을 계산하였으며 표 3에 계산 근거와 결과를 정리하였다. 여기서 N , n , l , w_d 는 각각 레이스트랙 코일의 총 턴수, n 번째 턴의 반지름, 직선부 길이, 선재의 두께를 의미한다.

$$R_c = \sum_{i=1}^N \frac{R_{ct}}{[(2\pi r_i) + (2l)] \times w_d} \quad (14)$$

3.2. d-q 등가회로 해석

그림 3에서 보여지는 바와 같이 ANSYS사의

Electromagnetics Suite를 이용하여 전동기 d - q 모델 및 구동 드라이브를 구현하여 접촉저항에 따른 초전도 전동기 동특성 해석을 진행하였다. 선박 프로펠러 추진용 전동기가 정지상태에서 정격속도까지 속도를 증가시키는 상황을 모사하기 위해 그림 4와 같은 팬부하의 속도-토크 특성을 기준으로 해석은 진행하였다. 이때 정격속도인 3600 rpm에서 정격토크 375 Nm를 갖는 부하토크를 식(15)와 같이 산정하였다 [26-28].

$$T_{load} = T_{rated} \times \left(\frac{n}{n_{rated}} \right)^2 \quad (15)$$

여기서 T_{load} , T_{rated} , n , n_{rated} 는 각각 부하토크, 정격토크, 전동기의 속도, 정격속도를 나타낸다.

100 초에서 정격속도인 3600 rpm을 속도 지령으로 인가하였고, 전류 제한 내에서 최대 전기자 전류 인가 및 단위 전류 당 최대토크(Maximum torque per ampere, MTPA) 제어를 통해 최고 토크를 발생시키는 d 축 및 q 축 전류값에서 제어를 수행하였다. 또한 전동기의 속도, 전류 제어는 PI 제어를 통해 제어하였다. 이때 제어기는 계자 운전전류를 피드백 하여 전기자-계자 상호인덕턴스와 계자 운전전류의 곱을 통해 쇄교자속을 계산한다. 이로 인해 제어기는 누설전류의 영향을 고려하지 않으며, dq 축 전류는 일정하게 유지된다. 고온초전도 계자코일의 접촉저항에 따른 영향만을 분석하기 위해 초전도층의 전압 V_s 가 발생하지 않는 임계전류 이하로 계자전류를 설정하였다. 임계전류의 70%($i_c=137$ A)로 계자코일이 충전된 상황을 가정하여 해석을 수행하였다.

그림 5는 고온초전도 계자 코일의 턴간 접촉저항 R_{ct} 값에 따른 고온초전도 동기전동기의 d - q 축 전류, 계자의 권선 방향 전류 및 누설전류, 전동기의 토크 및 속도를 해석한 결과를 나타낸다. 그림 5(a)에서 d 축 전류, q 축 전류는 속도지령이 인가되는 100 초에서 R_{ct} 가 10^2 , 10^3 , 10^5 , 10^7 , $\infty \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 인 모든 경우 각각 16.1, 179.2 A로 동일하다. 5 (b)에서 누설전류는 d 축 전류가 변화하는 100 초에서 발생한다. 누설전류의 최대 크기는 R_{ct} 가 10^2 , 10^3 , 10^5 , $10^7 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 인 모든 경우 4.5 A로 동일하고, $\infty \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 인 경우 0 A이다. 이는 2.2절에서 설명했듯이 계단 전류가 d 축에 인가될 때 최대 누설전류는 접촉저항과 관계없이 동일하기 때문이다. 누설전류가 0 A로 감소하는 시간은 R_{ct} 가 10^2 , 10^3 , 10^5 , $10^7 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 일 때 각각 2500, 300, 104, 100 초이다. 이러한 누설전류는 권선방향 전류를 그림 5(c)와 같이 감소시키고, 식(13)과 같이 토크를 감소시킨다.

그림 5(d)에서 R_{ct} 가 10^2 , 10^3 , 10^5 , $10^7 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 과 같이 누설전류가 발생하는 경우 누설전류가 0 A로 감소하며 토크가 정격 토크 375 Nm로 회복되고, $\infty \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 인 경우 누설전류가 발생하지 않아 375 Nm의 토크의 일정하게 유지된다. 그림 5(e)에서 지령 속도에 도달하는 시간은 접촉저항이 클수록 짧아지는데, R_{ct} 가 각각 10^2 , 10^3 , 10^5 , $10^7 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 일 때 지령 속도 3600 rpm에 도달하는 시간은 각각 2500, 300, 110, 110초이며, R_{ct} 값이 증가할수록 목표속도에 더 빠르게 도달하고 R_{ct} 가 $10^5 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 이상일 때 도달시간이 110 초 이내로 차이가 미미하다. 이는 앞서 그림 5(d)에서 전동기 토크가

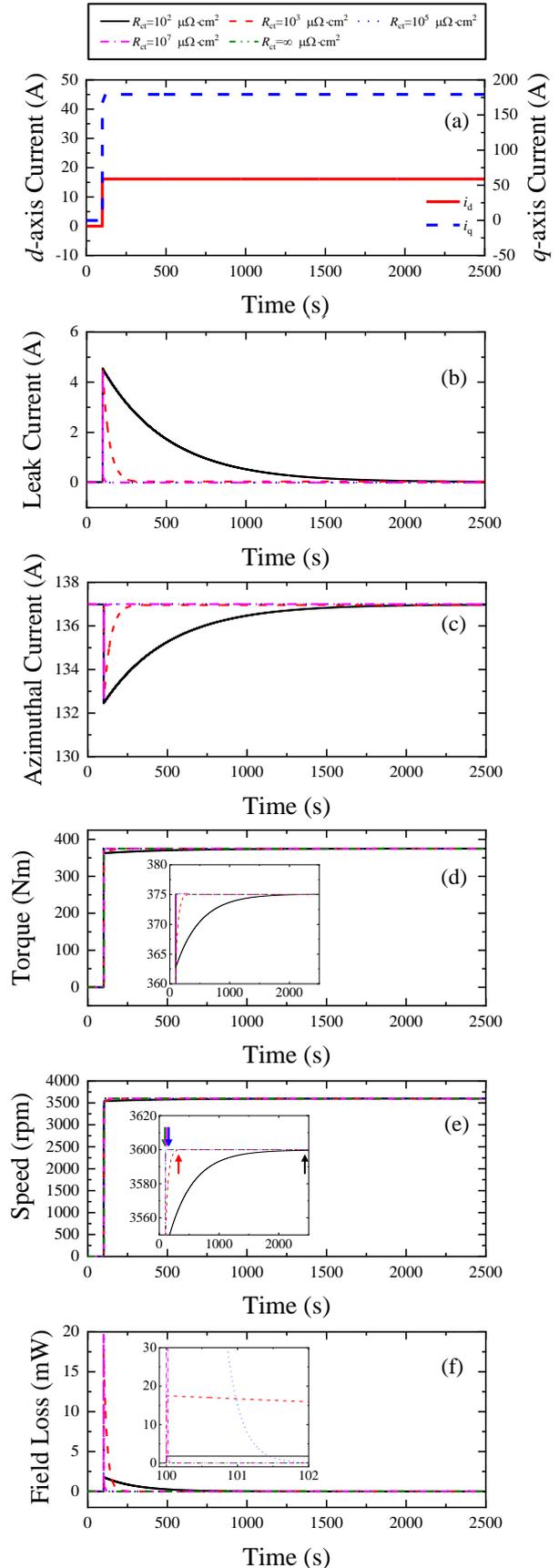


Fig. 5. Motor starting characteristics according to changes in the contact resistance of field coil; (a) d - q axis current, (b) leak current in field coil, (c) azimuthal current in field coil, (d) torque, (e) speed, and (f) loss of field coil.

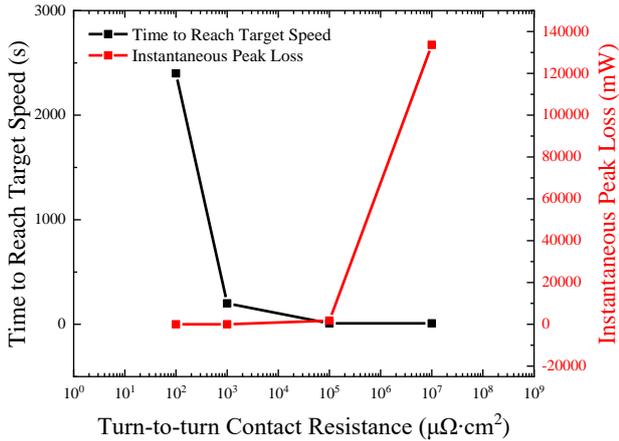


Fig. 6. Changes in the time to reach target speed and instantaneous peak loss according to R_{ct} values.

R_{ct} 가 증가할수록 d 축의 변동에 의한 누설 전류의 회복이 빠르기 때문에 누설전류가 0 A로 감소하는 시간에 큰 차이가 없는 $R_{ct}=10^5, 10^7, \infty \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 인 경우 목표속도에 도달하는 시간에 있어 차이가 미미하다.

그림 5(f)에서 계자 코일의 최대 순시 전력 손실은 초전도층의 저항과 접촉저항에서 발생하는 손실의 합으로 계산하였다. 초전도층에서 발생하는 손실은 임계전류 이하에서 해석되었기 때문에 손실이 0 W에 가깝게 계산되었고, 접촉저항에서 발생하는 손실은 누설전류의 제곱과 접촉저항의 곱으로 계산되었다. 계자 코일의 최대 순시 전력 손실은 R_{ct} 가 $10^2, 10^3, 10^5, 10^7, \infty \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 일 때 각각 1.79 mW, 17.00 mW, 1.74 W, 133.36 W, 0 W이며, 계자 코일의 총 손실 에너지는 각각 0.37, 0.37, 0.37, 0.37, 0 J으로, 접촉저항 크기가 증가할수록 최대 순시 전력 손실이 커지나 누설 전류의 회복 기간 동안의 계자 코일의 총 손실 에너지는 차이가 없다.

그림 6은 고온초전도 계자코일의 접촉저항 R_{ct} 값에 따른 전동기의 지령속도 도달시간, 계자코일의 순시 전력손실을 나타낸다. R_{ct} 값이 커질수록 지령속도 도달시간이 감소하지만, 순간적으로 발생하는 손실은 R_{ct} 값에 비례하여 증가한다. $R_{ct}=10^3 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서 지령속도 도달시간은 300 초로 급감하고, $10^5 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서는 9.63 초로 감소하지만, $R_{ct}=10^7 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서는 9.59 초로 지령속도 감소폭이 줄어든다.

4. 결론

본 논문은 고온초전도 계자코일을 적용한 동기전동기의 접촉저항을 턴간 접촉저항에 따라 변화시켜 전동기의 동특성을 비교 분석하였다. 고온초전도 동기전동기용 d - q 등가회로를 모델링하여 일반적인 선박 프로펠러와 유사한 팬 부하 조건에서 단위 전류 당 최대토크 운전 제어 시 D축 전류 변화에 따른 전동기 속도, 토크, 계자 누설전류, 계자 전압 등을 분석하였다.

고온초전도 동기전동기에 d 축 계단 전류 인가 시 발생하는 누설전류의 최대 크기는 접촉저항과 관계없이 상호 인덕턴스와 계자코일의 자기 인덕턴스 비에 비례한다. 누설전류가 0 A로 감소하는 시간은 접촉저항이 증가할수록 감소한다.

누설전류의 차이는 쇄교자속을 발생시키는 권선 방향 전류의

감소 여부와, 누설전류에 의한 쇄교자속 회복 속도의 차이를 초래하며, 이는 결과적으로 토크의 차이를 발생시켜 전동기가 목표속도에 도달하는 시간에 영향을 미친다. 또한 누설전류는 계자코일의 손실을 발생시키고, R_{ct} 값이 증가할수록 순간적인 손실이 커진다. 하지만 계자코일의 줄 손실은 R_{ct} 값에 상관없이 누설전류 크기에 따라 결정된다.

R_{ct} 값이 $10^3 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 이상에서 지령속도 도달시간은 급감하고, 10^5 과 $10^7 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 증가할수록 지령속도 도달시간 감소폭은 줄어든다. 또한 계자코일에서 발생하는 순간적인 손실은 R_{ct} 값에 비례하여 증가하므로 목표속도 도달시간과 계자코일의 순간적인 손실을 고려했을 때 R_{ct} 가 10^5 – $10^7 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 사이인 금속절연 기법 혹은 산화 바나듐 절연을 적용하는 것이 고온초전도 동기전동기의 동특성과 손실 측면에서 적절한 선택이 될 것으로 판단된다.

무절연 기법을 적용하는 경우 누설전류에 의한 전동기의 동특성 문제를 해결하기 위해서는 누설전류의 크기 최소화 및 누설전류 감소속도 증가를 위한 전기자 전류 제어 기법 또는 계자 전류 제어를 통한 누설전류 보상 기법에 대한 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by National R&D Programs through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT. (Nos. 2021R1C1C2003235 and 2022M3I9A1072846)

REFERENCES

- [1] S. Hahn, D. K. Park, J. Bascunan, and Y. Iwasa, "HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 1592-1595, 2011.
- [2] S. Hahn, D. K. Park, J. Voccio, J. Bascunan, and Y. Iwasa, "No-Insulation (NI) HTS Inserts for >1 GHz LTS/HTS NMR Magnets," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, Art no. 4302405, 2012.
- [3] J. Kim, et al., "Self-Protection Characteristic Comparison Between No-Insulation, Metal-as-Insulation, and Surface-Shunted-Metal-as-Insulation REBCO Coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 5, Art no. 4603105, pp. 1-5, 2023.
- [4] D. Y. Hwang and B. G. Gu, "Development of Field Current ripple Compensating Method by d-axis Flux-linkage in WRSM," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 67, no. 9, pp. 1165-1173, 2018.
- [5] D. Hwang and B. G. Gu, "Field Current Control Strategy for Wound-Rotor Synchronous Motors Considering Coupled Stator Flux Linkage," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 111811-111821, 2020.
- [6] Y. S. Chae, et al., "Influence of D-Q Current on No-Insulated High-Temperature Superconducting Magnets for Wound-Rotor Synchronous Motors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 3, Art no. 5201007, pp. 1-7, 2024.
- [7] J. Yoon, U. Bong, J. Cha, J. Park, and S. Hahn, "Maximum Torque Per Ampere Control Scheme Considering NI HTS Field Coil Behavior for Synchronous Motor with Salient Rotor Core," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 5, Art no. 5202305, pp. 1-5, 2023.
- [8] U. Bong, "Applicability of No-insulation High-temperature Superconductor Field Winding to Superconducting Synchronous Motor," *Diss.*, Seoul National University, 2022.
- [9] H. W. Kim, et al., "Design of a Smart Insulation Method for High-Temperature Superconducting Rotating Machines," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 3, Art no. 5202405, pp. 1-5, 2024.
- [10] H. L. Quach, et al., "Effects of stainless steel thickness and winding tension on electrical and thermal characteristics of metal insulation

- racetrack coils for 10-MW-class HTS wind generator,” *Cryogenics*, vol. 115, Art no. 103256, 2021.
- [11] K. L. Kim, et al., “Effect of winding tension on electrical behaviors of a no-insulation REBCO pancake coil,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 3, Art no. 4600605, 2014.
- [12] M. H. Sohn, K. Sim, B. Eom, H. S. Ha, H. Y. Kim, and K. Seong, “Controllability of the contact resistance of 2G HTS coil with metal insulation,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 3, Art no. 4602705, 2018.
- [13] O. J. Kwon, et al., “Effects of turn-to-turn compactness in the straight sections of HTS racetrack coils on thermal and electrical characteristics,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 8, Art no. 085025, 2013.
- [14] M. Bonura, C. Barth, A. Joudrier, J. F. Troitino, A. Fête, and C. Senatore, “Systematic study of the contact resistance between REBCO tapes: pressure dependence in the case of no-insulation, metal co-winding and metal-insulation,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, Art no. 6600305, 2019.
- [15] J. Lu, et al., “Contact resistance between two REBCO tapes: the effects of cyclic loading and surface coating,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 8, Art no. 085006, 2018.
- [16] J. Lu, et al., “Contact resistivity due to oxide layers between two REBCO tapes,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 8, Art no. 045001, 2018.
- [17] J. Kim, et al., “Effect of resistive metal cladding of HTS tape on the characteristic of no-insulation coil,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, Art no. 4601906, 2016.
- [18] K. Kim, et al., “Quench behavior of a no-insulation coil wound with stainless steel cladding REBCO tape at 4.2 K,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 7, Art no. 075001, 2017.
- [19] S. H. Lee, et al., “Effect of Conductive Metal Powder Incorporation on Vanadium Trioxide Insulation Between REBCO Tapes,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 3, Art no. 6600609, pp. 1-9, 2024.
- [20] S. H. Lee, et al., “Investigation on characteristic of vanadium trioxide insulation mixed with metal powder for rare-earth barium copper oxide coils,” *Supercond. Sci. Technol.* vol. 37, no. 8, Art no. 085012, pp. 17, 2024.
- [21] W. D. Markiewicz, et al., “Quench transient current and quench propagation limit in pancake wound REBCO coils as a function of contact resistance, critical current, and coil size,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 32, Art no. 105010, 2019.
- [22] T. Lécresse, et al., “Metal-as-insulation HTS coils,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 7, Art no. 074004, 2022.
- [23] P. Fazilleau, et al., “38 mm diameter cold bore metal-as-insulation HTS insert reached 32.5 T in a background magnetic field generated by resistive magnet,” *Cryogenics*, vol. 106, Art no. 103053, 2020.
- [24] J. B. Song, X. Chaud, F. Debray, S. Krämer, P. Fazilleau, and T. Lécresse, “Metal-as-insulation HTS insert for very-high-field magnet: A test report after repair,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, no. 6, Art no. 4300206, 2022.
- [25] H. L. Quach, et al., “Effects of stainless steel thickness and winding tension on electrical and thermal characteristics of metal insulation racetrack coils for 10-MW-class HTS wind generator,” *Cryogenics*, vol. 115, Art no. 103256, 2021.
- [26] C. Mutize and R. J. Wang, “Performanse comparison of an induction machine and line-start PM motor for cooling fan applications,” *SAUPEC 2013*, North-West University, Potchefstroom, South Africa, pp. 122-126, 2013.
- [27] A. Umeda, E. Shimizu, and O. Tsuyoshi, “Design Strategy of Battery Powered Boat and its Evaluation,” *Paper presented at the The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*, Kona, Hawaii, USA, June 2015.
- [28] H. Zhu, Z. Jiang, H. Zhao, S. Pei, H. Li, and Y. Lan, “Aerodynamic performance of propellers for multirotor unmanned aerial vehicles: Measurement, analysis, and experiment,” *Shock and Vibration*, no. 9538647, 2021.