

손실을 고려한 초전도 동기전동기 설계

Superconducting Synchronous Motor Design considering Machine Losses

백승규*, 손명환*, 김석환*, 권영길*

Seung-Kyu Baik*, Myung-Hwan Sohn*, Seog-Whan Kim*, Young-Kil Kwon*

Abstract : Superconducting synchronous generators and motors are designed based on 2 dimensional electro-magnetic approach. In the case of generator, if the machine output rating and terminal voltage are decided, the armature rating current will be decided automatically according to its power factor. However, in the case of motor, if the output rating is given with [hp] or [kW] units, the armature terminal voltage and current are not decided directly because the machine's armature input power and mechanical output are different by way of losses. So in order to calculate the armature current more accurately, the machine losses must be included in the design procedure. In this paper the machine losses of superconducting motor are analyzed and used for decision of the armature input power and current. Moreover, the differences of voltage equations between superconducting synchronous generator and motor are considered.

Key Words : superconducting synchronous machine, machine losses, voltage equation

1. 서 론

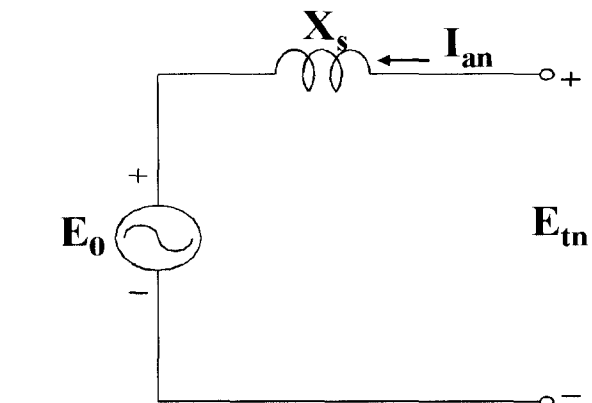
일반적으로 동기발전기의 경우에 기기의 용량과 출력전압(전기자 단자전압)이 정해지면 자연스럽게 그 부하에 따라서 전기자전류가 결정이 되므로, 이를 이용하여 설계를 하거나 그 전압방정식을 세우기에 용이하다. 반면에 전동기의 경우는, 기기의 용량이 기계적 출력으로 주어지므로 전기자에서의 전압방정식을 세우기 위해서는 전기자단자에 입력되는 전력의 크기를 고려해 주어야 정확한 입력전류가 결정이 되고 이에 따라서 전기자의 도체 단면적이 결정된다. 전기자단자에 입력되는 전력은 대부분 전동기를 구동시키는 기기의 출력으로 변환되며 나머지는 기기의 손실로 소모된다. 따라서, 이러한 기기의 손실을 정확히 산정할 수만 있으면, 전동기의 입력전력은 기기의 출력에 구해진 손실들을 합하여 구할 수 있게 된다.

본 논문에서는 초전도 동기발전기의 설계 경험을 토대로 앞서 설명한 과정을 이용한 초전도 동기전동기의

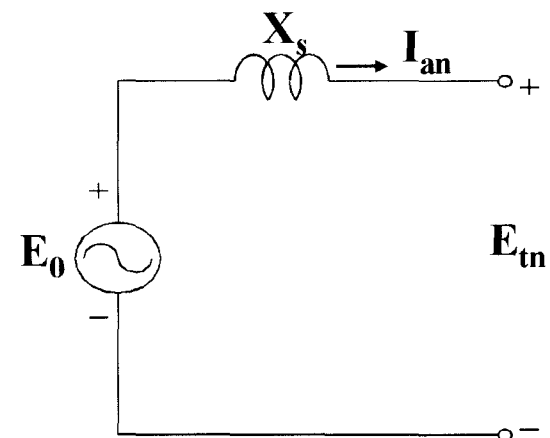
설계방법을 제안하고자 한다. 우선 동기발전기와 동기전동기의 전압방정식을 상호 비교하고, 기존의 동기전동기와는 상당히 다른 구조를 띄고 있는 초전도 동기전동기의 발생손실들을 이론적으로 접근하여 이를 고려한 설계법을 도출하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 동기기의 등가회로



(a)



(b)

그림 1. 동기기의 등가회로 (a) 전동기 기준 방향 (b) 발전기 기준 방향

Fig. 1. Synchronous machine equivalent circuits (a) Motor reference direction (b) Generator reference direction

* 정 회 원 : 한국전기연구원
 원고접수 : 2001년 10월 06일
 심사완료 : 2001년 11월 01일

동기기에서의 단자전압과 역기전력 또는 유기기전력 사이의 등가회로 및 전압방정식을 세우기위해 기준으로 잡고 있는 모델은 그림 1과 같으며, 전기자저항에 의한 전압강하는 리액턴스에 의한 전압강하보다 상당히 작기때문에 일반적으로 생략한다. 전동기의 경우는 그림의 (a)에서와 같이 전기자단자에서 보아 전력이 기기 내부로 들어가는 방향을 기준으로 하여 전기자전류 I_{an} 을 잡고, 발전기의 경우는 이와 반대로 (b)에서 보이는 바와 같이 기기로부터 전력이 출력되는 방향을 기준으로 전기자전류를 정하게 된다. 또한 전동기의 경우는 전기자단자전압이 그 역기전력과 전기자에서의 리액턴스와 저항강하에 의존하게 되며, 발전기의 경우는 유기전압 E_0 이 전원으로 작용하여 그 전기자 단자전압 E_{tm} 은 전기자에서의 리액턴스와 저항강하 분을 뺀만큼 벡터적으로 감소하게 된다. 전기자저항 성분을 무시한 동기전동기와 발전기의 기본적인 전압방정식은 아래와 같이 주어진다(1).

$$E_m \angle 0^\circ = \vec{E}_0 \pm jX_s \vec{I}_{an} \quad (1)$$

여기서, E_{tm} : 전기자 단자전압(상전압)
 E_0 : 역기전력, 유기기전력
 X_s : 동기리액턴스
 I_{an} : 전기자 상전류

식 (1)의 부호가 양(+)인 경우는 전동기의 전압방정식이 되고 음(-)인 경우는 발전기에 해당한다.

2.2. 동기기의 벡터도와 전압방정식

등가회로 모델을 바탕으로 하여 전동기와 발전기 각각에 대한 벡터도(Phasor-diagram)을 세우고, 이에 따른 전압방정식을 수식화하기로 한다. 먼저, 전기자전류 I_{an} 이 단자전압 E_{tm} 에 대하여 시간적으로 ϕ 만큼 위상이 뒤지는 경우(지상역률)에 전동기와 발전기의 벡터도를 그려보면 그림 2와 같이 나타난다. 전동기의 경우는 그림 2의 (a)와 같은 형태로 나타나며, 전압방정식에 따른 역기전력과 단자전압 간의 관계는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$E_0^2 = (E_{tm} \cos \phi)^2 + (X_s I_{an} - E_{tm} \sin \phi)^2 \quad (2)$$

또한, 계산상의 편의를 도모하기 위하여 동기리액턴스를 단위법으로 표시하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이에 따라 식 (2)를 간략히 하여 역기전력과 단자전압간의 관계는 식 (4)와 같이 정리하여 설계시 이용할 수 있다.

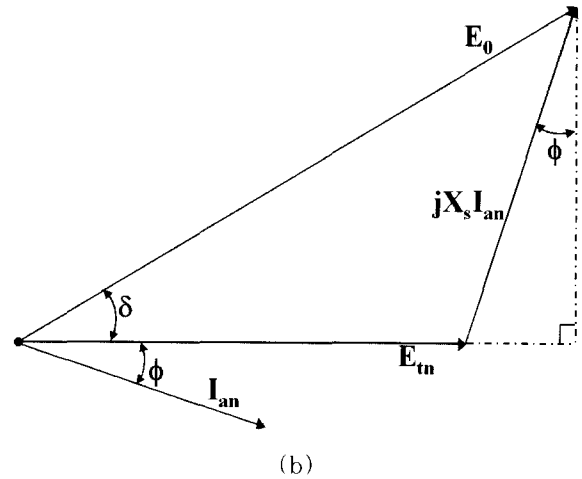
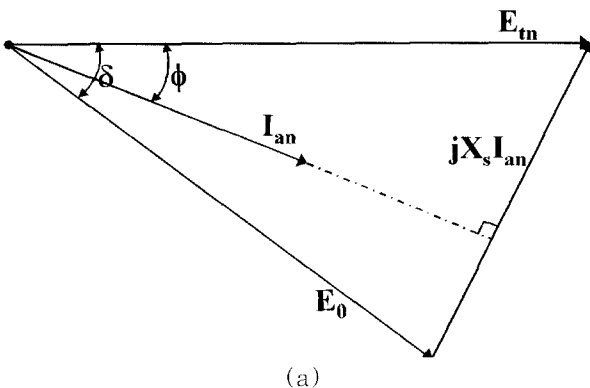


그림 2. 지상역률일 경우 동기기의 벡터도 (a) 동기전동기 (b) 동기발전기

Fig. 2. Phasor-diagrams of synchronous machine at lagging current (a) Synchronous motor (b) Synchronous generator

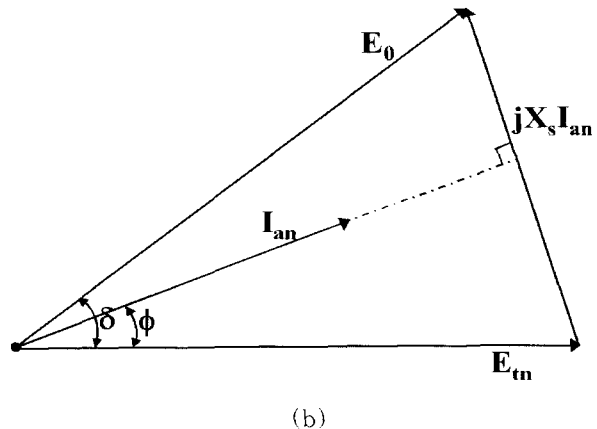
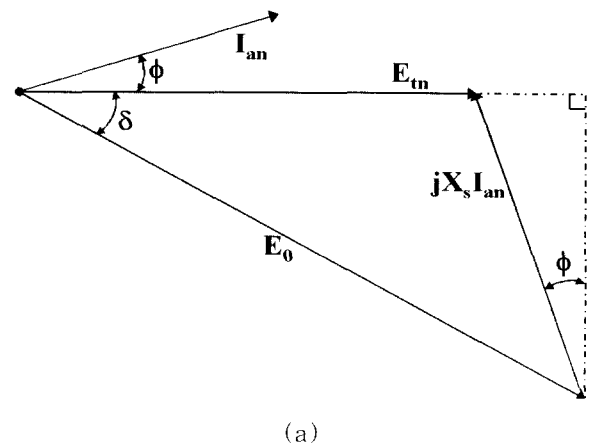


그림 3. 진상역률일 경우 동기기의 벡터도 (a) 동기전동기 (b) 동기발전기

Fig. 3. Phasor-diagrams of synchronous machine at leading current (a) Synchronous motor (b) Synchronous generator

$$X_{s,pu} = \frac{X_s I_{an}}{E_m} \quad (3)$$

$$E_0 = E_{in} \sqrt{1 - 2X_{s,pu} \sin\phi + X_{s,pu}^2} \quad (4)$$

발전기의 경우는 그림 2의 (b)를 참조하여 식 (5)와 같은 관계식을 얻을 수 있고, 이를 동기리액턴스의 단위법으로 표시하면 식 (6)와 같이 식 (4)의 음(-)의 부호만 변화시키는 형태가 된다.

$$E_0^2 = (E_{in} + X_s I_{an} \sin\phi)^2 + (X_s I_{an} \cos\phi)^2 \quad (5)$$

$$E_0 = E_{in} \sqrt{1 + 2X_{s,pu} \sin\phi + X_{s,pu}^2} \quad (6)$$

반면에, 전기자전류 I_{an} 이 단자전압 E_{in} 에 대하여 시간적으로 ϕ 만큼 위상이 앞서는 경우(진상역률)의 벡터도는 그림 3과 같이 주어진다. 이 경우에는 위에서 설명한 방식으로 그림 3을 기초로하여 수식을 세워 보면, 지상역률에서와는 달리 전동기일 경우에는 식 (6)과 같이 표시가 되고 발전기에서는 식 (4)와 같은 형태를 취하게 된다. 따라서, 동기기의 전압방정식을 고려할 때에는 전기자전류의 시간적 위상과 발전기와 전동기일 경우를 구분하여 고려해 주어야 된다.

2.3. 초전도동기기의 손실 분석

회전 전기기기에서의 손실은 전기자와 계자권선에서의 동손(I^2R Losses), 기기 철심에서의 자속밀도의 변화에 따르는 히스테리시스(Hysteresis Loss)와 와전류손실(Eddy-current Loss)로 구성되는 철손(Core Loss), 베어링 마찰(Bearing Friction)과 회전시 공기마찰에 의한 풍손(Windage)을 포함하는 기계손(Mechanical Losses)과 구리권선에서의 불균일한 전류분포와 부하전류에 따른 자속의 변형(Distortion)에 기인하는 부수적인 철손으로 구성되는 표류부하손(Stray Load Loss)으로 크게 구분할 수 있다. 이러한 구분방법을 기초로하여 초전도 동기회전기에서도 발생할 수 있는 손실들을 정량적으로 분석하여 설계시 참조하기로 한다[2][3].

(1) 전기자 동손 P_{cu} [W]

기존의 동기기에서는 계자권선의 저항에 의한 동손이 발생하지만, 초전도동기기의 경우에는 저항이 0이 되므로 무시할 수 있다. 따라서 전기자의 동손만 고려하면 된다. 전기자권선 한상의 저항 r_a 은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며, 전기자동손 P_{cu} 은 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$r_a = \frac{l_{at} N_{at}}{\sigma_a S_a} \quad (7)$$

여기서, N_{at} : 전기자권선 한상의 턴수
 l_{at} : 전기자권선 한턴의 길이[m]
 σ_a : 전기자도체의 도전율($=5 \times 10^7$ [S/m])

전기자저항이 구해지면 그 동손은 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{cu} = 3 r_a I_a^2 \quad (8)$$

(2) 기계실드(Machine Shield) 철손 P_i [W]

초전도동기기의 경우는 기기를 둘러싸고 있는 기계실드만이 철(Core)로 구성이 되므로 이 부위의 철손만 고려해 주면 된다. 일반적으로 60[Hz]에서 단위질

량당의 철손 w_i 는 4[W/kg]으로 알려져 있고, 이를 이용하여 기계실드에서의 철손 P_i 를 구하면 식 (9)와 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$P_i = \pi (R_{so}^2 - R_{si}^2) w_i \rho_m l \quad (9)$$

여기서, R_{so} : 기계실드의 외반경[m]
 R_{si} : 기계실드의 내반경[m]
 l : 기계실드의 축방향 길이[m]
 ρ_m : 기계실드의 밀도($=7.5 \times 10^3$ [kg/m³])

(3) 기계손 P_m [W]

베어링의 마찰손실 등은 정량적으로 접근하기 힘들고 그 값이 상당히 적으므로 회전자의 주변속도에 영향을 받는 풍손만 고려하면 식 (10)과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$P_m = 2 R_{do} (l_a + 0.15) v_a^2 \quad (10)$$

$$v_a = \frac{2\pi f R_{do}}{p} [m/s] \quad (11)$$

여기서, R_{do} : 댐퍼실드의 외반경[m]
 f : 주파수(60[Hz])
 p : 회전자의 pole pair 수
 l_a : 전기자권선의 축방향 유효길이[m]

회전자 주변속도 고려시 공기와 직접적으로 마찰하는 부위는 회전자 진공용기(Cryostat)의 외곽에 존재하는 구리원통의 상온댐퍼이므로 그 외반경과 축방향 길이를 고려하여 산정한다.

(4) 기계실드 표류부하손 P_{sl} [W]

기계실드에서의 자속변형으로 인한 표류부하손은 수식적으로 유도하여 구하기 어렵고, 참고자료들을 바탕으로 하여 전기자동손의 약 30(%) 정도로 잡는다[3][4].

$$P_{sl} = 0.3 P_{cu} \quad (12)$$

(5) 전기자권선 와전류손 P_e [W]

와전류 손실은 전기자도체의 소선수와 트위스트피치(Twist Pitch) 등이 주어지면 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$P_e = \frac{3}{4} \sigma_a \omega^2 B_a^2 l_p N_a p \frac{S_a^2}{\pi N_{as}} \quad (13)$$

여기서, ω : 각주파수($=2\pi f$) [rad/s]
 B_a : 전기자권선 자속평균최대자속밀도[T]
 l_p : 트위스트피치[m]
 N_a : 전기자 한상 phase-belt 의 도체수
 S_a : 전기자권선 한도체의 단면적[m²]
 N_{as} : 한도체의 분할 소선수

이상에서 구해진 손실들을 이용하여 전기자단자에 입력되는 전력 P_{input} [W] 은 식 (14) 같이 구할 수 있으며, 이에 따라 전기자전류가 결정이 되고 도체의 형태를 설계할 수 있게 된다.

$$P_{input} = P_{out} + (P_{cu} + P_i + P_m + P_{sl} + P_e) \quad (14)$$

여기서, P_{out} : 전동기출력[W]

3. 설계 적용

초전도동기기의 경우, 기존의 동기기와는 달리 설계를 위한 전자장해석의 수식적인 접근이 가능하다. 이것은 철심을 사용하지 않고도 고자장을 발생시킬 수 있는 초전도체의 특성으로 기기의 내부를 공심형으로 제작할 수 있고, 전기자 및 계자권선과 최외각의 기계실드를 2차원 원통좌표계에 적합하게 배치시킬 수 있기 때문이다[5][6]. 이렇게 되면 전자장분포를 해석적으로 유도할 수 있으며 이를 이용하여 기기의 크기와 형태를 결정할 수 있게 된다. 따라서, 초전도발전기나 전동기 모두 동일한 전자장해석 방법에 기초를 두어 설계가 되고, 단지 앞에서 설명한 전압방정식과 손실 부분들만 차이를 두어 고려하면 될 것이다.

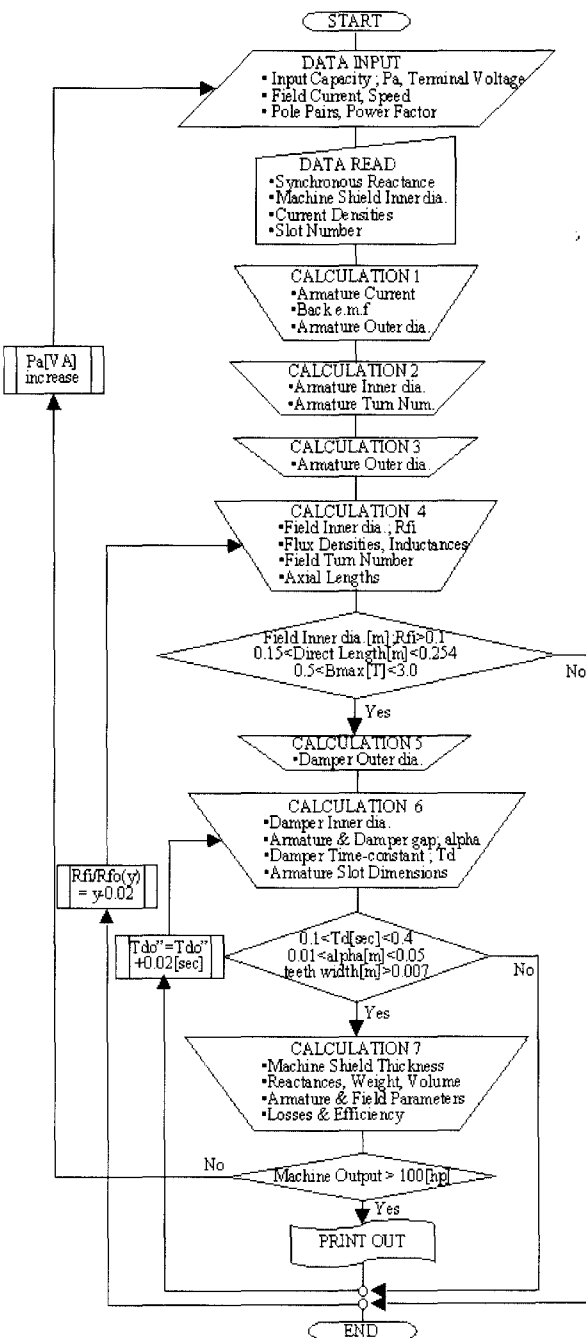


그림 4. 설계프로그램의 순서도
Fig. 4. Flow-chart of Design Program

이상에서 설명한 방법을 이용하여 100[hp] 급의 고온초전도 동기전동기를 설계해 보기로 한다. 설계시 사용한 프로그램은 당 그룹에서 개발한 경험이 있는 30[kVA] 급의 저온초전도 발전기와 3[kW] 급의 고화질소냉각형 고온초전도 발전기의 설계에 사용한 것으로서 앞에서 고려한 내용들을 포함시켜 전동기의 설계에 이용하였다[7][8][9]. FORTRAN90 으로 짜여진 전체적인 설계프로그램의 순서도는 그림 4와 같으며, 전동기의 입력 Pa[VA]를 조정하여 그 출력이 100[hp] 이상이 되도록 하였다. 대상전동기(FRONTIER 100[hp])의 사양 및 프로그램 결과에 따른 설계치를 표 1에 정리하였으며, 미국에서 SPI(Superconductivity Partnership Initiative) 계획의 일환으로 Reliance Electric 에서 개발한 125[hp] 전동기와 비교하였다[10][11].

표 1. 대상 고온초전도 동기전동기의 설계 사양
Table 1. Design specifications of HTS synchronous motor

	FRONTIER 100[hp]	SPI 125[hp]
Pole Number	4	4
Speed	1,800[rpm]	1,800[rpm]
Designed Rated Load Efficiency	97[%]	91[%]
Designed HTS Winding Peak Field	1.1[T]	0.7[T]
Conductor Cross Section(thick. x width)	0.25 x 3 [mm] (NST)	0.254 x 2.54 [mm] (ASC)
Field Winding Operating Current Density	60.6[A/mm ²]	63[A/mm ²]
Operating Field Current	46[A]	40.6[A]
Field Winding Operating Temp.	27~33[K]	27[K]
Machine Outer Radius	263[mm]	≃ 290[mm]
Field Coil Shape	Racetrack	Racetrack
Field Coil Outer Radius	144[mm]	≃ 135[mm]
Field Coil Inner Radius	107[mm]	≃ 90[mm]
Field Coil Axial Direct Length	245[mm]	254[mm]
Field Coil Turn Number	7902	7728
Field Coil Length	≃ 6500[m]	5,200[m]
Coil Manufacturing (BSCCO-2223)	React & Wind	Wind & React

고온초전도 레이스트랙(Racetrack) 형의 계자코일은 고화질소를 냉매로 하는 시험용 소형 발전기의 제작과정에서 더블판케이크(Double-pancake)형 코일과 코일의 정지시 극저온 통전시험을 행한 바가 있으며, 그 과정에서 얻어진 코일의 동작전류 및 선재 이용량 등을 바탕으로 위의 설계를 행하였다. 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 기기의 전체적인 크기를 결정하는 기계실드 외반경(Machine Outer Radius)과 계자코일의 축방향 직선부길이(Field Coil Axial Direct Length) 등이 우리가 설계하고자 하는 전동기가 SPI의 전동기보다 작음을 확인할 수 있었다.

앞에서 설명한 손실 계산방법을 설계프로그램에 포함시켜 각각의 손실을 계산한 결과 100[hp] (74600[W]) 이상의 출력을 얻기위해 필요한 전기자 입력 P_{input} 은 78500[W] 정도가 되어야하며, 이때의 손실 P_{cu} 은 821[W], P_i 은 676[W], P_m 은 159[W], P_{st} 은 246[W], P_e 은 456[W]을 얻었으며, 이들을 합한 총손실은 2359[W]가 되었다. 이에

따른 기기의 효율(냉동시스템의 입력 제외)은 97[%] 정도가 되었으며 계산된 기기의 출력 P_{out} 은 76140[W]로서 이는 102[hp] 정도가 된다. 산정되지 않은 기타손실을 고려한다면 이 값은 적당하리라 예상된다. 대상 고온초전도 동기전동기는 그 역률($\cos \phi$)을 1로 설정하여 산정하였으므로 식 (4)와 (6) 모두 $\sin \phi$ 항이 0이 되어 전동기와 발전기 모두 동일한 전압방정식을 얻게 되므로, 설계된 고온초전도 동기전동기를 출력 78500[W]의 고온초전도 동기발전기로 운전시킬 수 있다. 따라서, 이 전동기와 발전기의 출력차이는 기기의 손실에 해당될 것이다.

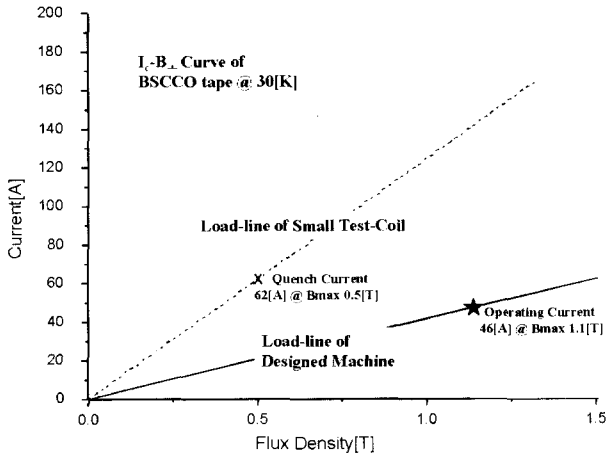


그림 5. 고려된 선재의 임계전류특성과 부하곡선
Fig. 5. Critical Current vs Flux Density of the BSCCO-2223 Tape and Load-lines

BSCCO-2223 테이프형 고온초전도 선재를 이용하여 전동기의 계자코일을 제작할 경우에, 선재가 갖는 고유의 임계전류(I_c) 특성보다 훨씬 낮은 전류에서 켄치가 일어남을 확인할 수 있다. 이는 레이스트랙형 계자코일의 구조에 따른 단부에서의 굽힘응력과 코일 여자시 선재가 받는 전자력 등에 기인한다. 대상 전동기의 설계에 고려된 선재는 NST(Nordic Superconducting Technologies)에서 제작된 Bi(Pb)-2223 테이프로 77[K], 0[T]에서 임계전류값이 32[A] 정도를 갖으며, 설계 전동기의 동작온도인 30[K]에서는 테이프면에 수직으로 작용하는 자장(B_{\perp})에 대해 그림 5와 같은 특성을 갖는다. 실제로 3[kW] 급의 저용량 고온초전도 발전기의 레이스트랙 코일을 더블팬케이프 형태로 부분적으로 권선한 후 코일들을 Lap-Joint 하여 4극의 계자코일로 최종 조립하여 액체질소 온도 (77[K])에서 켄치전류를 측정된 결과 그 값은 12[A] 정도를 갖었고, 계자코일 한극(Small Test-coil)을 30[K]에서 실험한 결과 그림 5의 점선에서 볼 수 있는 바와 같이 그 동작전류 46[A]를 훨씬 초과하는 62[A] 정도의 켄치전류를 얻었다. 이 때의 코일에 작용하는 최대자속밀도 B_{max} 는 0.5[T] 정도였으며 이는 B_{\perp} 이 0.5[T]일 경우의 선재 임계전류값의 약 40[%]에서 켄치가 일어난 것이다. 이 값을 토대로 대상 전동기의 경우도 표 1에서와 같이 그 동작전류를 B_{\perp} 이 계산된 최대자속밀도 1.1[T]에 해당하는 선재 I_c 의 40[%] 이하로 하여 46[A] 정도로 설정하였다. 제작된 계자코일(Small Test-coil)에서는 BSCCO 선재가 굽혀지는 곡률반경이 최소 16[mm] 정도이지만, 100[hp](74.6[kW]) 급에서는 이보다 훨씬 커지기 때문에 굽힘응력에 따른 켄치전류의 감소가 줄어들어 더 높은 켄치전류값을 가질 것으로 기대가 된다.

4. 결 론

초전도 전동기의 큰 장점 중의 하나인 기기의 소형화는 초전도선재의 고전류밀도의 통전능력에 기인하는 고자장의 발생으로 기기에 강자성재료를 사용하지 않고도 전기자코일과 충분한 상호작용으로 전자력을 일으킬 수 있기 때문이다. 따라서, 이러한 초전도선재가 계자코일로 권선되어 향상된 통전능력을 지닐수록 더욱더 작고 가벼운 기기를 제작할 수 있게 된다. 초전도 동기전동기는 초전도 동기발전기와 동일한 전자기적 접근법을 통하여 설계할 수 있으며, 동기발전기와 동기전동기의 전압방정식과 그 전기·기계적인 입출력만 고려하면 발전기와 전동기를 구분하여 더욱더 정확하게 설계 및 기기의 파라미터들을 도출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

특히, 고온초전도 계자코일의 경우는 사용되는 테이프형 선재에 작용하는 자장의 방향이 테이프면에 수직할 때에 가장 심하게 그 통전능력이 떨어지기 때문에, 이 경우를 기준으로하여 코일의 동작전류를 결정하여 보았다. 이러한 고온초전도 선재의 자장방향 의존성에 따른 코일의 동작전류 결정은 향후 더욱더 심도있는 연구가 필요할 것으로 고려된다.

참 고 문 헌

- [1] Vincent Del Toro, "Basic Electric Machines", Prentice-Hall International Editions, pp.224~302, 1990.
- [2] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "ELECTRIC MACHINERY", McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, Fifth Edition, pp.570~573, 1991.
- [3] Ishishita Teruo, Itsuya Muta(supervisor), "Design and fault current simulation of a 30kVA superconducting generator", MS degree thesis at department of electrical engineering of Kyoto university, pp.23~24, 1998.
- [4] Recharad D. Blaughner, "Low-calorie, high-energy generators and motors", IEEE SPECTRUM, JULY 1997.
- [5] James L. Kirtley, and Frederick J. Edeskuty, "Application of Superconductors to Motors, Generators, and Transmission Lines", Proceedings of the IEEE, VOL.77, NO.8, pp.1143~1154, AUGUST 1989.
- [6] 백승규, 권영길, 손명환, 류강식, "초전도발전기의 2차원 자계해석에 관한 연구", 대한전기학회 창립 50주년 하계학술대회 논문집(EMP46), pp.273~275, 1997.
- [7] S.K. Baik, M.H. Sohn, D.Y. Park, J.B. Ahn, Y.K. Kwon and K.S. Ryu "A 30kVA Superconducting Generator Development and Basic Tests", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL.10, NO.1, pp.947~950, MARCH 2000.
- [8] 백승규, 장현만, 손명환, 권영길, 류강식, 조영식, "초전도 동기기용 BSCCO-2223 계자코일의 설계 및 제작", 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문

집, pp.104~107, 2001.

[9] 조영식, 홍정표, 이주, 심기덕, 손명환, 권영길, 류강식, "고체질소 냉각 고온초전도 동기기용 회전자의 온도특성", 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp.95~97, 2001.

[10] J.P. Voccio, B.B. Gamble, C.B. Prum, H.J. Picard, "125HP HTS Motor Field Winding Development", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL.7, NO.2, pp.519~522, JUNE 1997.

[11] R.F. Schiferl, B.X. Zhang, D.I. Driscoll, B.A. Shoykhet, "DEVELOPMENT STATUS OF A 125 HORSEPOWER SUPERCONDUCTING MOTOR", Advances in Cryogenic Engineering, Vol.42, pp.977~984, 1996.

저 자 소 개



백승규(白承珪)

1972년 11월 19일생, 1995년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 연구원



손명환(孫明煥)

1963년 4월 21일생, 1986년 부산대학교 물리학과 졸업, 1988년 동대학원 물리학과 졸업(이학석사), 1998년 동대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



김석환(金錫煥)

1964년 1월 12일생, 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1993년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1993년 기초전력공학 공동연구소 연구원, 1994~1996년 일본 고에너지 물리학 연구소 연구원, 1997~1999년 유럽 CERN 연구소 연구원, 2000~2001년 미국 Fermi 연구소 연구원, 현재 한국전기연구원 선임연구원



권영길(權永吉)

1959년 7월 28일생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1990년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1990년~1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 그룹장