

댐퍼의 두께와 재질 변화에 따른 초전도 선재에 미치는 자장특성 분석

Analysis of Magnetic Field of Superconducting Winding According to the Changed Damper Thickness and Material

정재식¹, 이상호¹, 홍정표^{2,*}, 조영식³

Jae-Sik Jeong¹, Sang-Ho Lee¹, Jung-Pyo Hong^{2,*}, and Young-Sik Jo³

Abstract: Superconducting windings of synchronous machine have to be operated in below the critical temperature, critical current density and critical magnetic field. If one of these characteristics does not satisfied, then the quench occurred in superconducting winding. Especially the armature current dramatically increased as the superconducting generator is short-circuited at the rated load condition and magnetic field in field winding increased due to the armature current. Therefore, damper is required to reduce the magnetic field of field winding which increases reliability of the superconducting generator. Damper dimension can be decided by time constant[1-2]. In this paper the basic model is high-power and low-speed superconducting generator. Damper time constant was calculated from the changed damper thickness and material. Magnetic flux of field coil at the basic model and changed damper time constant model is analyzed.

Key Words: superconductor, magnetic field, damper, damper time constant

1. 서 론

생활 수준 향상과 산업의 발전으로 국내의 전력 사용량은 해마다 증가하고 있다. 그러나 화석연료의 고갈과 에너지 소비변화에 따른 에너지 부족 문제가 사회적인 문제가 되고 있으므로 전기기기의 효율 향상에 많은 연구가 필요하다. 전기기기의 효율 향상을 위해서는 기기의 대형화가 필요하지만, 대형화는 동기리액턴스의 증가로 제약이 존재한다. 그러므로 계자에 높은 전류밀도를 사용할 수 있는 초전도 기기가 검토되고 있고 초전도 기기를 사용함으로써 기존의 상전도기기에서 실현하기 불가능한 대용량 기기를 구현할 수 있고 효율을 향상할 수 있다.

초전도 선재는 선재의 자장, 온도, 전류밀도 3가지 특성을 모두 만족하며 운전되어야 하고 이러한 특성을

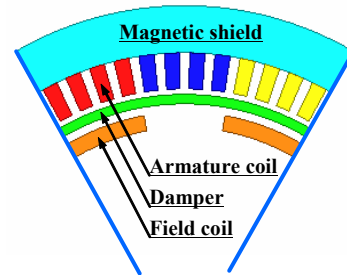


Fig. 1. Cross-Section View of Analysis Model.

하나라도 만족하지 못하면 초전도 선재에 Quench가 발생하여 초전도 성질을 잃어버린다. 그러므로 초전도 기기 설계 시 온도조건과 전류밀도 조건을 만족하도록 설계가 되어 있어도 운전 중 발전기의 외란인 부하의 변화나 진동기에서 토크의 변화가 생기면 초전도 선재에 미치는 자장이 크게 변하여 퀘치가 발생함으로 외란에 의한 자장을 감소시켜야 한다. 그러므로 외란에 의한 영향을 감소시키기 위해서 댐퍼를 설치하고 댐퍼의 재질과 두께에 따라서 운전 중 초전도 선재에 미치는 자장의 최대값을 조절할 수 있다.

본 논문에서는 수식적인 접근법을 이용하여 기기를 설계하고(Table 1) 설계한 모델을 맥스웰을 이용한 유한 요소해석을 통한 상세설계를 하여서 모델을 선정하였고 선정한 모델을 기준으로 댐퍼의 두께와 재질을 변화시키며 초전도 선재의 자기적 특성해석을 하였다. 해석조건은 회전자는 정격속도로 회전하고 전기자 권선에서 가장 많은 자장을 발생하는 3상 단락이 발생하였을 때 과도해석을 하였다. 과도상태 해석은 수식적인 방법을 통하여 얻은 저항과 인덕턴스로 맥스웰 툴을 이용하여 외부회로에 연결하여 해석을 수행하였다.

Table 1. Parameters and design result of 5MW the super-conducting generator).

출력		5 [MW]
정격속도		213 [rpm]
단자전압		6600 [V]
선각 유기기전력 (@213rpm)		6293 [A]
효율		97 [%]
전기자권선	상당직렬턴수	168 [turns]
	정격전류	460 [A]
	상 저항	155 [mohm]
	동기 리액턴스	0.242 [p.u.]
	역률	0.97
계자권선	극당턴수	3040 [turns]
	초전도 선재량	62.0 [km]
	냉각온도	35 K

¹학생회원 : 한양대학교 자동차공학과

²정 회 원 : 한양대학교 미래자동차공학과

³정 회 원 : 한국전기연구원

*교신저자 : 한양대학교 미래자동차공학과

원고접수 : 2012년 07월 31일

심사완료 : 2012년 09월 19일

게재확정 : 2012년 09월 19일

2. 본 론

2.1. 해석모델

해석모델은 5MW급 계자공심형 초전도 동기발전기로 모델 설계시 초전도 선재의 길이와 부피를 고려하여 최적의 극수와 축방향 길이 회전자 직경을 결정하였다. 회전자의 직경은 1226mm이고 축방향 길이는 1089mm이며 해석모델의 형태는 (Fig. 1)과 같다. 전기자와 댐퍼의 사이의 공극을 기준으로 회전자와 고정자로 나누고 해석시간을 줄이기 위해서 반주기 1/6 모델로 하여 해석하였고 구조는 magnetic shield, 전기자, 댐퍼, 계자권선으로 구성되어 있다.

5MW발전기 사양은 (Table 1)과 같으며 발전기의 특 성상 저속/고토크의 운전특성이 요구되고 운전온도는 35K이고 임계전류 보다 낮은 전에서 동작전류를 결정하였고 동작전류는 100A이다. 초전도 발전기의 상 당 직렬턴수는 168turn이다.

계자로 사용되는 초전도 선재는 펜케익 형태이지만 해석상의 편의를 위해 같은 성능을 가지는 원통 형태로 놓고 해석을 진행하였다. 초전도 선재는 (Fig. 1)의 계자권선 영역에서 안쪽부터 차례로 권선이 감겨 있는 형태이다.

2.2. 댐퍼설계

초전도 발전기 사용 중 부하변동과 3상 단락과 같은 외란이 발생하면 전기자 전류가 급격하게 증가한다. 그리고 큰 전류에 의해서 발생한 자속은 초전도 선재에 영향을 준다. 전기자에서 발생한 자속이 증가하여 초전도 선재의 제한값 보다 커지게 되면 Quench가 발생하여 초전도 선재의 성질을 잃어버려 큰 전류가 흐르는 도체에 저항이 생겨 온도가 높아져 사용할 수 없게 된다. 이처럼 전기자 전류에 의해서 발생하는 자장의 영향을 줄이기 위하여 설계단계에서 댐퍼의 재질과 두께가 고려된다.

댐퍼의 재질과 두께를 설계단계에서 고려하기 위해 댐퍼시정수가 사용된다[1-2]. 댐퍼의 저항과 댐퍼의 셀프 인덕턴스는 다음과 같이 산정한다.

$$R_D = \frac{\pi}{\sigma t r_D} \left(\frac{N_D k_{wD}}{\pi} \right)^2 [\Omega m^{-1}] \quad (1)$$

$$L_D = 2\mu_0 \frac{\pi}{p} \left(\frac{N_D k_{wD}}{2\pi} \right)^2 \left\{ 1 + \left(\frac{r_D}{r_x} \right)^{2p} \right\} [Hm] \quad (2)$$

저항과 인덕턴스로 시정수를 산정한다.

$$T_d = \frac{\mu_0 r_D t \sigma}{2p} \left\{ 1 + \left(\frac{r_D}{r_x} \right)^{2p} \right\} [s] \quad (3)$$

여기서 R_D 는 댐퍼저항을, L_D 는 댐퍼 인덕턴스, T_d 는 댐퍼 시정수, σ 는 댐퍼의 도전율, t 는 댐퍼의 두께, r_D 는 댐퍼의 중 심반경, N_D 는 댐퍼를 농형으로 보았을 때 도체수, k_{wD} 는 댐퍼를 농형으로 보았을 때 권선계수, μ_0 는 공기의 투자율, p 는 극쌍수, r_x 는 고정자 내반경 이다. 실린더 형태의 댐퍼를 수 식적으로 표현 하기위해 농형으로 가정하여 원통형태의 댐퍼구조물의 저항과 인덕턴스를 구하여 댐퍼의 시정수를 산정한다.

Table 2. Condition of Field Flux Analysis Model.

분류	시정수[s]	도전율[σ/m]	두께[mm]
Model(1)	0.05	2.7×10^7	9.9
Model(2)		2.0×10^7	13.3
Model(3)	0.1	2.7×10^7	18.8
Model(4)		2.0×10^7	26.6
Model(5)	0.15	2.7×10^7	29.6
Model(6)		2.0×10^7	40.0

본 논문에서는 (Table 2)와 같이 도전율이 서로 다른 두 종류의 알루미늄 합금을 사용하여 해석하였고 댐퍼의 두께를 변화시켜 시정수 0.15s, 0.1s, 0.05s의 모델을 해석하고 분석하였다.

2.3. 해석 방법 및 결과

해석은 단락 전후 정격속도로 회전하고 계자 전류 또한 단락과 관계없이 초전도 선재에 180A를 흘려주었다. 그리고 전기자에서 자장이 가장 많이 발생하는 3상 단락 시 초전도 선재에 미치는 영향을 보기 위해서 해석모델에 외부회로를 연결하여 A상이 최대값을 가지는 순간 단락을 시켰고 이때 (Fig. 2)와 같은 전류 파형을 가진다. 그리고 단락 전후의 초전도 선재에 미치는 유한요소법을 통하여 해석하였다.

전기자는 저항과 인덕턴스로 등가화 할 수 있고 저항과 인덕턴스로 3상 단락이 발생 시 과도상태를 표현 할 수 있다. 이때 과도상태를 직류성분과 교류성분으로 분류할 수 있다. 교류성분은 기기가 동기속도로 회전하므로 전기자에서 발생하는 교류성분의 전류에 의해 발생한 자장은 회전자에 직류성분의 자장이 영향을 미친다. 그리고 전기자의 직류성분의 전류는 회전자에 교류성분의 자장으로 영향을 미친다. 그러므로 회전자에 미치는 교류성분의 자장에 의해서 (Fig. 3)에서 보는 수직자장의 overshoot이 발생하게 된다. 그리고 점차 시간이 지나 직류성분만 남게 되는데 이때 정상상태의 1.2[T]가 된다. 저항과 인덕턴스에 의한 시정수의 영향으로 정상상태로 초전도 선재 특성으로 선재의 수직자장 보다 낮은 자장에서 운전되어야 한다. 그러므로 overshoot에 의해 생긴 최대값 보다 낮은 자장에서 운전되어야 기기의 신뢰성을 높일 수 있다.

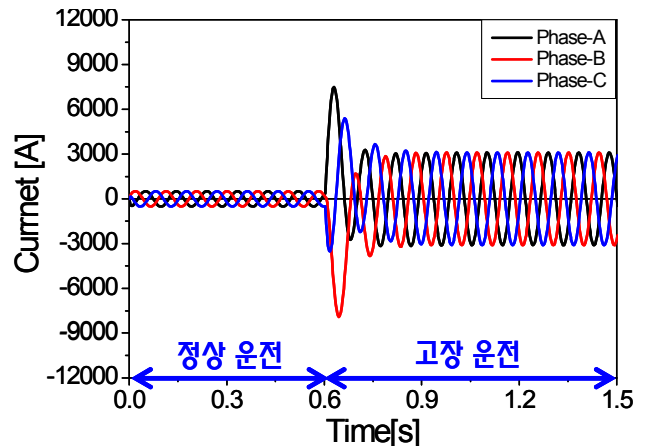


Fig. 2. Armature Current.

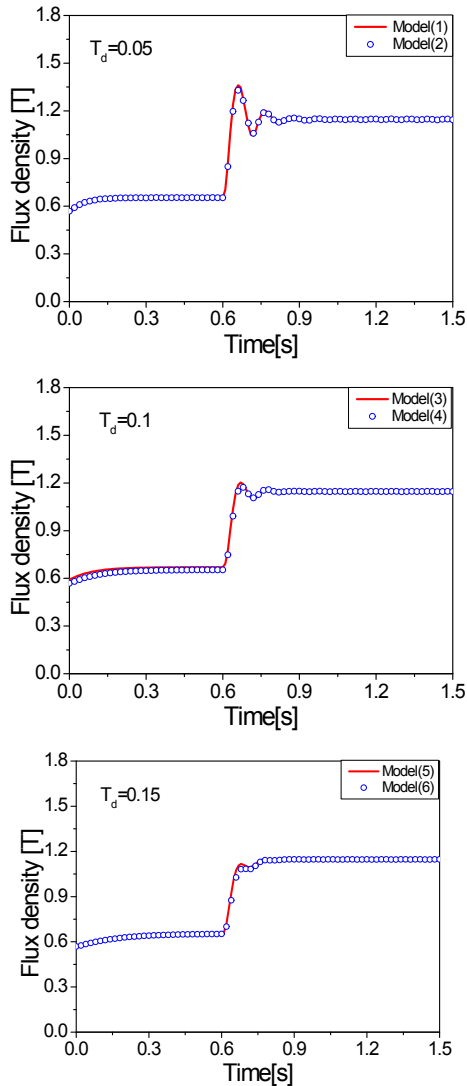


Fig. 3. Perpendicular Magnetic Flux Density.

(Fig. 3)의 윗부분의 그래프는 댐퍼의 도전율이 다른 두 모델의 두께를 변화시켜 시정수가 0.05s, 0.1s, 0.15s로 일정하게 하여서 해석하였고 해석위치는 초전도 선재의 수직자장의 변화가 가장 많은 부분의 자장을 해석하였다.

해석결과 시정수 0.05s의 도전율이 다른 두 모델의 overshoot에 의한 최대값은 1.361과 1.325로 오차는 2.6%이고 시정수가 0.1s의 도전율이 다른 두 모델의 overshoot에 의한 최대값은 1.200과 1.173으로 오차는 2.3%이다. 그리고 시정수가 0.15s의 도전율이 다른 두 모델의 overshoot에 의한 최대값은 1.117과 1.082 오차는 3.1%이고 overshoot에 의한 최대값보다 단락이후 정상상태일 때 최대값이 더 크다.

3. 결 론

본 논문에서 5MW 발전기의 초전도 선재에 미치는 자장특성을 댐퍼의 도전율과 두께를 변화시켜 시정수별로 검토하여 보았다. 초전도 선재에 미치는 자장특성은 초전도 선재의 신뢰성에 큰 영향을 주는 수직자장을 보았다.

수직자장은 시정수별로 보았을 때 시정수가 작을 때 overshoot이 가장 크므로 댐퍼의 재질이 같을 때 댐

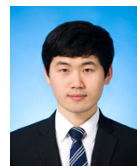
퍼의 두께가 작으면 전기자에서 발생한 자장이 초전도 선재에 미치는 영향이 크다. 그리고 본 논문에서 두 종류의 도전율이 서로 다른 알루미늄 합금을 댐퍼로 사용하여 해석하였고 도전율이 클수록 전기자에서 발생한 자장에 의해 전류가 잘 흐르기 때문에 해석결과 시정수가 같은 모델을 비교하면 도전율이 큰 모델은 두께는 줄었지만, overshoot에 의한 최대자장 값의 오차는 2.6%로 같다. 그러므로 댐퍼의 두께와 도전율이 클수록 단락 시 전기자에 의한 초전도 선재의 영향을 줄일 수 있다. 이러한 결과를 종합하여 보면 댐퍼에 의해서 전기자에서 초전도 선재에 미치는 자장의 영향을 댐퍼시정수로 나타낼 수 있고 초전도 발전기 초기 설계시 초전도 선재의 신뢰성을 높여 설계할 때 신뢰할 만한 기준이 될 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 quench현상을 피하고자 전류밀도와 온도 자장의 제한조건이 만족하면서 운전되어야 한다. 그중에서 본 논문에서는 자장의 제한조건인 수직자장에 의한 영향을 댐퍼시정수를 기준으로 표현하였다. 그리고 초전도 선재는 수직자장 뿐만 아니라 일반 도전체에서 자장의 변화가 생길 때 와전류가 발생하는 것과 같이 초전도 선재에도 변화하는 자장에 의한 와전류의 영향이 존재한다. 앞으로 연구목표는 이러한 시정수의 영향을 토대로 초전도 발전기 설계시 초전도 권선에 따른 기준을 연구할 것이다. 그리고 단락시 발생하는 댐퍼의 와류에 의한 손실에 대해서 연구 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] NAOKI MAKI, "Practical Design of Superconducting Generator-Electrical characteristics Equations", Electrical Engineering in Japan, Vol. 114, No. 1, 1994.
- [2] P.J. Lawrenson and T.J.E. Miller and J.M. Stephenson, "Damping and screening in the synchronous superconducting generator", Presented at PROC. IEE, Vol. 123, No. 8, AUGUST 1976.

저 자 소 개



정재식 (鄭在植)

1985년 06월 19일생, 2011년 명지대학교 전기공학과 졸업, 2011년~현재 한양대학교 자동차공학과 재학 (석사과정).



이상호 (李相浩)

1980년 02월 20일생, 2004년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2006년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2007년~현재 한양대학교 자동차공학과 재학 (박사과정).



홍정표(洪正杓)

1959년 04월 17일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1985~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임 연구원, 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합 연구소 선임 연구원, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년~2006년 창원대학교 전기공학과 부교수, 2006년~2010년 한양대학교 기계공학부 교수, 2010년~현재 한양대학교 미래자동차공학과 교수, 2002년~현재 IEEE Senior member.



조영식(曹永植)

1970년 08월 20일생, 1997년 창원대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동대학원 전기전자제어공학과 졸업(공학석사), 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2002년~2003년 창원대학교 시간강사, 2003년~2004년 Kyoto University Post-doc, 2004년~2011년 차세대초전도 응용기술개발사업단 기술 팀장, 2011년~현재 한국전기연구원 선임연구원.