

차동기 공진현상에서 터어보 발전기 회전자의 전기적 특성과 Wedge의 영향

李 殷 雄 李 敏 明 金 一 中
 忠南大學校 大田工業大學 忠南大學校

The Effect of Wedges and the Electrical Characteristics of the Turbo-generator Rotor of SSR Phenomena

Lee, Eun Woong Lee, Min Myung Kim, Il Jung
 Chungnam Nat. Univ. Daejon Nat. Tech. Chungnam Nat. Univ.

Abstract

This paper is analyzed the electrical characteristics of the round solid rotor of turbo-generator without damper cage influence the induction generation modes and the torsional interaction modes of the SSR phenomena, and then examines the problem of representing electrical characteristics which is dependent on frequency and different wedge materials.

The basic model of turbo-generator used in the field analysis is viewed as 5-regions of different permeability and conductivity characteristics.

The analytical method, which is used in this paper is based on solving a boundary value problem involving 3-D fields, and the basic function consists of the 2-D Fourier series.

1. 서론

역률보상용 캐패시터(Xc)를 부착한 대용량, 장거리송전선로의 발전계통에서 동기발전기 고정자에 흐르는 공진주파수($f_e = f_0 \sqrt{\frac{X_s}{X_s + X_E + X_T}}$)의 선전류에 의해 회전자자력이 발생하며 동기속도($2\pi f_0$)로 회전하는 회전자에 f_{sy} 주파수의 와전류를 유기시킨다.¹⁾

이 와류와 고정자의 회전자자력사이에 시불변량의 토오크가 발생하여 회전자에 $\frac{\omega}{\omega - \omega_{sy}} R_e$ 의 부하를 갖는 유도발전상태가 발생하므로 발전계통이 불안정하게됨이 밝혀졌다.²⁾ 여기서 $\omega = 2\pi f_e$ 이다.

또한 권성모멘트가 무한하지 않은 터어빈(M1)과 발전기회전자(M2)를 연결하는 축의 비틀림스프링계수(K12) 등은 전기적, 기계적인 원인에 의해 비틀림 주파수(f_b)의 축진동이 일어난다. 이 축진동이 동기속도로 회전하는 회전자에 가감되어 계자작용을하므로써 고정자권선에 비틀림 공진주파수 $f_k (= f_{sy} \mp f_b)$ 의 유기전압과 전류를 발생케하고 이로 인한 擾動(Perturbation) 토오크는 회전자축에서

전기계를 볼때 기계적 부재등으로 작용하는 정상 토오크 이외의 토오크로, 이것 또한 발전계통을 불안정하게하는 비틀림 상호작용임이 밝혀졌다.^{3,4)} 이때의 각속도 ω 는 $2\pi f_k$ 이다. 그리고 이와 같이 발전계통의 불안정 상태를 유발시키는 유도발전상태와 비틀림상호작용상태에서 동기발전기, 회전자에 발생한 와전류, 힘, 침투깊이(skin depth) 등을 저자는 앞선 연구^{4,5)}에서 주파수 의존량으로 밝힌바 있다.

그러나 I.M. Canay⁶⁾가 회전자 표면의 재동권선, Wedges 그리고 차단부분에 상당하는 와전류의 영향을 제안했을 뿐 많은 연구자들은 회전자의 반경(R) 방향의 재질이 앞에서 언급한 유도발전상태와 비틀림상호작용 상태에 어떤 영향이 있는가를 밝히려 하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 재동권선이 없는 원통형 회전자(Round solid iron rotor)를 구성계에 따라 5영역으로 세분하여 회전자전류, 발생토오크, 회전자 임피던스 등의 영향을 해석하고 슬롯에 끼우는 Wedge의 재료와 두께의 영향을 밝히고자 한다. 최근 통풍기술의 발달로 채적당 전류용량을 곱목할 만큼 크게할 수 있어 정상상태에서의 내열 용량은 크게할 수 있으나 상대적으로 과도 상태에서의 내열성은 더욱 요구되고있다. 그러므로 본 연구는 발전기 설계와 제작기술을 위해서도 반드시 요구되는 연구이다.

2. 기본이론

축대칭 원통 회전자를 갖는 터어보 발전기를 해석상의 편리와 경제적 전산처리를 위해 원통좌표계를 구조계에 따라 5영역으로 나눈 x-y-z 좌표계로 그림1과 같이 변환한다.

1대의 크기가 $L \times \frac{W}{2} \times R$ 인 발전기가 x,z 축의 양쪽으로 무한계가 이어져 있다고 가정하고 $L \times W$ 직사각형을 2중 Fourier 급수를 기본으로하여 앞선 연구^{4,5)}에서 발표한 고정자 표면전류 밀도는 다음과 같다.

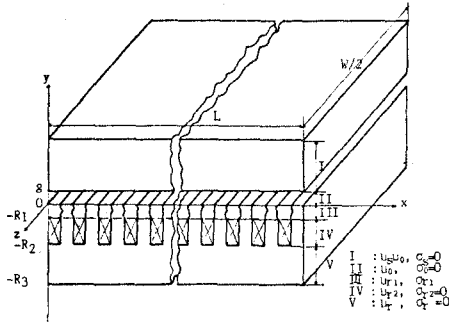


그림1. 터어보발전기를 5영역으로 나눈 해석모델

$$\tilde{k}_s(x, z, t) = \text{Re} \sum_{m,n=\text{odds}} \sum_{LW} \frac{4N_a I}{LW} \{ D_m \bar{M}_1 \cdot (u_x \frac{L}{2\pi m} - u_z \frac{W}{2\pi n}) \exp j(\alpha x - \omega t + \gamma z) \} \dots (1)$$

여기서 u_x, u_z 는 x 와 z 의 방향단위 벡터이고 m, n 은 x, z 방향의 고조파이며

$$\alpha = \frac{2\pi m}{L}, \quad \gamma = \frac{2\pi n}{W}$$

$$D_m = \sum_{k=1}^{\bar{k}} \exp \{ -j \frac{2\pi m}{L} (k-1) \bar{x} \}$$

$$\bar{M}_1 = [1 + \exp(-j \frac{2}{3} \pi(m-1)) + \exp(-j \frac{4}{3} \pi(m-1))]$$

\bar{x} = 스톱 절 (slot pitch)

\bar{k} : 매극당대상당 스톱 수

$$\omega = 2\pi f_e \text{ or } 2\pi f_t = 2\pi f_{sy} \mp 2\pi f_b$$

부도체 영역인 I, II, IV, V에서는 Quasi-static approximation Maxwell 방정식

$$\nabla \times \tilde{H} = 0 \dots (2)$$

$$\nabla \cdot \mu \tilde{H} = 0 \dots (3)$$

이 성립하고 이 두 식의 동시해는

$$\tilde{H} = \text{Re} (-\nabla \phi) \dots (4)$$

이며, ϕ 의 Laplacian.

$$\nabla^2 \phi = 0 \dots (5)$$

을 만족한다. 그리고 정방향 여자의 해로서 직각 좌표계에서의 기본함수 ϕ 는

$$\phi = \sum_{m,n=\text{odds}} \sum_{LW} [P_{mn} \exp(-\beta y + j(\alpha x - \omega t + \gamma z)) + Q_{mn} \exp(\beta y + j(\alpha x - \omega t + \gamma z))] \dots (6)$$

로 되며 여기서 $\beta = \sqrt{\alpha^2 + \gamma^2}$ 이고, P_{mn}, Q_{mn} 은 각 영역에서 성립하는 경계조건으로 풀리는 복소 미계수로 첨자를 붙여 해당 영역의 미계수를 표시한다. Wedge 와 처로 구성된 도체성 영역 III 에서는 자기확산방정식¹⁾

$$\nabla^2 \tilde{H}^{III} + \alpha_{r1} \mu_{r1} \mu_0 (\nabla \times (\nu_r \tilde{H}^{III})) = \alpha_{r1} \mu_{r1} \mu_0 \frac{\partial \tilde{H}^{III}}{\partial t} \dots (7)$$

이 성립하며, 회전자 속도 $\tilde{\nu}_r = u_x \tilde{\nu}$ 일때 이 \tilde{H} 계는 식(1) 또 미루어 z 성분의 이동파인

$$\tilde{H}_z^{III} = \text{Re} \sum_{m,n=\text{odds}} \sum_{LW} [Z_{1mn} \exp(j(\alpha x - \omega t + \gamma z) - \beta y) + Z_{2mn} \exp(j(\alpha x - \omega t + \gamma z) + \beta y)] \dots (8)$$

이 될것이다. 여기서 Z_{1mn}, Z_{2mn} 은 경계조건으로 결정되는 복소미계수이고 식(8) 을 식(7) 에 대입하여 얻어지는 분산방정식은

$$S^2 = \alpha^2 + \gamma^2 - j \alpha \sigma_{r1} \mu_{r1} \mu_0 \left(\frac{\omega}{\alpha} - \tilde{\nu}_m \right) = P + jQ \dots (9)$$

이다.

각 영역에서 $\exp j(\alpha x - \omega t + \gamma z)$ 로 변환하는 함수 들은 감쇠함수의 성질, 계의 연속성, 보존성을 적용할때 성립하는 경계조건식에 대입하여 정리하면 $P_{mn}^I, P_{mn}^{II}, Q_{mn}^{II}, Z_{1mn}, Z_{2mn}, P_{mn}^{IV}, Q_{mn}^{IV}, Q_{mn}^V$ 를 복소미계수로 갖는 8개의 연립선형대수방정식인 식(10)을 얻을 수 있으며 여자전류와 물리정수를 대입하여 IMSL서브루틴 LEQ2C 로 전산처리하여 미 계수 값을 구한다.

Matrix of 8 simultaneous linear algebraic equations

$\exp(-\beta y)$	$-\exp(-\beta y)$	$-\exp(\beta y)$						P_{mn}^I	Q_{mn}^I	Q_{mn}^V	= ... (10)
$\frac{L}{a} \exp(-\beta y)$	$\frac{L}{a} \exp(-\beta y) \frac{1}{\beta}$	$\frac{L}{a} \exp(\beta y) \frac{1}{\beta}$						P_{mn}^{II}	Q_{mn}^{II}	Q_{mn}^V	
	1	1	$-\frac{a}{\gamma}$	$-\frac{a}{\gamma}$				Z_{1mn}	Z_{2mn}	Q_{mn}^V	
	$\frac{L}{a}$	$-\frac{L}{a}$	$-\frac{a^2 + \gamma^2}{\gamma^2} \frac{y}{r1}$	$\frac{a^2 + \gamma^2}{\gamma^2} \frac{y}{r1}$				Z_{1mn}	Z_{2mn}	Q_{mn}^V	
			$\frac{a}{\gamma} \exp(\beta y)$	$\frac{a}{\gamma} \exp(-\beta y)$	$\exp(\beta R_1)$	$\exp(-\beta R_1)$		Z_{1mn}	Z_{2mn}	Q_{mn}^V	
			$\frac{a^2 + \gamma^2}{\gamma^2} \exp(\beta y)$	$-\frac{a^2 + \gamma^2}{\gamma^2} \exp(-\beta y)$	$-\frac{L}{a} \exp(\beta R_1) \frac{y}{r1}$	$\frac{L}{a} \exp(-\beta R_1) \frac{y}{r1}$		Z_{1mn}	Z_{2mn}	Q_{mn}^V	
					$\exp(\beta R_2)$	$\exp(-\beta R_2)$	$-\frac{a}{\gamma} \exp(\beta R_2)$	Z_{1mn}	Z_{2mn}	Q_{mn}^V	
					$\frac{L}{a} \exp(\beta R_2)$	$-\frac{L}{a} \exp(-\beta R_2)$	$\frac{a^2 + \gamma^2}{\gamma^2} \exp(-\beta R_2) \frac{y}{r1}$	Z_{1mn}	Z_{2mn}	Q_{mn}^V	

3. 전기적 특성

영역 III에서의 와전류 \tilde{J}_r 와 자계 사이에는

$$\nabla \times \tilde{H} \text{ III} = \tilde{J}_r \dots\dots\dots (11)$$

의 관계가 성립하며 회전자의 중심에서 $\tilde{H}^V = 0$ 이므로 감쇄함수가 되어 $\text{Re}(s) > 0$ 이 되고, $y=0$ 에서 $J_{ry}=0, z=0, z \neq 0, SW$ 로 $J_{rz} \neq 0$ 를 고려하여 x와 z성분의 와전류를 구하면 다음 식(12)와 같다.

$$|\tilde{J}_r| = \left[\left\{ \text{Re} \left(\frac{s^2 - \alpha^2 - \gamma^2}{s} \right) (Z_{1mn} - Z_{2mn}) \right\}^2 + \left\{ \text{Re} \left(\frac{\alpha^2 (s^2 - \alpha^2 - \gamma^2)}{78} \right) (Z_{1mn} - Z_{2mn}) \right\}^2 \right]^{1/2} \dots (12)$$

원통형 회전자 표면에 단일 제동권선이 설치된 것으로 보았을때 회로정수의 변화는 그림2와 같다.

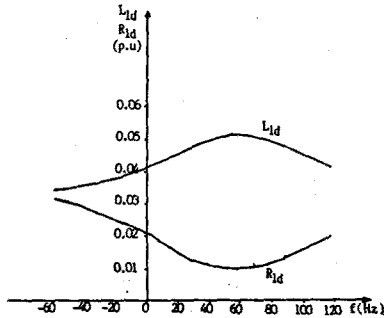


그림2. 단일제동권선의 주파수별 회로정수

유도발전 상태나 비틀림상호작용 상태에서 회전자 표면에 발생하는 전동력 토오르크는 Maxwell magnetic stress tensor로 해석하여 결과를 정리하면 그림3과 같다.

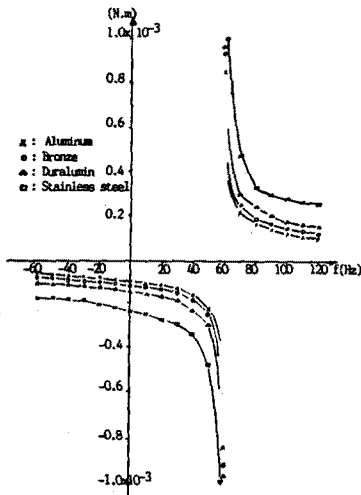


그림3. Wedge 개질에 따른 주파수별 전동력토오르크 (Wedge 두께 18 mm)

4. 결론

구상제에 따라 5영역으로 구분한 터보발전기의 유도발전 상태와 비틀림상호작용 상태에서의 주파수에 따른 원동회전자에 발생하는 와전류, 발생토오르크, 단일 제동권선 관점에서의 회로정수 등 전기적 특성을 해석하였다.

그리고 Wedge의 재료와 두께에 따른 영향을 분석한 결과 도전성이 적은 재료가 그리고 두께보다는 재료가 전기적 특성에 더욱 영향을 미친다는 사실을 알았다. 또한 제동권선 임피던스의 주파수에 따른 변화는 안정영역 범위의 공진주파수의 예측이 어렵다는 것을 증명하였다.

참고문헌

1. A.G.Jack, "Negative-sequence Current Losses in the Solid Rotor for a Turbogenerator", IEE Proc., Vol.127, Pt.c, No.2, pp.53-64, 1980.
2. M.M.Startawi, "Suppression and Avoidance of SSR in Synchronous Generator", Ph.D Thesis, McGill University, 1978.
3. J.M.Undrill, T.E.Kostyniak, "Subsynchronous Oscillations Part I, II", IEEE Trans. Vol.PAS-95, No. 4, pp.1446-1458, 1976.
4. 이은용, "유도발전 상태에 있는 동기발전기 회전자의 와전류", 대한전기학회논문지, Vol.36, No. 2, pp.88-98, 1987.
5. 이은용, "비틀림상호작용 상태에 있는 터보발전기의 전기적 특성", 대한전기학회논문지, Vol.37, No.1, pp.10-17, 1988.
6. I.M.Canay, "Extended Synchronous Machine Model for Calculation of Transient Processes and Stability", Electric Machines and Electromechanics, No.1, pp.137-150, 1977.
7. H.H.Woodson and J.R.Melcher, "Electromechanical dynamics, Part II, Fields, Forces and Motion", John Wiley, 1968, pp.335-370.
8. V.P.Anempodistov, E.G.Kosharskii, I.D.Urusov, "Problems in the Design and Development of 750 MW Turbogenerators", Macmillan, (N.Y.), 1968.