

Torsional Interaction 狀態에 있는
Turbo-發電機의 電氣的 特性

○ 李 殷 雄
忠南大學校

The Electrical Characteristics of
a Turbo-Generator during the State
of Torsional Interaction

Lee Eun - Ung
Chungnam Nat. Univ.

1. 序 論

그림1 과 같이 Turbine 과 發電機가 축 (shaft)로 연결되어 있는 발전계통에서는 Torsional spring K_{12} 가 存在하므로 振動이 발생한다.

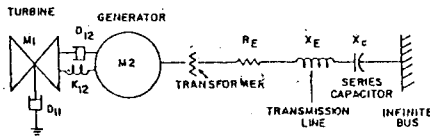


그림1. 직렬보상송전선로를 갖는 발전기의 전기, 기계적 역학도.

이 Torsional 振動의 原因으로는

- 1) 發電機의 電氣的 stiffness에 적응하기 위한 亂調 (hunting) 현상으로 發電機의 振動이 軸振動으로 되는 기계적 mode.
- 2) 전력계통의 직렬 L-C 회로에서 共振周波數 Torque로 인한 誘導發電(induction generation) 현상이 일어날때의 자여자 振動인 電氣的 mode.
- 3) 기계적 mode와 전기적 mode가 동시에 발생하는 경우가 있을 수 있다.

이와 같은 원인으로 발생한 Torsional 진동은 기계적 mode와 전기적 mode를 共存하게 하고 Torsional 주파수 (f_b)가 同期速度 (V_{sy})로 회전하는 回轉子에 加減되기 때문에 Torsional 共振 周波數 ($f_b \mp f_s$)의 특성을 발생시킨다. 축 축의 torsional mode는 축에 연결되어 있는 발전기 회전자의 계자작용 때문에 固定子の 모든 권선에 Torsional 주파수 (f_b)의 영향을 전달하게되어 固定子卷線에 pertubation 전압과 전류를 유기시키고 이 전류가 공극에 pertubation torque를 발생시킨다.

이 pertubation torque는 회전자 축에서

電氣系統을 볼때 機械的 負制動(negative damping)으로 작용하게 되어 이 負制動이 正制動(positive damping)보다 크게될때 축에 電氣的, 機械的으로 큰 stiffness를 줄 뿐아니라 발전계통을 不安定(unstable)하게하는 원인이 된다.

이와 같은 Torsional resonance interaction의 電氣的, 機械的 mechanism이 아직까지 명확히 밝혀지지 않았지만 L-C 회로의 공진 주파수 (f_e)와 Torsional 공진 주파수 ($f_y \mp f_s$)가 대략 같을때 불안정 상태가 발생한다는 것이 밝혀졌다.

그러므로 Torsional interaction의 원인을 정확히 力學的 해석(dynamic analysis)하는 것은 전력계통(power system)의 安全運轉과 안전운전을 위한 전력계통 및 發電機設計 자료를 창출해내기 위하여 매우 필요하게 되었다. 그래서 73년 美國의 Southern California의 Mohave 發電所의 軸 파기사고 이후 매우 활발히 연구되고 있다.

본 연구에서는 본 연구자가 참고문헌(6)에서 개발한 방법을 사용하여 turbo-발전기의 Torsional interaction 상태에서 발생하는 회전자 와류(eddy current)를 구하고 Maxwell magnetic stress tensor를 使用하여 定電流下에서의 힘을 구하여 比較檢討하여 특성을 분석하였다. 그리고 고정자 impedance 와 여자(excited) impedance 등을 무시하고 입력정격값들(rated values)로 환산하여 model로 사용한 발전기의 회전자 저항 R_f , reactance X_f 를 구하였다. 본 연구에 model로 사용한 발전기는 참고문헌(7)의 것이다.

2. 本 論

그림2 와 같은 원통구조(cylindrical

structures) 의 Turbo-발전기를 그림3 과 같이 直交座標(rectangular coordinate) 를 적용할 수 있도록 하므로써 Double Fourier series base 도 解析되는 자기확산방정식(magnetic diffusion equation) 을 풀기에 용이하게 하였다.

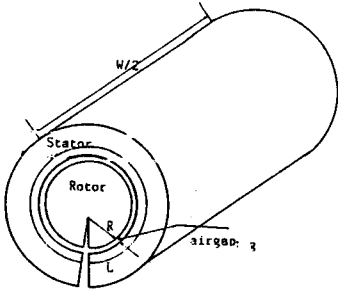


그림2. 원통좌표로 나타낸 turbo-발전기의 고정자와 동근회전자 구조.

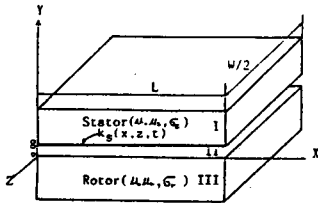


그림3. x, y, z cartesian좌표계로 나타낸 고정자와 회전자 구조.

그림2 를 그림3 으로 변화하더라도 자기확산 방정식의 변수인 공극의 길이 g , 발전기 축방향 길이 $W/2$, 회전자둘레 $L=2\pi R$, 회전자 속도 V_{sy} 등은 변함이 없다.

고정자 표면 $y = g$ 에서 고정자의 3相어자 전류는 Double Fourier 급수로 해석하여 Torsional resonance frequency($f = f_s \mp f_b$) 의 positive sequence $\exp j(\alpha x - \omega t + rz)$ 의 基本波(fundamental wave)($m=1, n=1$) 만의 面電流密渡(surface current density) 로 취급하였다.

고정자와 공극에서는 Quasi-static Approximation Maxwell 방정식, $\nabla \times \vec{H} = 0$, $\nabla \cdot \vec{H} = 0$ 와 Laplace 방정식 $\nabla^2 \vec{H} = 0$ 을 만족시키는 해(solution)를 얻을 수 있으며 이 해의

複素未係數(unknown complex coefficient) 는 境界條件式을 풀므로써 얻어진다. 회전자에서는 工學的으로 同質材(homogeneous material) 로 간주하고 이영역(region) 에서 성립하는 Bullard 方程式의 해, \vec{H} -界函數를 얻을 수 있다. 이 해에서 複素未係數 역시 境界條件式을 풀므로써 얻어지며 浸透깊이 (skin depth)를 決定하는 Dispersion 方程式은 Torsional resonance frequency 인 Lower sideband($\omega_{sy} - \omega_b$), ω_{sy} , Upper sideband($\omega_{sy} + \omega_b$)의 함수로된다. 이와 같은 해석으로 얻어지는 $y = g$ 에서 固定자의 어자면전류밀도 와 \vec{H} -界의 관계, $y = +\infty$, $y = g$, $y = 0$, $y = -\infty$ 에서의 \vec{H} -界 함수의 複素係數 $y = 0$, $z = 0$, $z = \pm W/2$ 에서 \vec{H} -界와 회전자의 외류 관계등이 境界條件을 적용하므로써 聯立線型代數方程式이 얻어진다. 이 聯立方程式을 풀므로써 複素未係數들(unknown complex coefficients) 을 얻고 Torsional interaction 狀態에서의 회전자 외류를 얻을 수 있으며 x, z 성분 의 2重積分 積으로 나타내지는 외류손 P1을 얻을 수 있다. 그리고 이 외류손실은 直交特性의 2重Fourier 급수 成分으로 이루어졌으므로 Parseval定理를 적용할 수 있어 쉽게 구해진다. 이와 같은 과정으로 구하여 單位法(per unit method) 으로 表示한 電氣的 特性을 그림으로 나타내면 외류손 (P1)은 그림 4와 같고 회전자 저항(R_s)는 그림5 와 같으며 회전자 reactance(X_s)는 그림6 과 같다.

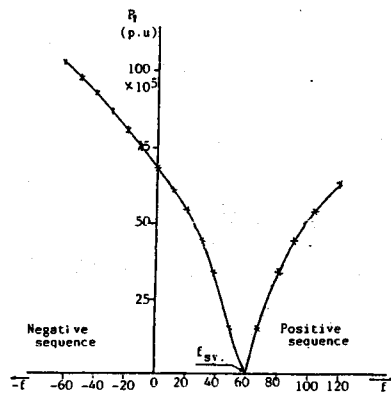


그림4. Torsional 공진주파수 대 외류손

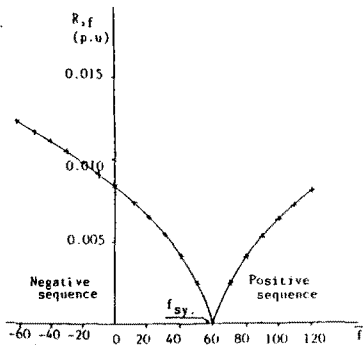


그림5. Torsional 공진주파수 대 회전자 저항.

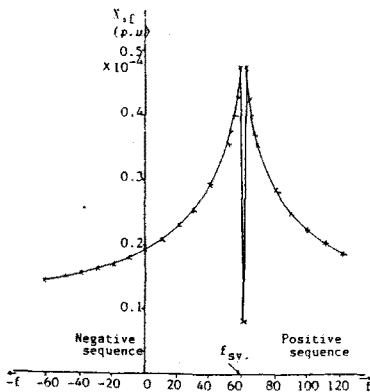


그림6. Torsional 공진주파수 대 회전자 reactance.

그리고 Maxwell magnetic stress tensor를 적용하여 回轉子 表面의 힘을 나타내면 그림7 과 같다.

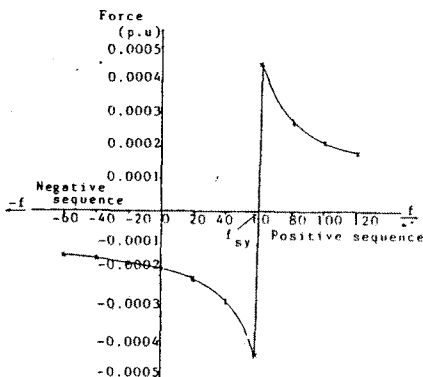


그림7. Torsional 공진주파수 대 힘

이 힘과 앞에서 구한 외류손과의 관계를 同一한 Torsional resonance frequency ($f = f_{sy} \mp f_s$) 에서 검토하면

$$\text{force} = Pl / (v_m - \omega_s) \text{ 가 成立되}$$

기 때문에 誘導器의 특성과 一致함을 알 수 있으며 이로 인하여 이론의 타당성이 인정된다.

3. 結 論

發電系統의 Torsional interaction 현상에서 Torsional resonance frequency 에 따른 Turbo-發電機의 電氣의 特性을 Double Fourier series base로 해석하면 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 回轉子의 외류손
- 2) 固定子의 저항 및 reactance, 여자 impedance 를 무시하고 1차 定格으로 환산한 회전자 저항 R_s , 회전자 reactance X_s .
- 3) 回轉子 表面에 발생하는 Torsional force.
- 4) 同期速度(f_{sy}) 에서도 자기에너지 存在.
- 5) 외류손과 Torsional force 사이의 관계에서 유도기 특성과 유사함을 확인하였다.

4. 참고문헌

- 1) C.E.J. Bowler, D.N. Ewart, C. Concordia, "Self-Excited Torsional Frequency Oscillations with Series Capacitors", IEEE Trans., Vol. PAS-92, No. 5, pp. 1112-1119, 1973
- 2) L.A. Kilgore, D.G. Ramey, M.C. Hall, "Simplified Transmission and Generation System Analysis Procedures for Subsynchronous Resonance Problems", IEEE Trans., Vol. PAS-96, No. 6, pp. 1840-1846, 1977
- 3) H. Rustebakke, C. Concordia, "Self-Excited Oscillations in Transmission System using Series Capacitors", IEEE Trans., Vol. PAS-89, No. 7, pp. 1504-1512, 1970
- 4) IEEE Joint Working Group, "Current Usage and Suggested Practices in Power System Stability Simulations

- for Synchronous Machines", IEEE Trans. Vol. EC-1, No. 1, pp. 77-93, 1986
- 5) J.W. Ballenge, S. Goldberg, "Subsynchronous Resonance in Series Compensated Transmission Lines", IEEE Trans., Vol. PAS -92, No. 5, pp. 1649-1658, 1973
- 6) 李 殷 雄, "誘導發電 狀態에 있는 同期發電機의 외전류", 大韓電氣學會誌 Vol. 36, No. 2, pp. 88-98, 1987
- 7) V.P. Anempodistov, E.G. Kosharskii, I.D. Urusov, "Problems in the Design and Development of 750 MW Turbo-generator", Macmillan, N.Y., 1963
-