

同期發電機의 竝列運轉시 非同期現象에서 發生하는 電氣現象解析

이은웅* 임재일** 이동주* 김종겸*** 조성배****
 *충남대 **수자원공사 ***원주전문대 ****한국전력연구원

An Electrical Effect Analysis of Asynchronous Phenomena in Parallel Operation of Synchronous Generator

Lee, Eun-Woong* Lim, Jae-II** Lee, Dong-Ju* Kim, Jong-Gyeum*** Jo Sung-Bae****
 *Chungnam NAT Univ **KOWACO ***Won-ju Junior College ****KEPCO

Abstract

In the Closing time in order to operate synchronous generators parallelly, it is generated the asynchronous phenomena.

These asynchronous phenomena give rise of the eddy current on the rotor. These eddy current are solved analytically for the Laplace' Equ. $\nabla^2 \tilde{H} = 0$ in free space and for the Bullard's Equ. $\nabla^2 \tilde{H} + \sigma_r \mu_r \nabla \times \tilde{v}_r \times \tilde{H}^0 = \sigma_r \mu_r \frac{\partial \tilde{H}}{\partial t}$ for the rotor by using each double Fourier series component of the 3D H-field

1. 序論

河川管理, 流量調節을 위한 댐建設은 산업용수와 도시문화생활을 위한 생활용수증가를 충족시킬 수 있는 水資源 확보 次元에서도 重要하다. 특히 전력생산을 위한 1차 energy가 絶對的으로 不足한 우리나라에서 기저부하는 原子力과 火力發電이 담당하고 짧은 시간내의 起動 및 정지의 적응력이 뛰어난 수력 발전을 尖頭負荷用으로 運用하는 것은 양질의 전력을 공급하는 방법이고 最小 경제發電 계통運轉이며, 無公害 천연자원을 이용하는 것이 된다.

尖頭負荷를 감당하기 위해서는 電力수급변동에 맞추어 迅速하게 起動하여서 電力 계통電壓에 맞추어 他發電機와 竝列運轉을 하여야 하기 때문에 發電機의 運轉狀態가 계통電壓의 크기, 位相, 周波數等이 일치할 때 同期投入하여야만 한다.

따라서 이와같은 發전기의 기동, 정지 운전과 負荷변동에 적응 發전하여야하는 운전상태에서는 터빈의 적응 민감도에 따라 發전기 回轉子의 기계적 속도가 비동기현상을 發生시킬 수 있으며 전력계통과 연결되어 있는 發전기 固定子와의 주파수가 비동기일 수도 있다.

이와같은 비동기현상이 發生하면 發전기에 전기적 기계적 문제점이 發生할 수 있음을 예측할 수 있다.

그래서 본 연구에서는 비동기현상을 이론적으로 규명 정리하고 대청댐에 설치되어 운정중인 돌극형 수차 發전기를 model로 電氣的 現狀을 解析하고자 한다.

2. 非同期 現像

電力系統에 連結되어 있는 同期發電機는 수차 터빈의 각속도가 균일치 못하거나 부적당한 속도변동을 갖을 때 發전기의 기전력의 크기, 위상, 주파수, 파형 등이 같지 않는 순간이 發生하여 무효 순환 전류 I_c 가 흐르거

나 동기화전류 I_c 가 흐르게 되어 力率의 變化, 發電機의 過熱, 부하 분담의 변화, 亂調등의 非同期化 現象이 發生한다.

그리고 대용량 장거리 전력계통에 연결된 동기 발전기의 운전을 동기각속도 w_s 로 회전하는 수차 터빈에 회전자가 연결되어 있고, 선로와 변압기의 inductance $L_E + L_T$, 역률보상용 capacitors C의 선로가 고정자와 직렬로 연결된 L-C회로에서 不必要한 비동기 공진주파수 $f_0 (= f_0 \sqrt{\frac{X_C}{X_C + X_E + X_T}})$ 를 발생시킨다.^[1]

이때 同期 角速度 w_s 로 回轉되고 等價抵抗 R_2 의 回轉子에 비동기 共振周波數 f_0 의 回轉起磁力이 角速度 w_e 로 回轉하므로서 $\frac{\omega_e R_2}{\omega_e - \omega_s}$ 의 抵抗값으로 表現되는 誘導發電現象이 發生한다. 이와같은 誘導發電現象은 回轉機에 供給되는 에너지가 電氣回路內에서 抵抗으로吸收되는 에너지보다 많게되어 ($f_0 \pm f_0$) 周波數의 交番空隙 torque 成分이 發生하고 回轉子 表面에 와류를 發生시키기 때문에 이에 대비한 耐熱性도 고려되어야 한다. 또한 이와같은 誘導發電現像是 發電系統을 不安定하게 한다.^[2]

이상에서 제시한 각종 비동기 現象으로 回轉子에 發生하는 潛電流의 解析은 潛電流에 의한 發熱量을 비롯 發電系統에 發生할 수 있는 振動 torque를 算出 할 수 있어 安定運轉界限를 斜明할 수 있을 것이다.

대청댐에 설치되어 있는 수차 터빈 發전기의 사양은 표1과 같다.

Table 1. Specification of Generator at Dae Cheong Dam

Rated active power	45[MW]
Rated voltage (V _{rated})	13.2[KV]
Rated current (I _{rated})	2.187[kA]
Connection	Y
Frequency (f _{0y})	60[Hz]
Stack length (+W/2)	4542[mm]
slots/phase · pole (k)	2
Inside circle length of stator (L x p/2)	$\pi \times 7315.5[\text{mm}]$
Poles (p)	48
Radius of rotor (R)	3665[mm]
Air gap (g)	13.5[mm]

3. 非同期狀態에서의 潛電流 解析

3.1 Model 設定

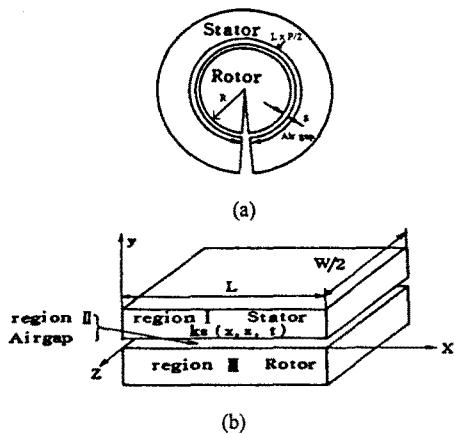


그림 1. 동기발전기의 모델

Fig. 1 The model of synchronous generator

每相 每極當 slot수 k가 均一하고 對稱的일 때 다극(p) 수차 발전기의 해석영역을 한 쌍극으로 제한 해석하여 双極倍(p/2)하므로써 결과를 얻는다. 따라서 中心點에서 放射狀으로 그림 1(a)처럼 축방향길이로 절라 펼치면 그림 1(b)처럼 될 것이며 model로 사용하는 대청댐 발전기의 경우 X축 방향의 길이는 $L \times \frac{P}{2}$ 가 될 것이다. 그림 1(b)에서 $y = 0$ 의 위치가 회전자의 表面이라 놓으면 $y = g$ 는 평균 공극의 길이이다. $y = -R$ 은 回轉子의 中心점이며 $z = \frac{W}{2}$ 는 고정자의 活性域의 축방향 길이다. 그림 1(b)의 固定子 電流를 고조파차수가 x방향 m, z방향 n인 2重 Fourier 급수로 나타내면 차수(m, n)중에 (0,0), (m,0), (0,n)이 存在하여 실제상황의 수학적 표현이 곤란하므로 이를 除去시키기 위해 2대의 발전기를 직렬로 紮列運轉한다고 가정한 그림 2의 model에서 Fourier 급수의 週期는 단위 방향벡터 $\tilde{a}_x, \tilde{a}_y, \tilde{a}_z$ 로 나타내지는 전류 Loop 4개의 기자력 방정식(1)로 나타내진다.^[3] 그리고, 이 정량적 결과를 半으로 나누면 발전기 한대에 해당하는 전기적 특성을 얻을 수 있다.

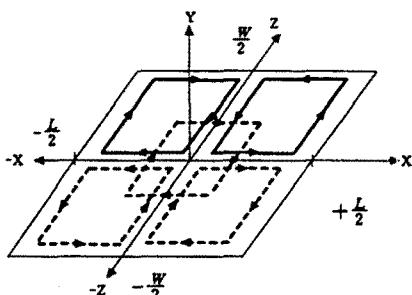


그림 2. 전류루프

Fig. 2 symmetrically rectangular loop of dimension $L \times W$ carrying current

a 상 · N_{al} coil에 흐르는 고정자 전류 \tilde{i}_a 에 의한 기자력을 2重 Fourier 급수로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$N_{al}\tilde{i}_a = R_e \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\tilde{a}_x C_{almn} e^{j(\alpha x + \gamma z)} + \tilde{a}_z C_{almn} e^{j(\alpha x + \gamma z)}) i_a \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{2\pi m}{L}, \quad \gamma = \frac{2\pi n}{W} \\ C_{almn} &= \frac{1}{LW} \int \int N_{alx} e^{-j(\alpha x + \gamma z)} dx dz \\ C_{almn} &= \frac{1}{LW} \int \int N_{alz} e^{-j(\alpha x + \gamma z)} dx dz \end{aligned}$$

3.2 各領域의 適用界방정식과 境界條件

영역 I : 고정자 ($y \geq g$)

전기장판을 성층한 고정자의 투자율 μ_s , 도전도 $\delta_s = 0$ 으로 가정하면 \hat{H} -계방정식은 Laplace방정식(2)의 해로 나타내지며 $\nabla \times \hat{H} = 0, \nabla \cdot \hat{B} = 0$ 이 성립한다.

$$\nabla^2 \hat{H} = 0 \quad (2)$$

영역 II : 공극 ($y = 0 \sim g$)

공극의 투자율은 μ_0 , 도전도는 $\delta = 0$ 이므로 투자율 μ_s 가 매우 큰 고정자에 비해 대부분의 자계강도가 공극에 존재하게되며 Maxwell 방정식의 준정상상태를 적용할 수 있다.

영역 III : 회전자 ($y = 0 \sim -R$)

수차터어빈에 의해 회전하는 회전자의 주변속도의 성분은 x방향과 방사방향의 합성성분이지만 해석 model에서는 식(3)과 같이 x방향성분만 고려했다.

$$\tilde{v}_r = \tilde{a}_x \cdot v_m \quad (3)$$

그리고 투자율 μ_r , 도전도 δ_r , 표면전류발생 J_r ,이라 할 때 회전자에서 성립하는 계방정식은 식(4)~식(6)과 같다.

$$\nabla \times \tilde{E} = -\mu_r \frac{\partial \hat{H}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\tilde{J}_r = \delta_r (\tilde{E} + \tilde{v}_r \times \mu_r \hat{H}) \quad (5)$$

$$\nabla \times \hat{H} = \tilde{J}_r \quad (6)$$

방정식(6)의 curl은 Bullard 방정식(7)으로 된다.

$$\nabla^2 \hat{H} + \delta_r \mu_r (\nabla \times \tilde{v}_r \times \hat{H}) = \delta_r \mu_r \frac{\partial \hat{H}}{\partial t} \quad (7)$$

영역 I 과 II사이 즉 $y = g$ 에서 고정자의 sheet current는 $\tilde{K}_s(x, z, t) = \tilde{a}_x K_{sx} + \tilde{a}_z K_{sz}$ 이고 계의 연속성과 보존성에서 경계조건식(8)~(10)을 얻을 수 있다.

$$H_y^I = \frac{\mu_0}{\mu_s} H_y^II \quad (8)$$

$$H_x^I - H_x^{II} = -K_{sz} \quad (9)$$

$$H_z^I - H_z^{II} = K_{sx} \quad (10)$$

영역 II과 영역 III사이 $y = 0$ 인 전원이 없는 회전자 표면에의 경계조건식 (11) - (13)가 성립한다.

$$H_x^{II} = H_x^{III} \quad (11)$$

$$H_y^{II} = \frac{\mu_r}{\mu_0} H_y^{III} \quad (12)$$

$$H_z^{II} = H_z^{III} \quad (13)$$

회전자내 $y = 0 \sim -R$ 에서의 \tilde{J}_r -계의 경계조건식은 $y \geq 0, y = -R$ 에서 식(14)가 성립한다.

$$J_y = 0 \quad (14)$$

$z = 0, z = \frac{-R}{2}$ 인 회전자활성영역밖의 전류 J_z 는 흐르지 않으므로 식(15)가 된다.

$$J_z = 0 \quad (15)$$

3.3 고정자 전류

그림2에서 점선으로 나타낸 전류 loop는 4개의 전류 loop 중 한 개를 좌표계 중심으로 이동시킨 것으로 이 loop에 단위 전류가 흐른다고 가정한다. $-\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2}$ 과 $-\frac{W}{2} \leq z \leq \frac{W}{2}$ 에서 전류 loop를 수학적으로 표현하고 $z = \pm \frac{W}{2}$ 위치에서 $-\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2}$ 사이의 복소수합 수미계수 C_{alxmn} 과 $x = \pm \frac{l}{2}$ 위치에서 $-\frac{d}{2} \leq z \leq \frac{d}{2}$ 사이의 복소수합수미계수 C_{alzmn} 을 구하여 4개의 전류 loop식(1)을 한 개의 전류loop식으로 환산한 a상의 N_{ai} -코일의 sheet current는 식(16)으로 나타내지면서 앞에서 언급한 차수(0, 0), (m, 0), (0, n)는 제거된다.

$$\tilde{K}_{al} = Re \sum_{m,n=0}^{\infty} \sum_{z=\text{odd}}^{\infty} 4 \sin \frac{m\pi}{2} \sin \frac{n\pi}{2} [\tilde{a}_x C_{alxmn} + \tilde{a}_z C_{alzmn}] \quad (16)$$

$$\cdot \exp(j(ax + \gamma z))$$

그리고 $l = \frac{L}{2}$, $w = \frac{\bar{W}}{2}$ 이면 식(16)은 식(17)으로 된다.

$$\tilde{K}_{al} = Re \sum_{m,n=0}^{\infty} \sum_{z=\text{odd}}^{\infty} i_a \frac{4N_{al}}{LW} [j \frac{\tilde{a}_x}{a} - j \frac{\tilde{a}_z}{\gamma}] \cdot \exp(j(ax + \gamma z)) \quad (17)$$

비동기현상에서 매극매상당슬롯수 K인 고정자 a상의 기준권선에 흐르는 전류가

$$i_a = I \sin \omega_a t \quad (18)$$

이면 기준에서부터 k번째권선까지의 a상 합성전류는 식(19)로 나타내어진다.

$$\tilde{K}_a = Re \sum_{m,n=0}^{\infty} \sum_{z=\text{odd}}^{\infty} \frac{2N_{al}I}{LW} \sum_{k=1}^k \exp(-j(k-1)\alpha x) \quad (19)$$

$$(\frac{\tilde{a}_x}{\gamma} - \frac{\tilde{a}_z}{a}) \cdot \exp(j(ax + \omega_a t + \gamma z))$$

그리고 그림 1(b)에서 상간의 거리는 $\hat{x}(= \frac{L}{3})$ 이고 a상을 기준으로 b상과 c상이 전기각도로 $\frac{2}{3}\pi$ 만큼씩 위상차가 있을 때 a, b, c상의 합성전류는 식(20)과 같이 나타내진다.

$$\tilde{K}_a = Re \sum_{m,n=0}^{\infty} \sum_{z=\text{odd}}^{\infty} \frac{2N_{al}I}{LW} \sum_{k=0}^k \exp(j \frac{2\pi m}{m} (k-1) \bar{x}) \quad (20)$$

$$[(1 + \exp - j \frac{2}{3} \pi(m-1) + \exp - j \frac{4}{3} \pi(m-1))$$

$$\cdot (\tilde{a}_x \frac{W}{2\pi n} - \tilde{a}_z \frac{L}{2\pi n}) \exp(j(ax - \omega_a t + \gamma z))$$

$$- (1 + \exp - j \frac{2}{m} \pi(m+1) + \exp - j \frac{4}{3} \pi(m+1))$$

$$\cdot (\tilde{a}_x \frac{W}{2\pi n} - \tilde{a}_z \frac{L}{2\pi n}) \exp(j(ax + \omega_a t + \gamma z))]$$

고정자 表面에서 電流의 連續性은 $\nabla \tilde{K}_s(x, z, t) = 0$ 이 되어야 하므로 式 (20)을 方向性分으로 나타내며 式 (21)으로 된다.

$$\tilde{K}_s(x, z, t) = \tilde{a}_x k_{sx}(x, z, t) + \tilde{a}_z K_{sz}(x, z, t) \quad (21)$$

3.4 各領域의 H-界方程式의 解

領域 I + II에서의 Laplace 方程式 (2)의 解는 式(22)로 된다.

$$\tilde{H} = \sum_{m,n} \sum_{z=\text{odd}} [P_{mn} e^{j(ax - \omega_a t + \gamma z) - \beta y} + Q_{mn} e^{j(ax - \omega_a t + \gamma z) + \beta y}] \quad (22)$$

여기서 $\beta^2 = a^2 + \gamma^2$ 가 成立하고 P_{mn}, Q_{mn} 은 各領域에서의 境界條件으로 일어지는 複素未係數이다. 그리고 各領域間의 關係는 式 (8)~(10)으로 정리가 된다. 非同期 周波數 f_e 下에서 回轉子가 式(3)의 주변속도로 회전하면 回轉子(領域III)에서의 H-界方程式은 Bullard 方程式(7)이 성립하므로 이 方程式의 解는 境界條件式 (11)~(13)에서 式 (23)으로 예측된다.

$$H_z = \sum_{m,n} \sum_{z=\text{odd}} [Z_{1mn} e^{j(ax - \omega_a t + \gamma z) - s_1 y} \quad (23)$$

$$+ Z_{2mn} e^{j(ax - \omega_a t + \gamma z) + s_1 y}]$$

여기서 Z_{1mn}, Z_{2mn} 은 境界條件式으로 決定되는 複素未係數이며 이 式 (23)을 式 Bullard 方程式 (7)에 대입하여 정리하면 分數方程式 (24)으로 된다.

$$s^2 - a^2 - \gamma^2 + ja\sigma^{\text{III}} \mu^{\text{III}} (\frac{\omega_e}{a} - V_m) = 0 \quad (24)$$

그리고 回轉子의 基礎적 속도 v_m 이 동기속도 v_{sy} 인 경우도 고려할 필요가 있다.

3.5 非同期 現象시 回轉子에 發生하는 涡電流

식(15)에서 언급했듯이 $y=0, Z \geq \pm \frac{W}{2}$ 인 回轉子活性域 밖에는 電流가 흐를 수 없으므로 $J_{z>\frac{W}{2}}$ 의 경계 조건이 성립하고, $y=-R$ 인 回轉子 중심에서는 分散磁界가 無視할 만큼 작아 $y \rightarrow \infty$ 로 간주할 수 있게 되어 式 (23)에서 $s < 0$ 은 해당치 않는다. 경계 조건식 (14)를 만족시키 위해서는 $\frac{\partial H_x^{\text{III}}}{\partial z} = \frac{\partial H_z^{\text{III}}}{\partial x}$ 이 성립하여 式 (23)은 式 (25)로 된다.

$$H_z^{\text{III}} = \frac{a}{\gamma} Z_{2mn} \exp(j(ax - \omega_a t + \gamma z) + sy) \quad (25)$$

그리고 時變電流가 없는 回轉子에는 $\nabla \cdot \tilde{J}_r = \nabla \times \tilde{H}^{\text{III}}$ 에서 x방향은 式(26)의 전류가 흐르고 z방향은 式 (27)의 전류가 흐른다.

$$J_x = Re \sum_{m,n=0}^{\infty} \sum_{z=\text{odd}}^{\infty} \frac{s^2 - a^2 - \gamma^2}{s} Z_{2mn} [\exp(j(ax - \omega_a t + \gamma z) + sy) \quad (26)$$

$$- \exp(j(ax - \omega_a t - \gamma z) + sy)]$$

$$J_z = Re \sum_{m,n=0}^{\infty} \sum_{z=\text{odd}}^{\infty} -\frac{a}{\gamma} \frac{s^2 - a^2 - \gamma^2}{s} Z_{2mn} [\exp(j(ax - \omega_a t + \gamma z) + sy) \quad (27)$$

$$- \exp(j(ax - \omega_a t - \gamma z) + sy)]$$

따라서 回轉子 電流 \tilde{J}_r 은 式 (28)과 같다.

$$\tilde{J}_r = Re(\tilde{a}_x J_x + \tilde{a}_z J_z) \quad (28)$$

그리고 回轉子 電流의 크기는 式 (29)으로 나타내진다.

$$J_r = \sqrt{\tilde{J}_r \cdot \tilde{J}_r} \quad (29)$$

3.6 電氣的 特性

各領域에서 境界條件에 의해 결정되는 \bar{H}^k -계의 Fourier급수 고조파성분의 미계수 P^I_{mn} , P^U_{mn} ,

Q^U_{mn} , Z_{zmn} 값이 전원에서 공급하는 固定子 電流 $\bar{K}_s(x, z, t)$ 와 各領域의 境界條件들이 관련되어 얻어지는 聯立方程式을 풀면 구해진다.

그리고 回轉子電氣鋼板의 導電度 $\delta_s = 0.17 \times 10^7$ [s/m], 制動捲線의 導電度 $\delta_d = 5.8 \times 10^7$ [s/m] 간의

점유면적비에 따른 平均導電度 $\delta_r = \frac{\delta_d}{7} + \delta_s$ [s/m]와

투자율 $\mu_r = \frac{\mu_0}{7} + \mu_s$ 로 대략 구하여 식(28)에 대입하여 非同期현상이 發生할수 있는 주파수 $f_e \pm f_s$ 범위에서의 구한 회전자전류는 그림3과 같이 구할수 있다.

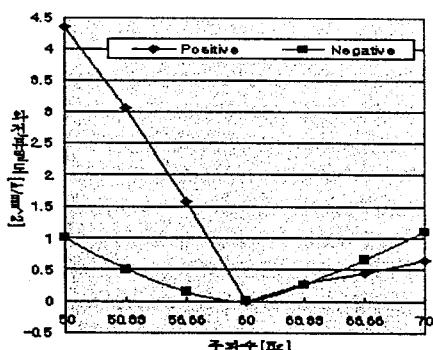


그림 3. 회전자의 와전류
Fig. 3 Eddy current of rotor

그림 1(b)에서 발전기 두 대가 直列로 병행운전 한다고 가상한 경우 한 双極에 해당하는 적분구간 $-\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}$, $-R \leq y < 0$, $-\frac{W}{2} \leq z \leq \frac{W}{2}$ 에서의 와류손 식(30)이 성립하므로 Parseval 정리를 이용하여 구한 涡電流損을 $\frac{P}{4}$ 倍하면 全回轉子의 涡電流損이 구해진다.

$$P_I = R_e \sum_m \sum_{n=odd} \frac{1}{2} \int_{-R}^0 \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{J_r^2}{\delta_r} dx dy dz \quad (30)$$

고정자의 주파수가 비동기 주파수라 하더라도 고조파성분에 해당하는 涡電流損이 存在하고 非同期周波數에 따라 涡電流損의 크기가 변한다. 이처럼 고정자 전류가 정격전류 I_{rated} 로 일정하더라도 비동기주파수 f_e 가 다르면 단위 임피던스 Z_{base} 로 구해 1次로 환산한 회전자의 저항값 R_2 는 식(31)과 같이 된다.

$$R_2 = \frac{P_I}{3 I_{rated}^2 \cdot Z_{base}} \quad (31)$$

그 이유는 1次동기주파수 f_e 에서 Slip은 $s = \frac{w_e - w_o}{w_e}$ 이고 1次로 환산한 등가저항은 $\frac{w_e - w_o}{w_e} R_2$ 이기 때문이다.

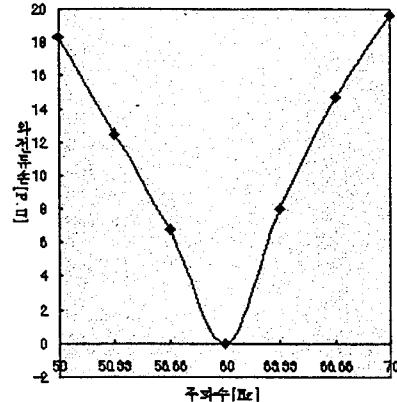


그림 4. 와전류손
Fig. 4 Eddy current loss

非同期현상이 회전자에 發生하는 涡電流는 制動回轉力을 發生하고 同期化하는 힘이므로 同期化力이라 표현할 수 있다. 이 힘은 Maxwell Stress tensor로 구할수 있고 그 결과는 그림5와 같다.

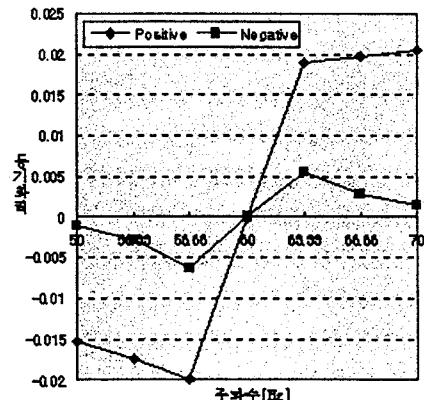


그림 5. 동기화력
Fig. 5 Synchronizing power

3. 結論

尖頭負荷를 담당하는 水力發電은 起動하여 電力系統에 投入하거나, 運轉을 停止하기 위해 電力系統에서 分離하는 과정을 비롯하여 부하변동에 적용하기 위한 과도기에 非同期現象이 發生함을 이론적으로 정리하였다. 이때 發生하는 涡電流, 負荷抵抗, 涡流損, 非同期 토크 등의 現象을 해석하므로서 발전기 설계의 參考자료를 찾아내었다.

[참고문헌]

- [1] 이은웅, 이민명, 김일중, “차동기 공진현상에서 터보발전기 회전자의 전기적 특성과 Wedge의 현상”, 대한전기학회 논문지 40권 4호, pp.407-416, 1991
- [2] G.P. Tolstov, "Fourier Series", Dover Publication Inc, pp.173-194, 1962
- [3] A.G. Jack, "Negative-Sequence Currents on Losses in the Solid Rotor of a Turbogenerator", IEE Proc., Vol.127, Pt.c, No.2, pp.53-64, 1980