

Describing Function Method를 이용한 송전선의 전선도약(Galloping)현상 해석에 관한 연구

The Analysis of Power Line Galloping by Describing Function Method

盧 彰 注* · 朴 瀚 錫** · 邊 基 植***
(Chang-Ju Noh · Han-Suk Park · Gi-Sig Byun)

Abstract - Estimates of maximum amplitudes of conductor galloping are needed in order to determine appropriate phase-to-phase clearances on the overhead lines. One approach to obtaining these estimates is through the use of mathematical models of conductor galloping. Unfortunately, the models that consider both vertical conductor motion (Den Hartog type) and torsional conductor motion are often too complex for practical use. However, the estimates of maximum amplitude obtained from galloping models that assume only vertical (Den Hartog type) conductor motion tend to be too conservative. This paper presents the DF method to obtain the estimates of the amplitude and the frequency of galloping limit cycle, along with the wind pressure at which they occur, from a nonlinear dynamic model that considers both Den Hartog type and torsional conductor motion. From these results, the useful data for the line design guide and further insight into the mechanism of the conductor galloping are obtained.

Key Words : · Power line icing · Limit cycle
 · Galloping

1. 서 론

겨울철 전선에 얼어붙은 얼음은 간혹 송전선의 전선이 항공역학적으로 불안정한 형태가 되도록 하는데 이때 풍압에 의해서 그 도체는 저주파와 큰 진폭의 진동을 나타내게 된다. 이것을 전선도약(galloping) [1]이라 부른다. 그 진동의 진폭은

*正 會 員 : 韓國海洋大 機關工學科 教授 · 工博
**正 會 員 : 釜山工業大 電氣工學科 助教授
***正 會 員 : 釜山工業大 制御計測工學科專任講師
 · 工博
接受日字 : 1990年 10月 19日
1次修正 : 1991年 6月 10日
2次修正 : 1991年 9月 19日
3次修正 : 1992年 1月 20日

수 미터까지 이르게 되므로 선로간의 접촉이나 호광(arc)을 유발하며 또한 수많은 진동은 선로지지물에 심각한 부담을 주게된다.

도체의 도약(galloping)의 기구(mechanism)에 대한 연구는 크게 두가지로 분류된다. 그 하나는 Den Hartog이론[2]으로서 얼음이 얼어붙은 도체가 수직 진동만을 한다고 가정할 때 그 도체에 대한 바람의 입사각에 대해 부력(lift) 힘의 기울기가 부의 값을 갖고 그리고 인력(drag) 힘보다 클 때 전선도약(galloping)이 일어난다고 주장한다. 다른 하나는 수직-회전운동 교차이론[3, 4]으로서 이 연구에서 Nigol과 Clarke는 수직운동과 수평운동 그리고 회전운동을 하는 도체에 대한 수학적모델을 제시하고, 그리고 도체의 회전운동이 불안정하게 될때 그 도체의 수직운동과 회전운동의 자연주파수가 일치하거나 근접할 때 전선도약(galloping)이 일어난다고 한다. 이들 연구의 문제점은 수평운동이나 회전운동을 고려하지 않았거나[1], 또는 해석시 각 모드(mode)를 독립적으로 처리하였다[2]. 또한 이들 연구에서 제시한 모델들은 초기의 작은 진동만을 고려하게 되므로 선형동적방정식으로 된다. 그결과 오차가 큰 galloping의 진폭값을 가져온다. 최근 Egbert[5]는 전선도약(galloping) 도체의 모델을 제시하는데 전기간동안의 진동을 고려하였고, DF방법을 적용하여 그 비선형동적방정식의 해(즉 전선도약(galloping)의 최대 진폭과 주파수)를 계산하였다. 그러나 이 연구에서 제시한 수학적모델은 수직운동만을 고려하였으므로 계산 결과는 실제로 관측되는 전선도약(galloping)의 진폭[6]과 큰 차이를 보인다.

본 연구에서는 전기간 동안의 진동을 고려하여 수직운동과 회전운동을 동시에 행하는 도약(galloping)도체의 수학적모델을 제시하였고, 결과적으로 이들 이차연립비선형방정식을 푸는데 Describing Function(DF)방법이 유효함을 보여준다. 또한 본 연구의 결과와 [5]의 결과로부터, 많은 전선도약(Galloping) 연구가들이 믿어온 도체의 회전운동이 수직운동을 제한하고 있음을 입증하게 된다.

2. Describing Function(DF) Method

DF방법은 비선형 피드백제어 시스템의 한계주기(limit cycle)의 존재여부와 그 안정도 해석을 위해서 수년동안 사용되어온 해법이다. 그림1과 같은 시스템에 이 방법을 적용하여보자. 여기서

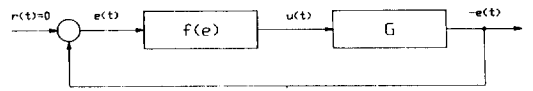


그림 1 DF해석을 위한 비선형 피드백 시스템의 블록선도

Fig. 1 Block diagram of a nonlinear feedback system for DF analysis

G는 선형동적요소이고 f는 비선형 시불변요소이다. 그림에서 신호 e(t)가 정현파일때 (즉 e(t) = E_{max}sin ωt), 이 신호가 f(e)를 통과한 후 출력, u(t)에는 고조파성분을 내포하게 된다. 만일 G가 충분한 저주파필터특성을 갖게 되면 그 출력의 1차고조파만 통과하게 되고 이 성분은 다시 f(e)로 피드백되어 정현적인 한계주기(limit cycle)을 보이게 된다. 그리고 이 한계주기(limit cycle)의 안정도는 f대신에 새로운 요소 N₁으로 대치시킴으로서 조사할 수 있다. 여기서 새로운 요소 N₁은 Fourier급수에 의해 다음과 같이 정의되어 진다.

$$N_1(E_{max}, \omega) = \frac{a_1^2 + b_1^2}{E_{max}} \sqrt{\tan^{-1}\left(\frac{a_1}{b_1}\right)} \quad (1)$$

여기서

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos \omega t dt \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin \omega t dt \quad (3)$$

이 새로운 함수 N₁을 Describing Function(DF) [7]라고 하고 이 함수는 E_{max}와 ω의 복소함수이다. 그림1에서 비선형요소 f대신에 N₁을 삽입할 때 보편적인 선형시스템의 안정도해석을 이용하여 한계주기(limit cycle)에 대한 조건을 조사할 수 있으며 이 조건은 주어진 비선형시스템의 근사적 조건이 된다.

3. DF 해석에 의한 Galloping의 최대진폭계산

위에서 언급된 Describing Function에 대한 기본개념을 전선도약(Galloping)의 최대진폭계산에 적용시켜 본다.

3.1 도체의 운동방정식

본 논문에서는 사용될 도약(galloping)도체에 대한 운동방정식을 세우기 위해 그림2와 같은 집중매개변수(lumped parameter) 모델을 생각한다. 이 모델에서 도체는 스프링과 댐퍼(damper)에 매

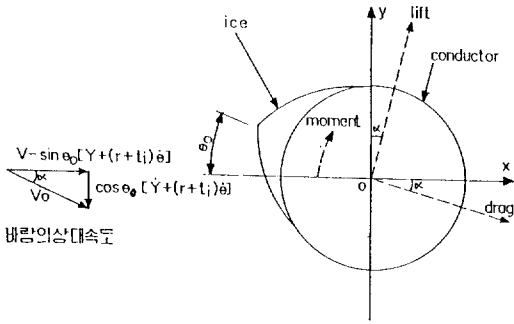


그림 2 바람 속에서 얼음이 얼어붙은 도체에 작용하는 힘들

Fig. 2 Action forces for ice coated-conductor in the wind

달린 강체이고, 이 도체는 수직과 회전운동만을 행하며 그리고 도체에 대한 풍속은 일정하다고 하자. 이때 풍압에 의해 도체에는 수직운동방향과

$$\begin{aligned}
 &(m + m_i) \ddot{Y} + K_1 \dot{Y} + T \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 Y \\
 &+ \frac{1}{2} \rho d \sqrt{[V - \sin(\theta_0)\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}]^2} \\
 &+ \sqrt{[\cos(\theta_0)\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}]^2} \times [-C_L(\alpha) \\
 &[V - \sin(\theta_0)\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}] \\
 &+ C_D(\alpha)\cos(\theta_0)\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}] \\
 &+ m_i r \cos(\theta_0) \ddot{\theta} = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 &J \ddot{\theta} + K_3 \dot{\theta} - \left\{ \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 - m_i r g \sin(\theta_0) \right\} \theta \\
 &- \frac{1}{2} \rho d^2 [[V - \sin(\theta_0)\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}]^2 \\
 &+ [\cos(\theta_0)\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}]^2] C_M(\alpha) \\
 &+ m_i r \cos(\theta_0) \ddot{Y} = 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서

$$\alpha = -\tan^{-1} \left[\frac{\cos(\theta_0)\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}}{V - \sin(\theta_0)\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}} \right] \tag{6}$$

$$G_1(s) = \frac{\frac{s}{(m + m_i)}}{s^2 + \frac{K_1}{(m + m_i)}s + \frac{T}{(m + m_i)} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2} \tag{7}$$

$$G_2(s) = m_i r \cos(\theta_0) s \tag{8}$$

$$G_3(s) = \frac{\frac{s}{(m + m_i)}}{s^2 + \frac{K_3}{J}s + \frac{1}{J} \left\{ P \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 - m_i r g \sin(\theta_0) \right\}} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 f_1(y, \theta) &= \frac{1}{2} \rho d \sqrt{[V - \sin\theta_0\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}]^2} \\
 &+ \sqrt{[\cos\theta_0\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}]^2} \\
 &\times [-C_L(\alpha)[V - \sin\theta_0\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}] \\
 &+ C_D(\alpha)\cos\theta_0\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}] \tag{10}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_2(y, \theta) &= -\frac{1}{2} \rho d [[V - \sin\theta_0\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}]^2 \\
 &+ [\cos\theta_0\{\dot{Y} + (r + t_i)\dot{\theta}\}]^2] C_M(\alpha) \tag{11}
 \end{aligned}$$

회전운동방향으로 관성(Inertia) 힘, 경도(Stiffness) 힘, 제동(Damping) 힘이 존재하게 되며 그리고 전선위에 얼어붙은 얼음으로 인한 전선단면적의 모양변화는 부력(Lift) 힘, 인력(Drag) 힘, 모멘트(Moment) 힘을 야기시킨다. 이들 힘들로 부터 시스템의 수직방향 비선형운동방정식은 식(4)로, 회전방향 비선형운동방정식은 식(5)로 주어진다.

이 식들에서 사용된 기호들은 부록에 정의한다. 식(4)와 (5)는 그림3과 같이 블록선도화 할 수 있으며, 이 그림에서 사용된 각 요소는 식(7), (8), (9), (10), (11)과 같이 표현된다.

3.2 부력(Lift)와 인력(Drag) 및 모멘트(Moment) 계수

식(4)와 (5)에서 언급된 부력(lift), 인력(drag)와 모멘트(moment) 계수들은 근사적인 값들로서 Hunt와 Richards[8]는 인력(drag)와 부력(lift) 계수를 식(12)와 (13)으로 나타냈고

$$C_D(\alpha) = 1 \quad -\infty < \alpha < \infty \tag{12}$$

$$C_L(\alpha) = \begin{cases} -0.6 & \alpha > 0 \\ 0.6 & \alpha < 0 \end{cases} \tag{13}$$

Lilien[9]는 5[mm]의 얼음이 얼어붙은 경우 도체의 모멘트(moment) 계수를 식(14)와 같이 나타냈다.

$$C_M(\alpha) = \begin{cases} 0.5 & \alpha < 0 \\ -0.5 & \alpha > 0 \end{cases} \tag{14}$$

3.3 한계주기 (Limit Cycle) 해석을 위한 시스템의 특성방정식 고찰

시스템의 비선형요소들이 DF들에 의해 대처될 때 선형화된 그 시스템의 특성방정식을 식(15)라 하자.

$$F(s) = \sum_{i=0}^N a_i s^i = 0 \tag{15}$$

여기서 a_i 는 DF들을 포함한 실수계수들이다. 만일 식(15)에서 $s=j\omega$ 를 대입하여 ω 의 실수부분과 허수부분으로 나눈후 이들 실수부분과 허수부분의 방정식에서 공통근 $\omega^2 \neq \omega_0^2$ 를 찾는다면($\omega \neq 0$), 이 ω_0 가 시스템의 한계주기(limit cycle)의 주파수가 된다.

(증명) : 특성방정식 $F(s)$ 에서 $s=j\omega$ 를 대입한 후 식(16), (17)와 같이 실수 부와 허수부로 방정식을 나눈다.

$$F_r(\omega) = a_0 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - a_6\omega^6 + \dots \tag{16}$$

$$\begin{aligned} F_i(\omega) &= a_1\omega - a_3\omega^3 + a_5\omega^5 - a_7\omega^7 + \dots \\ &= \omega(a_1 - a_3\omega^2 + a_5\omega^4 - a_7\omega^6 + \dots) \\ &= 0 \end{aligned} \tag{17}$$

식(16)과 식(17)의 근들은 복소근들이 됨이 분명하여 이 공통근을 ω_0^2 라 가정하자. 이때 식(15)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

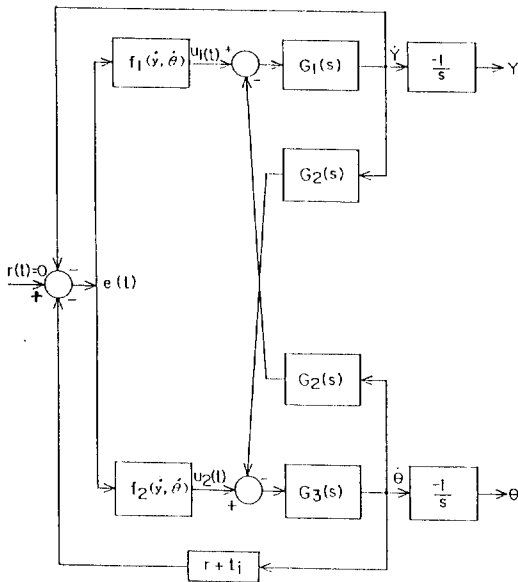


그림 3 Galloping도체의 모델에 대한 블록선도.
Fig. 3 Block diagram representation of galloping conductor model

$$\begin{aligned} F(j\omega) &= F_r(\omega) + jF_i(\omega) \\ &= (\omega^2 - \omega_0^2)\{F_r'(\omega) + jF_i'(\omega)\} \\ &= (-s^2 - \omega_0^2)\{F_r'(\omega) + jF_i'(\omega)\} \\ &= 0 \end{aligned} \tag{18}$$

여기서 $F_r'(\omega)$ 와 $F_i'(\omega)$ 는 $F_r(\omega)$ 와 $F_i(\omega)$ 를 $(\omega^2 - \omega_0^2)$ 으로 나눈 나머지 다항식이다. 따라서 특성방정식(15)의 근 $s=j\omega_0$ 는 시스템이 이 주파수에서 진동함을 의미한다. 결국 그림1에서의 DF의 개념을 그림3의 모델에 적용시킬 수 있으며 이것은 식(4), (5)와 같이 주어진 전선도약(galloping)도체의 운동방정식에 대한 최대진폭계산을 DF방법을 적용하여 계산할 수 있음을 의미한다. 이 경우 한계주기(limit cycle)은 변수 y 나 θ 대신에 y 와 θ 를 포함하고 진폭계산은 이들 y 와 θ 를 적분하여 쉽게 구할 수 있다.

3.4 한계주기(Limit Cycle) 해석

수직-회전교차이론[3, 4]에 의하면 전선도약(galloping)은 수직운동과 회전운동의 자연주파수가 일치할 때 발생하므로 그림3에서 $y(t)$ 와 $\theta(t)$ 를 식(19)와 식(20)으로 가정하자.

$$\dot{y}(t) = \dot{Y}_{\max} \sin(\omega t) \tag{19}$$

$$\dot{\theta}(t) = (r + t_i) \dot{\theta}_{\max} \sin(\omega t + \phi) \tag{20}$$

두 신호의 합성을 $e(t)$ 라 하고

$$\begin{aligned} e(t) &= \dot{Y}_{\max} \sin(\omega t) + (r + t_i) \dot{\theta}_{\max} \sin(\omega t + \phi) \\ &= E_{\max} \sin(\omega t + \Phi) \end{aligned} \tag{21}$$

이 $e(t)$ 가 그림3의 비선형요소 $f_1(e)$ 와 $f_2(e)$ 를 통과하게 되면 많은 고조파 성분을 갖는 신호 $u_1(t)$ 와 $u_2(t)$ 로 되며, 이들이 $G_1(s)$ 와 $G_3(s)$ 에 의해 1차 고조파만 통과하게 된다. 이들 $u_1(t)$ 와 $u_2(t)$ 의 1차고조파에 의해 만들어진 DF들(즉, N_1 과 N_2)은 식(22)와 (23)에 의해 수치해석적으로 계산되어진다.

$$N_1 = \frac{1}{\pi(\dot{Y}_{\max}, \dot{\theta}_{\max}, \Phi)} \int_{\Phi}^{\Phi+2\pi} u_1(t) \sin(\omega t) dt \tag{22}$$

$$N_2 = \frac{1}{\pi(\dot{Y}_{\max}, \dot{\theta}_{\max}, \Phi)} \int_{\Phi}^{\Phi+2\pi} u_2(t) \sin(\omega t) dt \tag{23}$$

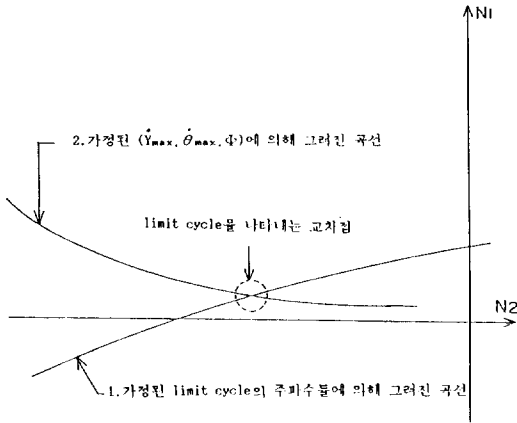


그림 4 가정된 주파수(ω)와 진폭(\dot{Y}_{max} , $\dot{\theta}_{max}$, ϕ)에 의한 DF곡선들
Fig. 4 Describing function set curves with respect to assumed frequencies (ω) and amplitudes(\dot{Y}_{max} , $\dot{\theta}_{max}$, ϕ)

지금 비선형요소 f_1 과 f_2 가 N_1 및 N_2 에 의해 대치될 때 그림3에서 특성방정식은 식(24)와 같이 된다.

$$1 + N_1\{G_1(s) - (r + ti)G_1(s)G_2(s)G_3(s)\} + N_2\{(r + ti)G_3(s) - G_1(s)G_2(s)G_3(s)\} - G_1(s)G_2(s)^2G_3(s) = 0 \quad (24)$$

3.3에서 언급된 특성방정식의 성질을 이용하여 임의로 잡은 ω_0 (이 값은 임의의 진동주파수가 된다)에 대한 특성방정식을 실수부와 허수부로부터 N_1 과 N_2 를 찾는다. 이런 과정을 여러개의 임의의 값 ω_0 에 대해 행하면 그림4의 1과 같은 곡선이 된다. 한편 식(22)와 (23)으로부터 임의로 택한 \dot{Y}_{max} , $\dot{\theta}_{max}$, ϕ 들에 대해 N_1 과 N_2 값을 구하면 그림4의 2와 같은 곡선이 된다. 이들 곡선의 만나는 점이 구하고자 하는 한계주기(limit cycle)의 주파수 \dot{Y}_{max} , $\dot{\theta}_{max}$ 가 되다.

3.5 실제적용 예

Table1과 같은 특성을 가진 ACSR송전선에 대해 위에서 언급된 DF방법에 의해 $y(t)$ 와 $\dot{\theta}(t)$ 의 결과를 구하였다.

$$\dot{y}(t) = 4.33\sin(1.56t) [m/s] \quad (25)$$

표 1 적용예를 위한 송전선 데이터
Table 1 Transmission line data for an example

송전선 모델	ACSR* "DRAKE" 26/7**
도체의 무게(kg/m)	1.628
도체반경(mm)	14.071
도체장력(N)	26000
도체의 회전 Stiffness(Nm/rad)	432
도체의 수직 Damping계수(kg/m)	0.182
도체의 회전 Damping계수(kg/m)	0.002541
철탑간 간격(m)	244
얼음무게(kg/m)	0.17
얼음의 두께(mm)	5
바람속도(m/s)	10
바람밀도(kg/m ³)	1.2929

* Aluminum conductor steel reinforced
 ** 26 aluminum and 7 steel strands

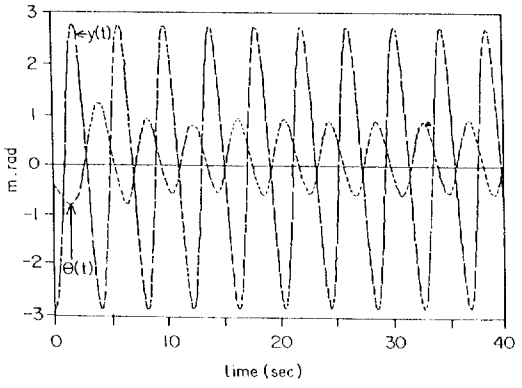


그림 5 Runge-Kutta Algorithm에 의한 $y(t)$ 와 $\theta(t)$ 의 응답.
Fig. 5 Responses of $y(t)$ and $\theta(t)$ by Runge-Kutta algorithm

$$\dot{\theta}(t) = 1.1\sin(1.56t + 3.14) [rad/s] \quad (26)$$

이 식을 적분하면

$$y(t) = -2.76\cos(1.56t) [m] \quad (27)$$

$$\theta(t) = -0.7\cos(1.56t + 3.14) [rad] \quad (28)$$

이 되며 이것은 수직으로 약 최대(peak-to-peak) 5.4m의 진동과 최대(peak-to-peak) 80°의 회전운동을 나타내며 진동주파수는 0.249[Hz]가 됨을 의미한다.

3.6 결과의 비교

식(12), (13), (14)의 계수값을 갖는 식(4)와 (5)의 모델에 대해 Runge-Kutta 알고리즘을 이용하여 수치해석적으로 구한 결과가 그림5와 같다. 이 결과로부터 도체는 수직으로 최대(peak-to-peak) 5.4m의 진동과 최대(peak-to-peak) 68.8°의 회전운동을 행한다. 한편 Rawlins[6]는 실제로 관찰되는 진동(galloping)도체에 관해 자료를 모아 도식화 하였다. 이 자료로부터 위에서 언급한 모델에 대해 최대(peak-to-peak) 4.88m의 수직운동을 행하고 있다. 이들의 결과로부터 진동(galloping)도체의 해석에 대한 DF방법의 유효성이 입증된다.

4. 결 론

수직운동 및 회전운동을 동시에 행하는 송전선 진동(galloping)의 진폭계산이 DF방법에 의해 비교적 단순하게 해석하였다. 이들 결과와 수직운동만을 고려한 전선진동(galloping)모델로부터 DF방법에 의해 해석한 Egbert[5]의 결과와 비교할 때 회전운동이 수직운동을 제한한다는 예상을 입증하게 된다. DF방법은 앞으로 수직운동, 회전운동 및 수평운동을 동시에 행하는 송전선의 진동(galloping)모델을 해석하는데 주요한 기법이 될 것이며 이들 결과는 좀더 정확한 전선진동(galloping)의 진폭 및 주파수결과를 가져오게 될 것이다.

부 록

List of Symbols

- α : 입사각[rad]
- C_D : 단위길이당 도체의 drag계수[m⁻¹]
- C_L : 단위길이당 도체의 lift계수[m⁻¹]
- C_M : 단위길이당 도체의 moment계수[m⁻¹]
- d : 도체의 직경[mm]
- e : 비선형요소(f_1, f_2)에 대한 정현과입력
- g : 중력계수[m/s²]
- J : 도체의 단위길이당 극관성모멘트[N-m]
- K_1 : 도체의 단위길이당 수직 damping계수[Kg·m/s]

- K_3 : 도체의 단위길이당 회전 damping계수[Kg·m/s]
- L : 송전선 지지대 사이의 길이[m]
- m : 도체의 단위길이당 무게[Kg/m]
- m_i : 도체의 단위길이당 얼어붙은 얼음의 무게 [Kg/m]
- n : 고조파 수
- P : 도체의 단위길이당 회전 stiffness[N·m/rad]
- r : 도체의 반경[mm]
- ρ : 공기밀도[Kg/m³]
- s : 라플라스변환 변수
- T : 도체의 인장력[N]
- t_i : 얼음의 두께[mm]
- θ : 회전각[rad]
- θ_0 : 초기바람각 [rad]
- u_1, u_2 : 비선형요소 f_1 과 f_2 의 출력신호들
- V : 바람속도[m/s]
- ω : 각속도[rad/s]
- y : 수직운동거리[m]

참 고 문 헌

- [1] C.B. Rawlins, "Galloping Conductors," in Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion, Palo Alto, CA: Electric Power Reserch Institutes, 1979, ch. 4, pp. 113~168
- [2] J.P. Den Hartog, "Transmission Line Vibration Due to Sleet," AIEE Transactions, Vol. 51, 1932, pp. 1074~6
- [3] O. Nigol and G.I. Clarke, "Conductor Galloping and Control based on Torsional Mechanism," IEEE Conf. Paper, C74016~2, 1974
- [4] O. Nigol and P.G. Buchan, "Conductor Galloping Part2-Torsinal Mechanism," IEEE Trans., PAS-100, No. 2, 1981, pp. 708~720
- [5] R.I. Egbert, "Estimation of Maximum Amplitude of Conductor Galloping by Describing Function Analysis," IEEE Trans., PWRD-1, 1986, pp. 251~257
- [6] C.B. Rawlins, "Analysis of Conductor Galloping Field Observation-Single Conductor," IEEE Trans., PAS-100, 1981, pp. 3744~3753
- [7] A. Gelb. and W..E. Vander Velde, "Multiple-Input Describing Functions and Nonlinear Systems Design," New York, NY:

McGraw-Hill, 1968

- [8] J.C.R. Hunt and D.J. W. Richard, "Overhead-line Oscillations and the Effect of Aerodynamic Dampers," Proceeding of IEEE. Vol. 116, No. 11, 1969, pp. 1869~1874
- [9] J.L. Lilien and H. Dubois, "Overhead line

vertical galloping on bundle configurations : stability criterion and amplitude prediction, voerhead line design and construction : theory and practice (up to 150 KV)", The Institution of Electrical Engineers, Savoy Place, London WC, UK, Conference Publication, No. 297, 1988, pp. 28~30

저 자 소 개



노창주(盧彰注)

1935년 2월 28일생. 1958년 한국 해양대 기관학과 졸업. 1976년 동 대학원 졸업(공박). 1976년 영국 Loughorrough공대 전기전자 과 객원교수. 현재 한국해양대 기관공학과 교수.



박한석(朴瀚錫)

1955년 3월 23일생. 1981년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 한국해양대 대학원 박사과정. 현재 부산공업대 전기공학과 조교수.



변기식(邊基植)

1957년 7월 5일생. 1981년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 미국 Wichita State Univ. 졸업(공박). 현재 부산공업대 제어계측공학과 전임강사.