

複導体送電線の捻回に関する理論的考察(続報)

—懸垂径間および張力平衡金具の影響—

Theoretical Consideration on the Twist Characteristics of Double Conductor Transmission Lines (Report 2)

—Effects of Suspension Clamp and Tension Balancing Yoke—

山崎 松次郎* 星 野 弘 之**
Matsujirō Yamazaki Hiroyuki Hoshino

内 容 梗 概

多導体送電線では捻回復元性、各素導体電線の永久伸の差による、弛度不ぞろい対策などの特殊な機械的問題がある。ねん回復元性についてはすでに実験的、理論的両面から研究がなされているが、懸垂装置で連続している径間ではねん回による張力変化が他径間に伝達されるのでねん回復元性がよくなることが考えられる。また各素導体間の張力を平衡させるような金具を用いた場合にも同様なことが予測される。これら懸垂装置や特殊な張力平衡金具の作用について理論的解析を行った。またこれらの場合について電線実長の微小変化、電線単位長重量の微小変化、金具の製造誤差の影響などを合わせて解析した。

1. 緒 言

超高圧送電線としての多導体送電線はすぐれた電気的特性をもっており近年各所に建設され運転にはいっている。この送電線は通常40 cmの間隔に同相の電線を平行架線したものであり、長年月にわたって各導体の配置間隔を保持する方法について十分研究の必要がある。これら送電線には各径間にスペーサが配置され風圧下においても各導体の間隔が一定範囲に保持されるようになっている。また各導体の永久伸の差によって生ずる各導体の弛度差を防止乃至は補正する方法も種々考えられる。

多導体送電線の各径間のスペーサ配置間隔はねん回復元性の良否からいって大きな問題であり、数年来種々検討されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。従来の理論的検討では主として両引留部が耐張装置となっている径間について考察されているが、一般に懸垂径間ではねん回復元性がよいことが経験されている。従来の理論的検討ではねん回時の各導体の張力変化が小さい送電線ではねん回復元性がよくなることが考えられ、懸垂径間ではこれと等価的な現象があるのではないかと考えられる。またねん回時の各導体の張力変化を小さくするためには引留部の金具に特殊な設計を施し、各導体の張力を平衡させることが考えられる。筆者は懸垂径間および張力平衡金具を使用した場合の多導体送電線の力学的特性を理論的に解析したので報告する。

2. 懸垂径間と捻回復元性

懸垂装置は隣接径間の水平張力を伝達する作用をもっている。それゆえ被ねん回径間が捻回によって水平張力の変化を起すと隣接径間に張力変化が伝達される。この張力変化の伝達方法は懸垂装置の構造によって種々異なったものとなる。複導体送電線で通常用いられている懸垂装置はボールソケット形の結合部をもち、ねん回現象のように1導体の張力が増加するとほかの導体の張力がほぼ同量だけ減少するような場合にはがい子連の流れはなく、2連ヨークの動きによって張力変化がそのまま隣接径間に伝達されるようになっている。それゆえ張力変化が起ると2連ヨークの動きによって径間長が微小変化する。送電線の形態を放物線に近似⁽³⁾すると径間長の微小変化による張力変化は次のように計算される。

$$L = \left(S + \frac{W^2 S^2}{24 T^2} + \frac{H^2}{2 S} \right) \left(1 - \frac{T}{E A} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで S : 径間長 H : 径間高低差
 W : 電線単位長重量 T : 水平張力
 E : 電線の弾性係数 A : 電線の断面積

H の変化はないので

$$dL = \frac{\partial L}{\partial S} dS + \frac{\partial L}{\partial T} dT + \frac{\partial L}{\partial W} dW$$

$$dT = \frac{dL - \frac{\partial L}{\partial S} dS - \frac{\partial L}{\partial W} dW}{\partial L / \partial T} \dots \dots \dots (2)$$

となる。(2)式の各項を計算すると

$$\frac{\partial L}{\partial S} = \left(1 + \frac{W^2 S^2}{8 T^2} - \frac{H^2}{2 S^2} \right) \left(1 - \frac{T}{E A} \right)$$

$$- \frac{\partial L}{\partial T} = \frac{W^2 S^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{E A} \right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24 T^2} + \frac{H^2}{2 S} \right) \frac{1}{E A}$$

$$\frac{\partial L}{\partial W} = \frac{W S^3}{12 T^2}$$

となる。ゆえに

$$dT = \frac{\left(1 + \frac{W^2 S^2}{8 T^2} - \frac{H^2}{2 S^2} \right) \left(1 - \frac{T}{E A} \right) dS + \frac{W S^2}{12 T^2} dW - dL}{\frac{W^2 S^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{E A} \right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24 T^2} + \frac{H^2}{2 S} \right) \frac{1}{E A}} \dots \dots \dots (3)$$

となる。 dW , dL がともに零ならば

$$\frac{dT}{dS} = \frac{\left(1 + \frac{W^2 S^2}{8 T^2} - \frac{H^2}{2 S^2} \right) \left(1 - \frac{T}{E A} \right)}{\frac{W^2 S^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{E A} \right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24 T^2} + \frac{H^2}{2 S} \right) \frac{1}{E A}} \dots \dots \dots (4)$$

いまねん回によって被ねん回径間の水平張力が ΔT だけ変化したとすると被ねん回径間の電線の架線状態の実長の変化 ΔL は被ねん回径間の径間長を S として

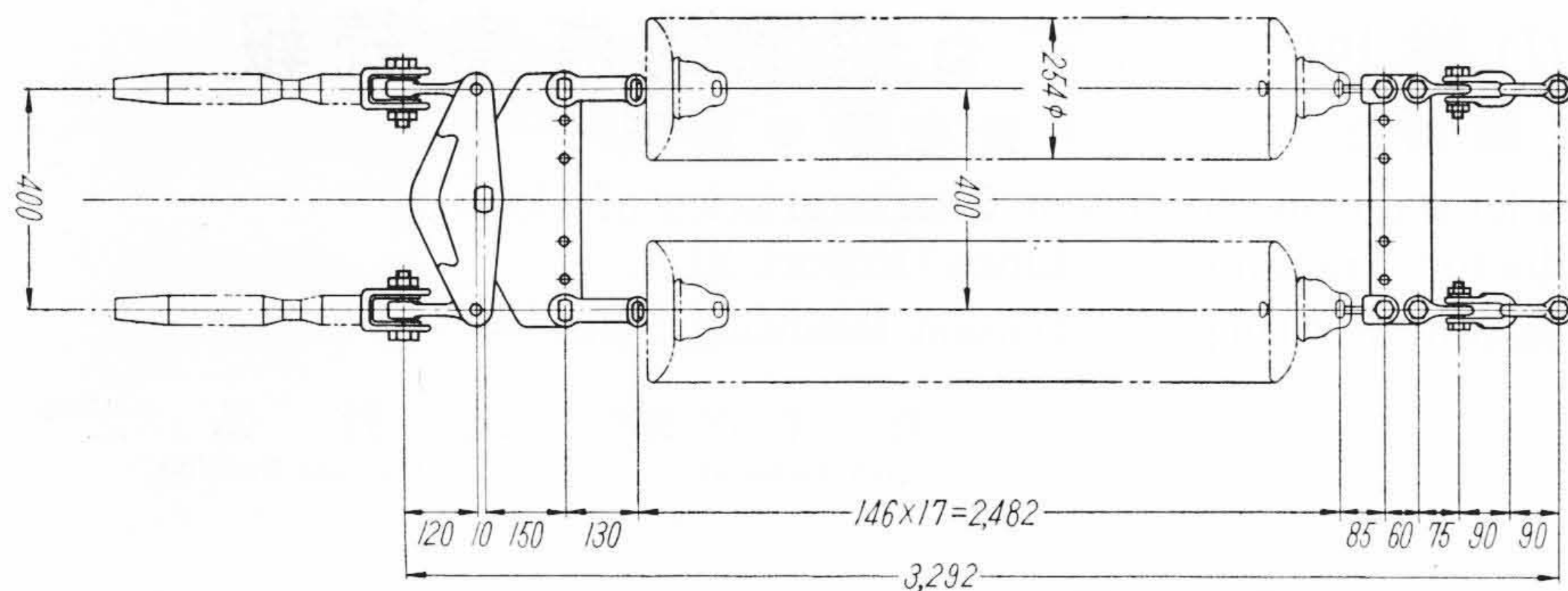
$$\Delta L \doteq \frac{S}{E A} \Delta T$$

である。 ΔT の張力変化による隣接径間の径間長微小変位 ΔS は(4)式によって

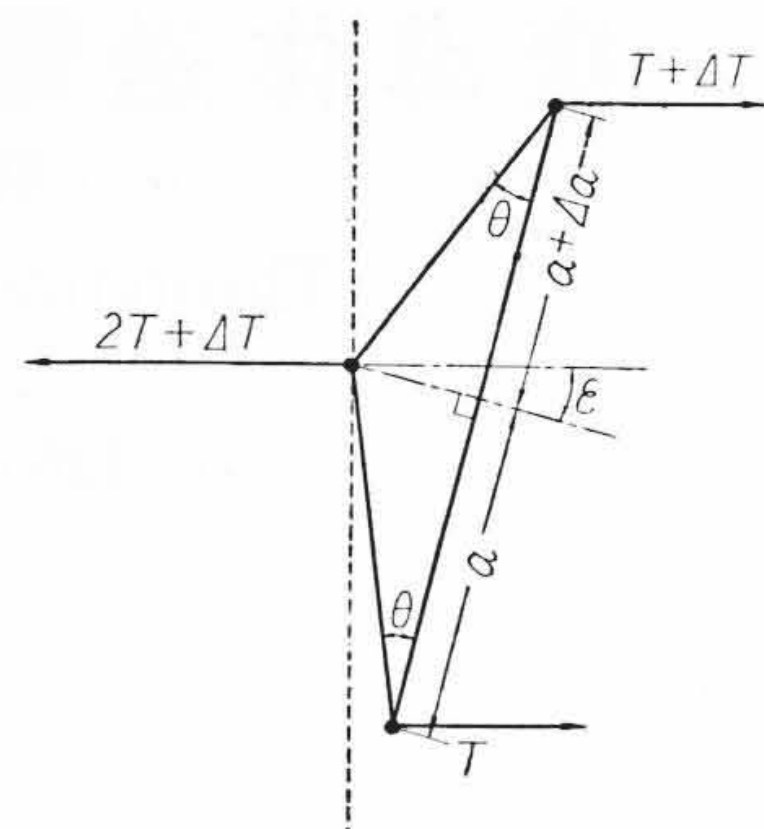
$$\Delta S_1 = \frac{\partial S_1}{\partial T} \Delta T = \frac{\frac{W^2 S_1^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{E A} \right) + \left(S_1 + \frac{W^2 S_1^3}{24 T^2} + \frac{H_1^2}{2 S_1} \right) \frac{1}{E A}}{\left(1 + \frac{W^2 S_1^2}{8 T^2} - \frac{H_1^2}{2 S_1^2} \right) \left(1 - \frac{T}{E A} \right)}$$

* 関西電力株式会社工務部送電課

** 日立電線株式会社電線工場



第1図 張力平衡金具を用いた2連耐張装置



第2図 張力の平衡状態

ここで S_1 : 隣接径間の径間長

H_1 : 高低差

また $\partial L / \partial S$ から

$$\Delta S = \frac{\Delta L}{\left(1 + \frac{W^2 S^2}{8T^2} - \frac{H^2}{2S^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right)} = \frac{S \Delta T}{\left(1 + \frac{W^2 S^2}{8T^2} - \frac{H^2}{2S^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right)}$$

となる。 ΔS と ΔS_1 は等しいから被ねん回径間のみについての実効的な電線の弾性係数 EA_{eff} は

$$\frac{S}{EA_{\text{eff}}} \Delta T = \frac{S}{EA} \Delta T + \frac{\left(1 + \frac{W^2 S^2}{8T^2} - \frac{H^2}{2S^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right) \left\{ \frac{W^2 S_1^3}{12T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S_1 + \frac{W^2 S_1^3}{24T^2} + \frac{H_1^2}{2S_1}\right) \frac{1}{EA} \right\}}{\left(1 + \frac{W^2 S_1^2}{8T^2} - \frac{H_1^2}{2S_1^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right)} \Delta T$$

$$EA_{\text{eff}} = \frac{EA}{1 + \frac{EA}{S} \left\{ \frac{\left(1 + \frac{W^2 S^2}{8T^2} - \frac{H^2}{2S^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right) \left\{ \frac{W^2 S_1^3}{12T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S_1 + \frac{W^2 S_1^3}{24T^2} + \frac{H_1^2}{2S_1}\right) \frac{1}{EA} \right\}}{\left(1 + \frac{W^2 S_1^2}{8T^2} - \frac{H_1^2}{2S_1^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right)} \right\}} \dots\dots\dots (5)$$

となる。比較的高低差の少ないスパンでは近似的に

$$EA_{\text{eff}} = \frac{EA}{1 + \frac{EA}{S} \left(\frac{W^2 S_1^3}{12T^3} + \frac{S_1}{EA} \right)} \dots\dots\dots (5)'$$

とすることができる。さらに連続して n 径間が懸垂径間となっている場合には

$$EA_{\text{eff}} = \frac{EA}{1 + \frac{EA}{S} \sum_n \left(\frac{W^2 S_n^3}{12T^3} + \frac{S_n}{EA} \right)} \dots\dots\dots (6)$$

となる。これらの計算の場合には張力変化による懸垂がい子連の線路方向への流れを考慮しない。ねん回現象の場合には複導体中の1導体が張力変化 ΔT を起すとほかの1導体が $-\Delta T$ の変化をするため懸垂装置は垂直方向を軸として回転するだけであるからである。ねん回復元性の理論的解析結果では EA を含む係数として α を用いており、 α はつぎのようにして計算される。

$$\alpha = \frac{12T^3}{EAS^2W^2} \quad \alpha_{\text{eff}} = \frac{12T^3}{EA_{\text{eff}}S^2W^2} \dots\dots\dots (7)$$

懸垂径間では(7)式によって α_{eff} を計算しねん回復元性を論ずることができる。

3. 張力平衡金具の構造

上述したようにねん回時には1導体が ΔT の張力変化を起すとほかの導体が $-\Delta T$ の張力変化をする。それゆえヨークを用いて導体間の張力が自動的に平衡するようにすれば、ねん回復元性を改善できると考えられる。またこのようなヨークで張力平衡を行えば各 *

* 導体の永久伸びの差によって張力差が生じた場合に弛度変化を抑止することができると考えられる。さらに電線の各素線の線引時の直径誤差、架線後の付着物の差などに起因する電線の単位長重量の微小な差による弛度の不平衡などが減少できると考えられる。これらの観点から張力平衡金具の解析を行いその効果を確かめた。

張力平衡金具を用いた耐張装置を第1図に示す。がい子連の充電側のヨークに一点支持方式のヨークが取り付けられている。このヨークは電線の張力差によって傾斜し導体間の張力を平衡させる作用をする。このヨークの力学的平衡関係を計算する。

ヨークには製造上の寸法誤差があるものとし、第2図に示すような形をしているものとする。力の平衡は第2図を参照して

$$aT \cos(\theta - \epsilon) = (a + \Delta a)(T + \Delta T) \cos(\theta + \epsilon)$$

となる。微小項を消去して

$$T \frac{\Delta a}{a} + \Delta T = - \frac{2T \sin \theta \sin \epsilon}{\cos(\theta + \epsilon)}$$

となる。ヨークが角度 ϵ だけ傾いたことによる各導体支持点の位置の差、すなわち各導体の径間長の微小変化分を ΔS とすると

$$\Delta S = 2a \sin \epsilon \cos \theta$$

$$\frac{\Delta S}{T \frac{\Delta a}{a} + \Delta T} = - \frac{a \cos \theta \cos(\theta + \epsilon)}{T \sin \theta} \dots\dots\dots (8)$$

となる。 ϵ は小さいものとすれば(8)式の右辺は定数となる。

ここであとの計算を容易とするために

$$\frac{a \cos \theta \cos(\theta + \epsilon)}{T \sin \theta} = K_1 \quad \frac{T}{a} = K_2 \quad \text{と置く。}$$

4. 張力平衡点の算出

(3)式によって計算すると ΔL , ΔW の微小変化があった場合に生ずる張力変化 ΔT は

$$\Delta T = \frac{W S^2}{12 T^2} \Delta W - \Delta L \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{W^2 S^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24 T^2} + \frac{H^2}{2S}\right) \frac{1}{EA}$$

である。この張力変化は張力平衡金具に作用しヨークに傾きを生ずる。その結果径間長が微小変化 ΔS を生ずる。径間長の微小変化の起る方向は上述の張力変化を打消す方向である。 ΔS の径間長微小変化による張力変化 $\Delta T'$ は(3)式によって

$$\Delta T' = \frac{\left(1 + \frac{W^2 S^2}{8 T^2} - \frac{H^2}{2 S^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right) \Delta S}{\frac{W^2 S^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24 T^2} + \frac{H^2}{2S}\right) \frac{1}{EA}} \dots\dots\dots (10)$$

となる。この $\Delta T'$ は張力変化を打消す方向に作用するからちょうど張力の自動平衡機構となる。このような平衡条件を求めるには近年自動制御工学の分野で開発されているブロック線図と伝達関数による方法が有利である。(8)~(10)式の関係性をブロック線図に書くと第3図のようになる。このブロック線図に従って平衡条件を求めると次のようになる。

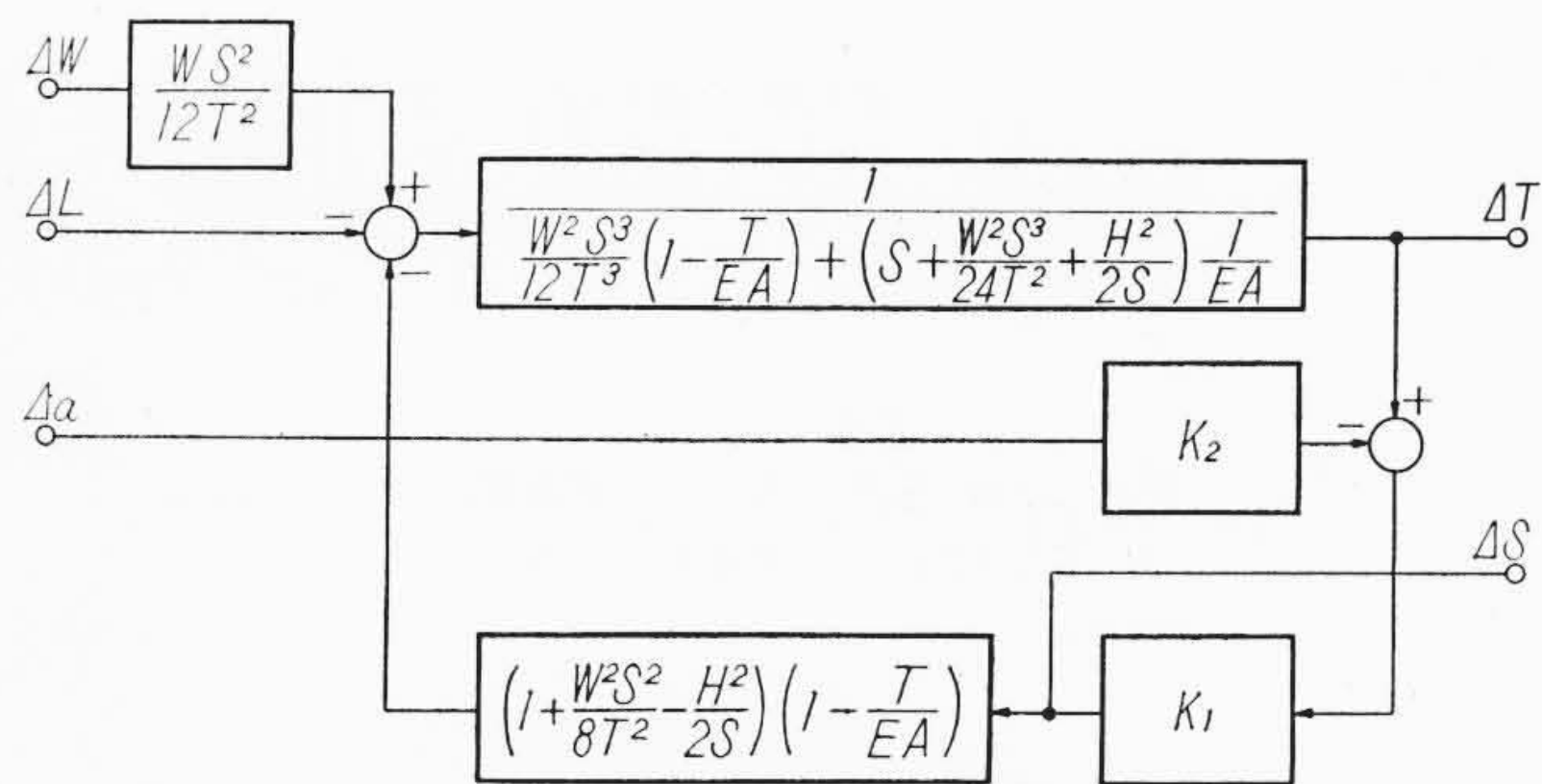
$$-\frac{\Delta T}{\Delta a} = \frac{K_2}{1 + \frac{W^2 S^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24 T^2} + \frac{H^2}{2S}\right) \frac{1}{EA}} \dots\dots\dots (11)$$

$$K_1 \left(1 + \frac{W^2 S^2}{8 T^2} - \frac{H^2}{2 S^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta L} = \frac{1}{\left\{1 + \frac{W^2 S^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24 T^2} + \frac{H^2}{2S}\right) \frac{1}{EA}\right\} \left\{\frac{W^2 S^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24 T^2} + \frac{H^2}{2S}\right) \frac{1}{EA}\right\}} \dots\dots\dots (12)$$

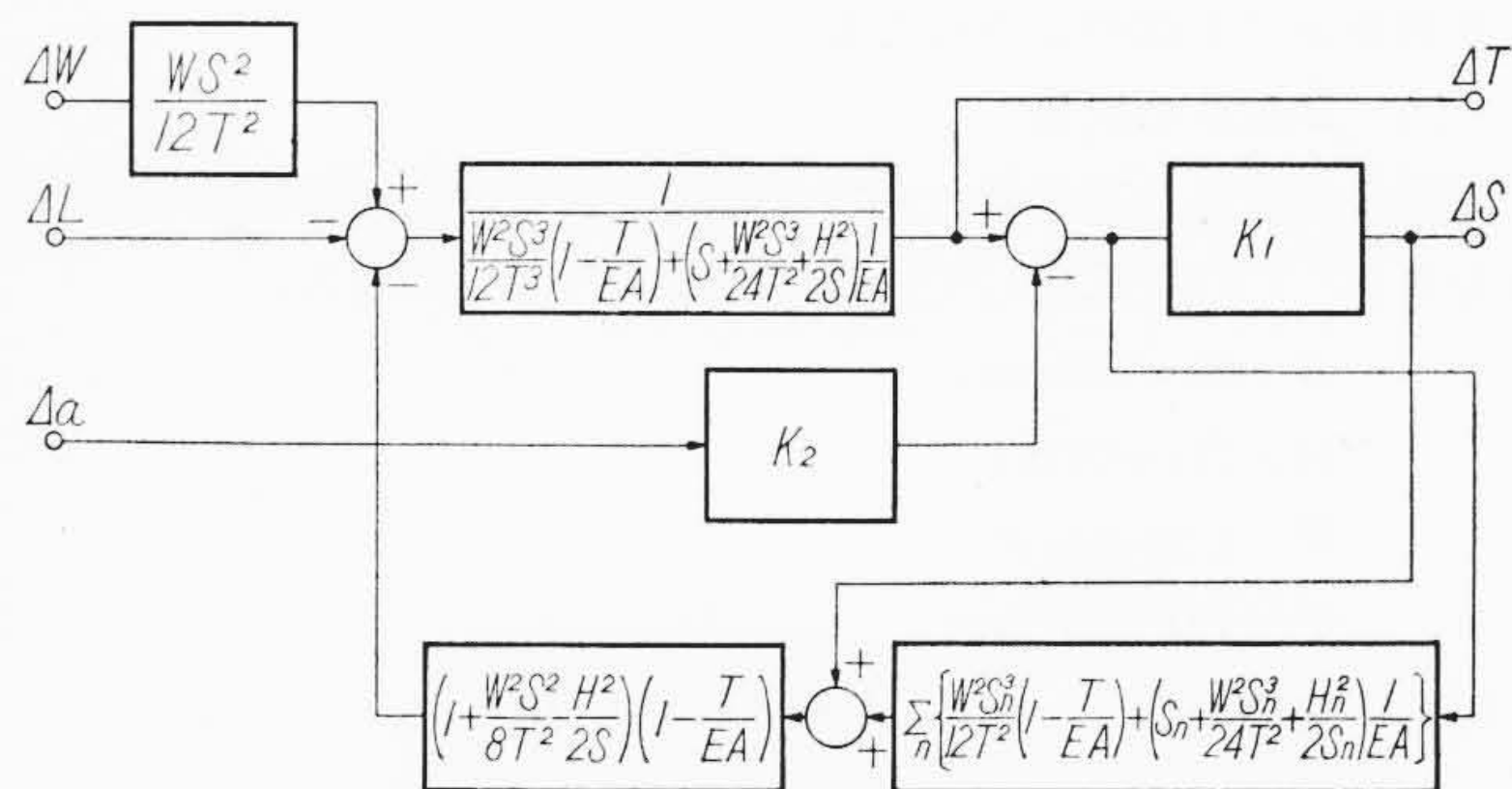
$$-\frac{\Delta T}{\Delta W} = \frac{\Delta T}{\Delta L} \times \frac{W S^2}{12 T^2} \dots\dots\dots (13)$$

上記の計算では径間両端の支持方式は耐張装置とし、そのうちの片側に張力平衡装置を用いた場合であるが、両側とも張力平衡装置を用いた場合には ΔT の張力変化によって両側で径間長の微小変**



張力平衡金具1個使用、両端耐張引留時

第3図 張力平衡機構のブロック線図



張力平衡金具1個使用、懸垂径間連続時

第4図 張力平衡機構のブロック線図

**化が起るため K_1 を2倍にとって計算すればよい。

懸垂径間が連続している場合には張力変化によって各径間が伸縮する。この伸縮は上述の張力平衡金具の作用に加算される。それゆえ張力平衡機構のブロック線図は第4図のようになる。第4図に従って張力平衡条件を求めると次のようになる。

$$-\frac{\Delta T}{\Delta a} = \frac{K_2}{1 + \frac{W^2 S^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24 T^2} + \frac{H^2}{2S}\right) \frac{1}{EA}} \dots\dots\dots (14)$$

$$\left\{ \sum_n \left\{ \frac{W^2 S_n^2}{12 T^2} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S_n + \frac{W^2 S_n^3}{24 T^2} + \frac{H_n^2}{2 S_n}\right) \frac{1}{EA} \right\} + K_1 \right\} \left(1 + \frac{W^2 S^2}{8 T^2} - \frac{H^2}{2 S^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta L} = \left(\frac{1}{\left\{ \sum_n \left\{ \frac{W^2 S_n^3}{12 T^2} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S_n + \frac{W^2 S_n^3}{24 T^2} + \frac{H_n^2}{2 S_n}\right) \frac{1}{EA} \right\} + K_1 \right\} \left(1 + \frac{W^2 S^2}{8 T^2} - \frac{H^2}{2 S^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right)} \right) \times \frac{1}{\left\{ \frac{W^2 S^3}{12 T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24 T^2} + \frac{H^2}{2S}\right) \frac{1}{EA} \right\}} \dots\dots\dots (15)$$

$$-\frac{\Delta T}{\Delta W} = \frac{\Delta T}{\Delta L} \times \frac{W S^2}{12 T^2} \dots\dots\dots (16)$$

これらの計算式での ΔL , ΔW は連続した懸垂径間中の特定の1径間で実長、単位長重量が変化することを意味している点に注意する必要がある。また懸垂装置の構造は上述の(5)式の算出の場合*

*と同様なものを考えた。

(11)~(16)式の結果を見ると張力平衡金具を用いた場合にも見かけ上は単独引留径間で実効的な電線の弾性係数が変化したような結果となることが考えられる。(5)式と同様な計算方法で EA_{eff} を求めると

$$EA_{\text{eff}} = \frac{EA}{1 + \frac{EA}{S} \sum_n \left\{ \left(1 + \frac{W^2 S^2}{8T^2} - \frac{H^2}{2S^2}\right) \left(1 - \frac{T}{EA}\right) \left\{ \frac{W^2 S_n^3}{12T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S_n + \frac{W^2 S_n^3}{24T^2} + \frac{H_n^2}{2S_n}\right) \frac{1}{EA} \right\} \right\} + \frac{EAK_1}{S}}}$$

$$\doteq \frac{EA}{1 + \frac{EA}{S} \sum_n \left(\frac{W^2 S_n^3}{12T^3} + \frac{S_n}{EA} \right) + \frac{EAK_1}{S}} \quad \text{となる。}$$

5. 計算結果の一例

上述の計算によって理論的解析が行われたが、実用上はその効果がどの程度となるかを検討する。330 mm²、複導体送電線について計算例を示すと次のようになる。

(1) EA_{eff} の計算

径間長 400 m、高低差なしで2径間が懸垂装置で連絡している場合を考え、(5)式に従って計算すると次のようになる。

$$S = S_1 = 400(\text{m})$$

$$H = H_1 = 0(\text{m})$$

$$W = 1.32(\text{kg/m})$$

$$T = 1.9 \times 10^3(\text{kg})$$

$$\text{単独径間の場合} \quad EA = 3.168 \times 10^6(\text{kg})$$

$$EA_{\text{eff}} = \frac{EA}{1 + \frac{EA}{S} \left\{ \frac{W^2 S^3}{12T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24T^2}\right) \frac{1}{EA} \right\}}$$

$$= \frac{EA}{12.7} = 0.249 \times 10^6(\text{kg})$$

$$\text{ゆえに} \quad \alpha_{\text{eff}} = \frac{12T^3}{EA_{\text{eff}} S^2 W^2} = 1.19$$

径間長 400m の単独引留径間では

$$\alpha = \frac{12T^3}{EA S^2 W^2} = 0.094$$

で α は 12.7 倍となっている。 $\alpha_{\text{eff}} = 1.19$ となるのは単独径間で径間長 112m に相当する。それゆえねん回復元性が良くなることが推論され実験的にも経験されている。

(2) 張力平衡金具の効果

張力平衡金具の各部寸法をつぎのように仮定して計算する。

$$a = 0.2(\text{m})$$

$$\sin \theta = 0.05$$

$$T = 1.9 \times 10^3(\text{kg})$$

$$K_1 \doteq \frac{0.2}{1.9 \times 10^3 \times 0.05} \doteq 2.11 \times 10^{-3}$$

両端引留、径間長 400m の単独径間の片側に張力平衡金具を用いると

$$EA_{\text{eff}} = \frac{EA}{1 + \frac{EAK_1}{S}} = \frac{EA}{17.6} = 0.18 \times 10^6(\text{kg})$$

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{12T^3}{EA_{\text{eff}} S^2 W^2} = 1.66$$

となり、この α_{eff} は単独径間で平衡金具のない場合の 95m の径間に相当する。

400 m の 2 径間が懸垂装置で連絡している場合に片端に張力平衡金具を用いると *

* EA_{eff}

$$= \frac{EA}{1 + \frac{EA}{S} \left\{ \frac{W^2 S^3}{12T^3} \left(1 - \frac{T}{EA}\right) + \left(S + \frac{W^2 S^3}{24T^2}\right) \frac{1}{EA} \right\} + \frac{EAK_1}{S}}$$

$$= \frac{EA}{29.3} = 0.108 \times 10^6(\text{kg})$$

$$\alpha_{\text{eff}} = 2.75$$

単独引留径間の相当長は 74m となりねん回復元性が相当改善されることが推定される。

上述の計算結果は懸垂径間、張力平衡金具によってねん回特性が相当改善されることを示している。上記計算では高低差のない径間を検討した。高低差は多くの径間では存在するが上述の計算式を検討すれば高低差の存在することによってこれらの数量関係は大幅に変化しないことがわかる。

6. 結 言

懸垂装置を有する径間および耐張装置に張力平衡金具を用いた場合の複導体送電線の機械的特性を解析した。その結果を要約すると大要次のことがいえる。

(1) 懸垂径間では他径間との間に張力変化が伝達されるので張力変化を抑制する作用がある。それゆえ実効的な電線の弾性係数が小さくなりねん回復元性が良くなることが期待される。

(2) 張力平衡装置を用い素導体間の張力差が平衡しあう作用をもたせると張力変化が抑止される。その結果、実効的な電線の弾性係数が小さくなり、ねん回復元性が良くなることが期待される。

(3) 張力平衡金具を使用した時の機械的特性が解明された。電線実長の微小変化 ΔL 、電線製造時の単位長重量の微小誤差 ΔW 、平衡金具製作時の寸法誤差 Δa などがあった時の各導体張力の偏差が計算できる。それゆえ $\Delta T/\Delta L$ から電線の永久伸の差異による弛度差を検討できる。 $\Delta T/\Delta W$ により電線の単位長重量の微小差による問題を解明できる。さらに縦方向に導体が配置される 3 導体以上の送電線では静電反発力、電磁吸引力による弛度変化を計算できる。 $\Delta T/\Delta a$ により平衡金具の製造上の精度をどの程度にしたらいかがわかる。

今後に残された問題として

(4) 懸垂装置、張力平衡金具の実用的検討が必要である。これらの金具類の動きについては摩擦を無視したが、実際には摩擦が存在する。この摩擦は一時的には張力平衡を害するものであっても風による電線の振動などによって平衡運動が起ることも考えられる。

終りに当り本研究に対し、終始ご指導いただいた日立電線株式会社電線工場久本部長、山本課長、池田主任に感謝申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 林、鈴木、山本、星野：日立評論 別冊 No. 28, 13 (昭 33-12)
- (2) 星野：日立評論 Vol. 42 No. 3
- (3) 堀、竹下：架空送電線の弛度 p. 20 (昭 28 電力社発行)