

## 並行して架設せられた強電流線の 弱電流線に及ぼす影響

富士電機製造株式會社

馬場禮次郎

將來に於ける電力施設の主たる用途は鐵道運轉に至るであらう。之は列車運轉は實際に於て電氣機關車に依つて行はれるに至るからである。強い電氣勢力の長距離線は其の近くを走る電話及び電信線に一般には弱電流線に強い影響を與へるのである。此の影響は非常に著しいものであつて、單に通信を擾亂し或は之を不可能たらしめるのみに止まらずして、弱電流設備に従事する人々に危害を與へる程である。電力輸送施設の次第に擴まつて行くにつれ、之が通信設備に及ぼす作用を除去するか、或は電磁作用を受けぬ弱電流運轉が可能となり人命の危害も亦除去せられる程度に強電流の影響を減少せしめる手段方法を見出さねばならぬ。次に此の影響の種類及び程度の大要を述べ併せて之が防遏手段を與へんとする。

強電流線が附近の弱電流線に及ぼす影響はガルバニツクのもの、電氣的のものと磁氣的のものとに分たれる。之等のものの各々は單獨にも或は又他のものと一所になつても現れる。電氣的のものと磁氣的のものは其の狀態が共通であつて、擾亂は唯電壓及び電流の急激な變化によつて生ぜられるのみである。従つて通信設備に對する最大影響は交流を以つて運轉せる強電流設備によつて與へられる。此の作用の大きさは弱電流線と強電流線との距離、兩線の並行せる長さ及び兩者の對稱關係に關係する。強電流回路が往復金屬線より成る時は、個々の強電流回路より來る此の作用は此の回路だけに就ては互に反對に現れる。此の場合には弱電流線に及ぼす影響は歸路が大地より成つてゐる強電流回路に反し僅かなるものに過ぎぬ。然し歸路を大地に取れる強電流回路は、此の電流の電場及び磁場は例へば歸電流の大部分が大地を通過して流れる單相電氣鐵道設備に於けるが如く全部作用するので、最も強い影響を與へる。

ガルバニツク影響は弱電流線に於ても強電流線に於ても大地を歸路に利用し且つ兩線の接地點が互に近接してゐる時に起るものである。強電流接地點より強い電流が大地中に流れる時は、接地點の附近の大地中には著しい電流が発生することが出来る。此の附近に横る弱電流接地が不完全であつて又此の弱電流線の他端に於ける接地が之に反して非常に良好であつて之が爲め兩端間に電位差が存在せる時は電流は弱電流線中に流入するものと考へることが出来る。然し一般には大地中に於ける強電流接地の周りの電位は距離に従つて非常に急速に減少し、従つて接地點の一方が強電流接地の直接近邊に横らず而も接地が頗る不良なる時は弱電流線の兩接地點間の電位差は

大したことはない。一般にはガルバニク作用は電氣的及び磁氣的作用に比して充分無視することが出来る。

電氣的作用は誘電或は靜電誘導に依つて表される。此の作用は強電流線の電場に依つて生ぜられ之が弱電流線中に一の起電力を生ず、其の大きさは強電流線の電場中に於ける線の位置に依つて決定せられる。此の起電力は線間及び大地間の容量に依つて計算することが出来る。弱電流線を強電流線に並行せるものとし、兩線間の每軒容量（相對容量）を  $C_{12}$  とし、弱電流線の大地に對する容量を  $C_{22}$  とすれば、誘起せられる電壓  $V$  は

$$V = E \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}}$$

で表される。但し  $E$  は強電流線の電壓とする。容量  $C_{12}$  は線の配置の寸法から計算せられる。リーネマン及びケムリツチ氏は之に對し次の近似式を與へた。

$$C_{12} = 1.5 \frac{b \cdot c}{a^2 + b^2 + c^2} \cdot 10^{-9} \text{ F/km.}$$

但し  $a$  は強電流線と弱電流線との間の距離、 $b$  は強電流線の地上よりの高さ、 $c$  は弱電流線の同上高さである。之に依れば  $C_{12}$  従つて  $V$  は可變兩線間距離の自乗で減少する。一般に誘電作用は電壓が非常に高く弱電流線と強電流線との距離が 100 米を保ちつつ可成り長く並行して架せられた場合に於てすら殆ど認識せられぬといふことが出来る。

誘起せられる電壓は上式に見られる如く並行長と周期數とに無關係である。之に反し強電流線から弱電流線中に移轉せられる誘導電流に關しては之と趣を異にする。此の電流は

$$J = E \cdot \omega \cdot l \cdot C_{12}$$

となる。但し弱電流線は接地せられ、従つて容量  $C_{22}$  は短絡せられたものとする。

強電流線が弱電流線の數個に影響する時は誘電作用は個々の線に同様に分たれ、而して各線は線數が多くなる程小なる影響を受ける。此の線束に對する全作用は唯一本の線に對するものよりも幾分か強い。之は線が多數となるにつれて容量  $C_{12}$  及び  $C_{22}$  が變化するが爲めである。容量は線の數に比例して増加せずして或る限界値に近づくのである。

大地に對し 15000 ボルトの線電壓を有する單相電氣鐵道と並行に走る架空通信線が如何に強い誘電作用を受けるかは次の數字が之を示す。鐵道線路より 8 乃至 10 米の距離に設けられた通信線は 4000 ボルトにまで達し得る誘導電壓を受ける。斯の如き通信線例へば複線として架設せられた線に觸れる時は生命に危險を與へる。此の假定は勿論人命に危險を及ぼすに充分なる放電が線を通じて生じ得るが如く鐵道及び通信兩線が長く並行して走れる場合である。2-3 軒だけ並行して走つてゐる場合に於てすらも既に之は起り得る。弱電流運轉が接地せられた單一の線中で行はれる時は此の線は電壓影響を受けぬけれども大地に向つて弱電流裝置を妨害する強い電流

が流れる。此の影響電流は實際に容量  $C_{12}$  に關係し此の容量の抵抗は數百萬オームを算するが故に運轉裝置の抵抗は此の影響電流を弱めることが出來ぬ。斯るが故に線中に抵抗を挿入するも影響電流を減少するには無効である。弱電流線が鐵道線より 8 米隔りたる時は、此の線が 1 杆丈け並行に走る場合には 3.5 アンペアの影響電流を受け、10 杆丈け並行に走る時は 30 アンペアを受ける。一本の電信線中には約 20 ミリアンペアの運轉電流を有する。従つて電信通信を擾亂せんが爲めには、驗實に依れば有用電流の 20% で充分であるが故に、此の場合には 4 ミリアンペアにて充分である。

誘電作用に打勝たんが爲めに、多くの保護策が與へられてゐる。之等のものは總て必要なる擾亂防止を満足せずして、概ね運轉の不確實を現出する。最良の保護手段は弱電流線を擾亂を與へる強電流線より遠ざけるか、或は弱電流線を電纜化するにある。電纜に於ては接地せられた鉛被の爲め電氣力線は大地に向つて轉せられ之が爲め管は擾亂せられずすむ。若し電磁作用が無いものとすれば、電纜に於ては擾亂作用に對し現想的な保護が得られるであらう。然し此の作用に對しては電纜と雖も保護せられぬのである。

普通我々が誘導作用と稱してゐる磁氣作用は強電流線の磁場に依つて生ぜられる。電流の周期數と一致して交番する此のフキールドは弱電流線中に一の起電力を誘起し、其の大きさは強電流線中の電流  $J_0$ 、回路周波數  $\omega$  及び強電流線と弱電流線との間の相互誘導  $M$  とに比例する。即ち

$$\varepsilon = -j\omega M \cdot I \cdot J_0.$$

相互誘導  $M$  は兩電流回路が純然と金屬線に依つて作られてゐる時に限つて相當に正確に決定せられるけれども、兩回路が一本の線と大地歸路とより構成せられてゐる時には正確な決定は不可能である之は地中歸電流に關しては決定的の言を爲すことが出來ぬ爲めである。大地を通じて接續せられ兩通路間の距離は其の長さ  $l$  に比して小である所の二個の並行回路間の相互誘導  $M$  の方程式である

$$M = 2 \left( \log \frac{2l}{d} - 1 \right) \cdot 10^{-4} \text{ H/km}$$

に於ては大地歸電流は顧慮せられて居らぬ。若し之を顧慮せんとすれば、式が與へるよりも小なる値を係數  $M$  に對して取らねばならぬ。ブラウンス氏は式中に於て減數 1 の代りに式  $q$  を挿入することに依つて歸電流の影響を適當に算入することが出來ると提言した。 $q$  は 0.5 と 5 との間に横り並行架線長、線間距離及び大地歸路の性質に關係する數である。大地歸路を持つ環路間の誘導作用の大きさに關する正確な結果は唯だ測定に依つてのみ得らるべきである。斯る測定は既に大仕掛に行はれた處であつて、獨逸國に於ては V.D.E. の一會員によつて行はれ此の試験にはシーメンス、コンチエレンの會員が關與した。次の數字表は例へば  $16 \frac{1}{3}$  の周期の電流に依つ

て運轉せられる鐵道施設の線路より種々の距離に配置せられた架空線中の誘導起電力を示す。

架空線中の誘導起電力

| 單軌鐵道、軌條連結子を有せざる軌道 |                         |
|-------------------|-------------------------|
| 線路の中心と架空線の間隔      | 100A km(アンペア料)に對する誘導起電力 |
| 8 m               | 10—11V                  |
| 100 m             | 7.0 V                   |
| 500 m             | 3.0 V                   |
| 1500 m            | 2.2 V                   |
| 5000 m            | 0.5 V                   |

誘導起電力は 100 Akm に對して與へられてゐる。即ち之等は並行架線の長さ  $l$  と電車線電流との積が 100 Akm (例へば 2 料中に 50 アンペア或は 0.5 料中に 200 アンペア) であるといふ場合に於けるものである。此の測定よりして誘導作用は間隔につれて非常に緩慢に減少することが知られる。5 料の間隔の時は起電力は 100 A kmに對して常に 0.5 ボルトの大きさである。即ち 30 料の平行架線で 200 アンペアの時は通信線中には 30 ボルトが誘起せられる。此の原因は相互誘導が間隔につれて除々に減少すること即ち式が示すが如く間隔の變化につれて對數的に變化することにある。

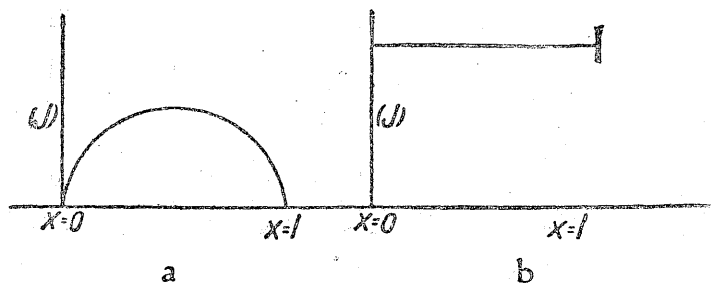
誘導作用は必ずしも數表中に示した様に大なるものではない。附近の導體の補償作用に依つて誘導起電力は實質的に減少せられる。斯る隣接導體は交流電鐵に於ては主として軌條であり、又弱電流線が電纜で成つてゐる時は此の電纜の鉛被である。次に如何にして單相電鐵設備に於て軌條や電纜外被が保護作用を爲すかに就て詳説する。

電鐵設備に於ては機關車の走る箇所に於て電車線より來る電流は二部分に分たれる。一は軌條の方向に流れ他のものは電車線の終電點に向つて流れ、此の兩者は漸次に大地中に漏入する。軌道は此の際大なる接地板と見做され、之が電流の進行を地に向はしめる。従つて此の電流は軌條導線に沿ふて減幅せられる。即ち饋電點から見て此の電流は次第に減少し此の點から餘り隔たらぬ距離に於て零に迄減少する。減幅の大きさは勿論軌道の性質及び大地の状態に關係する。氷結性地に於ては例へば歸電流は浸潤性地に於けるよりも減幅せられることが少い。之は後者に於ては歸電流は前者に於けるよりも地中に浸入し易いからである。此の歸電流は何等殘餘のものを出さぬ程よく誘導作用に關與する。何となれば實地に於て殆ど總て行はれてゐる様に弱電流線が饋電點を通過して架線せられる時は軌條電流に依つて弱電流線中に誘起せられる電壓は高まるからである。軌條導線中を進む歸電流は變電所に向つて歸る軌條電流によつて誘起せられる電壓に對し

て  $180^\circ$  の位相差を有する起電力を誘起する。上記した事實よりして、假令へ長い區間に於て軌條中點には電流が流れぬと假定せんも、此の箇所に電流計を挿入する時は電流を見出すことが出来るのである。之は電車線より誘導した電流であつて其の強さは全軌道導線を通じて一定であつて大地に接続せられるものである。此の電流が眞に電車線より誘導せられたものであるといふことは電車線を通じて直流を送る時は軌條導線の中點に於て電流計は振れを顯さぬことから知られる。此の軌條中の誘導電流は電車線から誘導せられる電壓に幾何學的に加はる起電力を弱電流線中に誘起する。

此の誘起せられた軌條電流は軌條導線の總ての箇所に於て其の大きさ及び位相に於て測定並に理論的研究が證明したと同一の値を持つ。

交流導線が並行單線に及ぼす誘導作用に關する基礎的研究に於て誘導電流は導線が其の終端に於て無抵抗的に大地に連がれた場合に限つて其の大きさ及び位相に於て同一であるといふことが確かに證明せられた。大地に對して絶縁せられた導線中には同様に導線の容量に依つて大地に接がれる電流が流れる。然し此の交流は一定ではなくして、導線の中央に於て最大值に達し兩端に至るにつれて零に迄減少する。



第一圖 誘導起電力の振幅

(a) 終端に於て接地せられた絶縁線 (b) 終端に於て無抵抗的に接地せられた線

第一圖に於て單線中の誘導電流の經過特に其の振幅が其の場所に關連して表される。

導線の絶縁が悪い時即ち大にして且つ連續的に分配せられた漏洩を有する時は、此の線中の電流經過は最早第一 a 圖に相當せずして、漏洩の大きさに應じて第一 b 圖の電流經過に近づく。即ち端點を除いては電流は線に沿ふて事實上一定となる。大地上に架設せられ之が爲め非常に高く且つ一様に分配せられた漏洩を有する軌條に於ては誘導電流は軌條に沿ふて一定値を持ち、従つて兩端に於て良好に接地せられた單導線と同様の經過を持つ。大地に良好に接地せられた導線或は非常に高い漏洩を有する導線中の誘導電流の値は誘導起電力及び軌條の皮相抵抗から次式に依つて與へられる。

$$\frac{-j\omega M_s J_0}{R_s + j\omega L_s} = -k J_0$$

誘導軌條電流の影響を簡単に表さんが爲め、電車電流を部分  $kJ_0$  と残りの部分  $(1-k)J_0$  との二部分に分けて考えることが出来る。

最初の部分に對しては電車線及び軌條は幾分か複線的となり之に於て電車線は往線となり軌條は歸線となり此の内を電流  $kJ_0$  が流れる。此の複線から弱電流線へ誘導する起電力は極めて小である。此の起電力は弱電流線と電車線との間隔が弱電流線と軌條との夫れに等しい時には零に等しくなる。夫故に大地が歸路として働く残りの部分  $(1-k)J_0$  のみが誘導的に働くのである。

弱電流線中に誘起せられた起電力を減少する手段即ち  $kJ_0$  従つて誘導軌條電流を出来るだけ大にすることに依つて之を行ふことが出来ることは公知に屬してゐる。K に對する式から知られる通り、相互誘導  $M$  を大にし軌道の皮相抵抗  $R_0 + j\omega L_0$  を小にすることに依つて之を行ふことが出来る。

電車線と軌條との間の相互誘導は電車線と軌條とを變壓器（減壓用變壓器）によつて密接に連結することに依つて大にすることを得る。出来るだけ多數の變壓器を使用し軌道を軌條連結子によつて接續して其の抵抗を減少する時は軌條電流を非常に強めることが出来る。又軌條電流の位相はより都合よくなる。即ち軌條電流の電車電流よりの遅相角は  $180^\circ$  に近よせられ之が爲め軌條電流は電車電流に略ぼ反對位相に向けられる。斯る變壓器は外國特にノールウエーに於て多く使用せられてゐる。クルスチアニア及びドランメン間の電鐵は弱電流線の保護の爲め軌道變壓器を接續してゐる。變壓器は 1.5 杆の間隔で接續せられる。之は 12.5 KVA で 2400 A の最大電流の連續出力に作られてゐる。而して之は軌道區間に沿ふて特殊の木製容器内に收められてゐる。二次捲線を軌條中に接續せんが爲めに二つの相前後する軌條接合部は絶縁せられ、此の點に於て高い電壓を減少する爲め、絶縁せられた軌條片を捲線の中點に接續する。軌條中に誘起せられる電流は、此の時は、電車電流の約 96% であつて  $180^\circ$  近くの位相差を持つ。之が爲め弱電流線に對する影響も亦僅小である。即ち鐵道に平行に架せられた線は約 70 米の間隔の時は 100 アンペア杆に對し唯 0.4 ボルトの誘導起電力を生じ、約 20 米の時は僅か 0.05 ボルトを生ずるのみである。軌道中に敷かれた電纜心線のみは比較的高い起電力即ち 100 アンペア杆に對し 1.6 ボルトを生じる。之は地中に横る電纜は電車線及び軌條から等しからざる間隔にある事實に基くのである。電纜が軌條に最も近く横る時は主として軌條電流から誘導する。二三の軌道變壓器を切出すことに依つて軌條電流を弱むれば、電纜心線中に誘起せられる起電力は弱まるが同時に軌道からより遠くに架せられた線中の起電力を高めることになる。

變壓器に依つて電車線と連結せられ其の外軌條と連結せられた特殊の線を用ゐる時は更に良好な關係が得られる。線が電車線の近くに引かれる時は、此の環線の誘導作用は、其の間隔が小なる故に、小なるものであつて、従つて平行に走れる弱電流線は非常に小さい作用を受けるのみであ

る。此の装置は主としてスウェーデンで用ゐられた。軌道から約 50 米の間隔にある弱電流線は此の際 100 アンペア料に對し約 0.02 ボルトの誘導起電力を生ずるのみである。

軌道の抵抗を減少することに依つても亦改良は得らるべきである。詳細なる測定の結果軌道の主抵抗は接合點の箇所が存在することが知られた。接合點抵抗は極めて可變的なものであつて電流の強さに大いに關係し且つ電流の強さが増すにつれて減少する。軌條連結子を用ゐる時即ち軌條の接合箇所を彎曲金屬體を以つて短絡することに依つて高く且つ可變的な接合點の抵抗を避けることが出来る。

### 架空線中の誘導起電力

電車線よりの架空線の間隔 = 8 米

| 電車電流                | 軌 條 電 流     |         | 誘 導 起 電 力     |         |
|---------------------|-------------|---------|---------------|---------|
|                     | 電車電流に對する百分率 | 位 相     | 100 アンペア料に對する | 位 相     |
| 軌 條 連 結 子 を 用 ゐ る 時 |             |         |               |         |
| 60 A                | 4.4 %       | 113°00' | 10.6 V        | 115°10' |
| 100 A               | 5.4 %       | 114°30' | 10.2 V        | 115°00' |
| 160 A               | 6.1 %       | 116°20' | 9.1 V         | 116°00' |
| 軌 條 連 結 子 を 用 ゐ る 時 |             |         |               |         |
| 60 A                | 48 %        | 171°20' | 6.6 V         | 126°20' |
| 100 A               | 47 %        | 170°50' | 6.3 V         | 127°15' |
| 140 A               | 46.7 %      | 170°50' | 6.3 V         | 126°40' |
| 160 A               | 45.7 %      | 169°20' | 6.3 V         | 126°50' |

上記の表から如何にして軌道に平行に設けられた架空線中の誘導起電力が軌條連結子を取付ける事に依つて減少せられるか、明になる。軌條連結子のない時は架空線中の誘導起電力は 100 アンペア料に對し 10 乃至 11 ボルトである。區間の軌道は此の際非常に不良であつて、軌條電流は電車電流に對し約 115° の遅相で此の電流の唯 5 % のみである。夫故に軌條電流が軌條中に誘起せられた起電力に對する遅相は  $115^\circ - 90^\circ = 25^\circ$  である。35 料の長さだけ平行に走り電車電流が 100 アンペアの際には誘導起電力は

$$\frac{100 \cdot 35 \cdot 11}{100} = 385 \text{ V}$$

となる。誘導起電力の相即ち誘導起電力が電車電流に對する遅相からして軌條電流の作用が認められる。若し之が存在せぬ時は相は  $90^\circ$  でなければならぬ。設備に軌條連結子が用ゐられる時は

軌條電流は強くなる爲め誘導起電力は 100 アンペア料に對し 6—7 ボルトに迄減少せられる。此の際軌條電流は電車電流の 45% を持ち相角は  $170^\circ$  に迄昇る。

數字表よりして更に如何にして軌條接觸箇所の可變抵抗が電流の強さの増すにつれて減少するかと知られる。一方に於て電車電流が 60 アンペアなる時は軌條電流は僅に 4.4% である。

複軌道の電鐵に於ては、四本の軌條岐路の爲めに軌道の全抵抗は減少し之が爲め  $kJ_0$  の増大を結果するが故に、一般に弱電流線中の誘導電壓は單軌道の際よりも幾らか小である。

誘導作用を爲すアンペア料の大きさに關しては次の如くいふことが出来る。即ち電車線の給電は給電線に依つて電力設備と結び付けられた電車線給電點に於て行はれる。各給電點には少くとも二個の變壓器があつて之に左右に出て行く電車線が接續せられる。電車線は二個の給電點間の中央に分離せられる。夫故に各給電點或は各給電變壓器は二個の給電點間に在る中點迄に給電する。從つて給電點は約 60 乃至 70 料の間隔に置かれるが故に各給電點は 30 乃至 35 料の區間に給電する。弱電流線中の全誘導は實際の場合に於て誘導作用を有する總ての電車電流路の總和に關係する。電車線の出力が給電せられる區間の終端に向ふ時は電車電流は全軌道區間の半分で同一方向に流れる。此の場合には誘導作用は相加はる。之と反對に出力が給電點の兩端上に横り其の部分の端部に同様に向ふ時は兩半分の部分は互に反對方向の電流を通じる。然る時は誘導作用は互に減じ合ふ。平均値を取り而して全軌道線の半分中を流れる電車線電流の半分で計算する時は實際の運轉狀態に近似することが出来る。從つて例へば 4 個の給電點が備へられ平均電車電流が 100 アンペアである軌道線が 280 給の長さを持つ時は誘導作用を爲すアンペア料は  $140.50 = 000$  で計算せられねばならぬ。短絡の際は電車線部分の長さで計算すべきである。何となれば同一瞬間に總ての電車線部分中に短絡が生ずるといふことは受取れぬからである。

電纜外被は軌條と同様な具合で補償作用を營む。又電纜外被は軌條導線と同様に大なる漏洩を有する一の導體として働く。電車線と電纜外被との間の相互誘導は實際に電車線と心線との間の夫れに等しい故、補償せられない。即ち軌條電流に依つて平衡せられない電車電流部分

$$(1-k)J_0 = J_0'$$

は電纜外被中にも又心線中にも互に等しい起電力

$$E = -j\omega \text{Mom. } J_0'$$

を誘起する。

R 及び L を以つて夫々電纜外被の抵抗及び誘導とする時は外被中に生ずる誘導電流は次の式で與へられる。

$$J_m = -\frac{E}{R + j\omega L},$$

外被中の電流は公知法則に従つて心線中に次の附加起電力を生じる。



$$J_m j\omega M_{ma} = - \frac{E_j \omega M_{ma}}{R + j\omega L},$$

但し  $M_{ma}$  は外被と心線との間の相互誘導を表す。

夫故に心線中に働く全電圧は

$$E_a = E - \frac{E_j \omega M_{ma}}{R + j\omega L}$$

或は

$$E_a = E \frac{R + j\omega(L - M_{ma})}{R + j\omega L}$$

である。理論的に證明せられた通り、外被と心線との間の相互誘導  $M_{ma}$  は常に外被の自己誘導  $L$  と等しい。夫故に

$$E_a = E \frac{R}{R + j\omega L}$$

或は

$$E_a = \frac{E}{1 + j\omega \frac{L}{R}},$$

此の  $E_a$  式中では渦電流並にヒステレシスに依つて生ずる損失抵抗は含まれてゐない。 $R$  は單に電纜外被の直流抵抗に過ぎぬ。損失抵抗を算入せんとすれば、 $E_a$  の式を展開せねばならぬ。公知の如く誘導を複素數を以つて表し  $L$  及び  $M$  に對し

$$M [1 - j(\delta + \omega\vartheta)]$$

$$\text{及び } L [1 - j(\delta + \omega\vartheta)]$$

と置く時は損失抵抗を考へに入れることが出来る。 $L$  及び  $M$  に對する此の展開せられた値を挿入し而して  $E_a$  に對する展開を前の場合と同様に行ふ時は  $E_a$  に對して次の式が得られる。

$$E_a = E \cdot \frac{[1 - j(\delta + \omega\vartheta)]R}{R + j\omega L[1 - j(\delta + \omega\vartheta)]},$$

或は  $E_a$  の絶體總値を考へる時は

$$E_a = E \cdot \frac{\sqrt{1 + (\delta + \omega\vartheta)^2}}{\sqrt{1 + \frac{\omega L(\delta + \omega\vartheta)}{R}} \div \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}$$

但し  $\omega L\delta =$  ヒステレシスに依る損失抵抗

$\omega^2 L\vartheta =$  渦流に依る損失抵抗

を表す。此の式よりして  $E_a$  は時定數  $\frac{L}{R}$  に関係することが知られる。之が大なる程心線中に誘起せられる起電力は小である。

電纜外被の時定數を出来る丈け小にせんが爲めには、第一に電纜外被は其の布設に於て給電點

箇所を持たぬことに心懸けねばならぬ。外被の分割及び導入箇所は、軌條の接合箇所に於けるが如く、特殊の金屬灣曲體を以つて橋絡せられねばならぬ。試験の結果、外被の分割箇所を特殊の灣曲體で橋絡した電纜に於ては心線中に誘起せられた起電力は此の手數が行はれなかつた電纜に於けるよりも約 30 乃至 40% 丈け小であつたことが報告せられた。

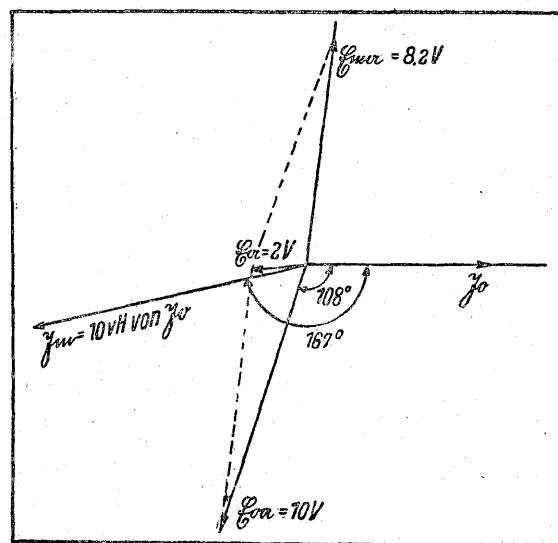
ウエルネル、ウエルケの中央實驗所の研究に依れば、弱電流電纜に對して普通なる平線鎧裝の代りに帶鎧裝を具ふる時は電纜外被はより高き誘導を持つといふことが提唱せられた。斯る帶鎧裝電纜は電氣鐵道に沿ふて布設せられ、此の電纜に於ては起電力は同一狀態の下で平線鎧裝の際よりも 26% 丈け小であるといふことが揭示せられた。

電纜外被の抵抗は厚い鉛被を用ゐるか或は電纜心の周りに銅帶か或は銅線を施し此の上から初めて鉛被を壓する時は此の抵抗は減少せられる。鉛の比抵抗は非常に高いので薄い銅帶或は銅線によつて外被の抵抗を厚い鉛外被によるよりも大いに低下することが出来る。銅の導電率は鉛の夫よりも丁度 11 倍大である。

斯る電纜は既にシーメンス、ハルスケが製造し試験的に單相電氣鐵道に布設した。其の結果は非常に良好であつてオーストリア、シーメンスシュツケルトウエルケが今日でもアルベルグ電氣鐵道に長い電纜を供給してゐる。此の試験電纜は 5 軒の長さで 30 個の心線對を有し誘導影響に對する保護の爲め各々 1 軒直徑の裸銅線 63 本が電纜心の周りに同心的に捲かれ鉛被と内方で接觸せしめられてゐる。之等 63 本の銅線の全切口面積は 50 平方軒である。電纜は標準帶鎧裝を持つ。電纜心線中の誘導起電力は 100 アンペア軒に對し丁度 2 ボルトであつて電纜外被中の電流は電車線電流の 10 パーセントで之よりも  $167^\circ$  遅相にあつた。補償外被電流なくして電車電流の影響のみを研究し得んが爲め、電纜を取去り其の位置に同一長の絶縁線を布設した。此の導線中に誘起せられた起電力は 100 アンペア軒に對し 10 ボルトであつた。

夫故に外被電流は誘導起電力を 100 アンペア軒に對し 8 ボルト丈け低下した。明瞭たらしめる爲め此の關係は第二圖のベクトル圖に表さる。

電纜が外被を持たぬ時軌條電流の影響の下に電車電流  $J_0$  によつて心線中に誘起せられる起電力を  $E_{0x}$  とする。之は絶縁線に於ける試験の



第二圖 ベクトル圖

際に示された様に 100 アンペア料に對し 10 ボルトであつて電車電流よりも  $108^\circ$  だけ遅れる。外被自身中に外被を有する電纜中に於ても同一の起電力が誘起せられる。心線中に起電力  $E_m$  を誘起する外被電流を  $J_m$  とする。外被の皮相抵抗は

$$\frac{10,0e^{-j108^\circ}}{10,0e^{-j167^\circ}} = 1,0e^{-j59^\circ}$$

であつて、之よりして外被に對し 0.52 オームの有効抵抗と 8.6 mH の自己誘導が得られる。測定により外被の直流抵抗は地中抵抗と共に 0.21 オームとなり、従つてヒステシス及び渦電流による損失抵抗は 0.31 オームとなる。外被心線の相互誘導は外被自己誘導に等いが故、外被電流によつて心線中に誘起せられた起電力の絶體値は

$$10,0 \cdot \omega \cdot 0,0085 = 8,5 \text{ V}$$

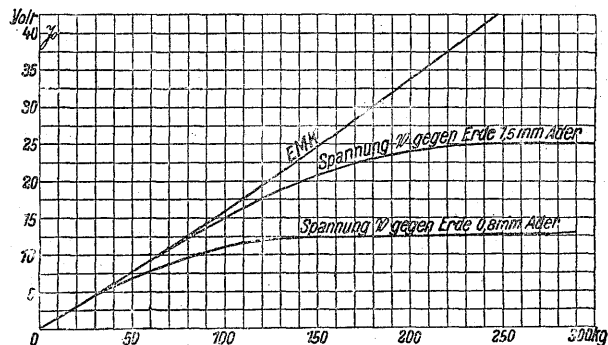
$$\omega = 2\pi n = 2\pi \cdot 16 \frac{2}{3} = \sim 100$$

である。外被の直流抵抗、損失抵抗及び自己誘導に對する之等の値を  $E_a$  の式中に挿入すれば 2.1 ボルトの値を得、測定値とよく一致する。

電纜外被の保護作用を更に改良せんが爲め、電纜の自由心線は尙ほ外被と並行に形成せられ、之に

より外被の下に横る保護線の切口は 100 平方耗に高められる。之が爲め心線中に誘起せられる起電力は 100 アンペア料に對し更に 1.0 ボルトに迄低下せられる。

普通知られたるが如く、電纜外被電流により誘導起電力を著しく弱めることが出来る。鐵鍍装を適當に構成し適當せる鐵を使用することによつて外被の誘導を高めるか、或は又軌條に於けると同様に電車線と電纜外被との間の連結（カップリング）を變壓器を接続することによつて高める様にして起電力を更に減少することが出来る。變壓器の變壓比の適當値を選ぶことにより外被電流によつて誘起せられた起電力が電車電流によつて誘起せられた起電力を殺す程外被電流を大ならしめることが出来る。一九二三年の夏中央實驗所はアルベルグ電氣鐵道に就て斯種變壓器の試験をした。此の鐵道のインスブルツケーテルフス間の 12.6 耗の區間に於て互に約 3 耗の距離を置いて三個の變壓器が接続せられた。此の接続法は一次捲線を電車線に接続し、二次捲線を鐵道に並行し軌道中點から約 1.9 米隔つて布設せられた遠方表示電纜の外被に接続した。變壓器の變壓比は 260:30 であつた。此の手段によつて電纜心線中の起電力を 100 アンペア料に對し



第三圖 並行布設長に對する誘導起電力と電壓

(V) (大地に對する)

$16\frac{2}{3}$  の電流  $J_0$  によつて誘起せられた場合

約 4 ボルトから約 0.5 ボルトに迄減少することが出来た。(軌條連結子と鐵道に並行して走れる銅歸線の爲め電纜心線中に誘起せられた起電力は比較的lowかつた)。起電力を適當なる變壓器の選擇により或は其の接續距離を小にすることによつて更に減少せしむることは著しい困難を伴ふものではない。

夫故に隣接導線の補償作用により誘導起電力を比較的小なる値に減少せしめることは可能である。之が軌條によつて行はれるか或は電纜外被によつて行はれるかはどうでもよいことであつて終結の結果は兩者類似である。此の際價格の大小は裁決的である。如何なる補償手段が最も經濟的であるかは確に其の都度の場合に従つて決せられねばならぬ。

補償作用の評価に際しては電鐵設備に於て如何なる誘導アンペア料を以つて計算すべきかは既に指示せられた。電鐵側で短絡の生じた際如何に大なる誘導アンペア料従つて誘導起電力が弱電流導線中に誘起せれるかに就て簡単に説明せんとする。

電鐵設備に於ける短絡電流の大きさは發電所から短絡點迄の距離に關係する。發電所の附近に在る電車線區域の短絡は發電所より遠く隔つた線中の短絡よりも大なる短絡電流を生じる。後者に於ては短絡電流は饋電線中の電壓降下によつて減少せられる。勿論電車線區域の内方に於ては短絡電流は變電所に近い程大である。短絡電流に對する減幅は發電所及び變電所の變壓器に作用する。短絡を顧慮して發電所の發電機は概ね比較的高い誘導抵抗を持ち之によつて短絡電流が危険な大さに達し得ない様に作られてゐる。

第四表は計算によつて作られた短絡電流及び此際電纜心線中に生ずる起電力値を示す。

第 四 表

| 變電所より種々の距離に於ける短絡電流             |         |             |
|--------------------------------|---------|-------------|
| ( a ) 發電所の附近に在る電車線區域に於けるもの     |         |             |
| 短 絡 點                          | 短 絡 電 流 | 電纜心線中の誘導起電力 |
| 變電所より 150 米                    | 1200 A  |             |
| " 16 杆                         | 900 A   |             |
| " 32 杆                         | 800 A   |             |
| " 60 杆                         | 600 A   |             |
| ( b ) 發電所より大なる距離に在る電車線區域に於けるもの |         |             |
| 變電所より 9 杆                      | 870 A   | 330 V       |
| " 24 杆                         | 730 A   | 700 V       |
| " 37 杆                         | 640 A   | 1000 V      |
| " 49 杆                         | 550 A   | 1160 V      |

| (c) 發電所より中庸の距離に在る電車線區域に於けるもの |       |  |
|------------------------------|-------|--|
| 變電所より 30 杆                   | 800 A |  |

此の計算に於ては發電所に於て電網中には電車運轉に對し充分なる出力を持つ一個の發電機が働くものとしてゐる。電車運轉が増加するに當つては發電所の出力も増大せねばならぬが短絡電流も増大するものと考えられるが故に、二個或は三個の發電機が電網に働く場合に就ても計算が行はれた。此の際二個の發電機が電網に給電してゐる際には數字表中に與へられた電流値は約20%丈け高くなり、而して第三の發電機が接續せられた場合と雖も短絡電流は増加しないことを附記する。

短絡の期間は  $\frac{1}{4} - \frac{1}{2}$  秒である。變電所は最高電流繼電器即ち許し得ない強電流が電車線中に流れた時自動的に回路を遮斷する裝置を具へてゐる。短絡電流の期間は此の繼電器の動作並に其の維持に關係する。ノールウエーのクリスチア——ドラメン間の電鐵に於ては此の最高電流繼電器は短絡期間が僅かに 2 周期即ち  $\frac{1}{8}$  秒丈けである程よく働く。

數字表に於て (b) の下に掲げられた短絡試験に於ては短絡電流によつて誘起せられた電纜心線中の起電力が示された。此の時電纜は線路の中心線から約 8 米距つてゐた。短絡が區間 (37 杆並行に走れる) の終點に起る時は誘導起電力は丁度 1000 ボルトになる。然し之は發電所が多數の發電機で給電してゐる時は約 1200 ボルトに高まる。發電所の附近にある電車線區間に短絡が起る時は之よりも幾らか高い値を期待せねばならぬ。此の際誘導起電力は此の點以外で同一の状態の下では 1200 ボルトの代りに約 1400 ボルトとなる。

表中に掲げられた起電力値は電纜外被が良好に連結せられた電纜に於けるものである。之が行はれてゐない架空線及び電纜に於ては與へられた値として 30-40% 丈け高い値を取つた。電纜外被の抵抗を銅線の纏捲によつて減少するか或は吸收變壓器を使用する時は、此の値は約25%丈け減少し而して運轉狀態に於ける電流の強さで試験した結果帶鐵岩の電纜では之よりも更に小なる値を期待することが出来る。

今や此の状態の下で斯る高い起電力が電纜中に現れるならば一般に弱電流運轉は行はれることが出来るであらうかどうかといふことが問題となる。之は電纜に於て弱電流運轉が往復線中で行はれ運轉裝置が並列接續になれる場合である。兩心線中には、心線が密接して撚らたてゐるので同一の起電力が誘起せられ、之が爲め電位差從つて擾亂は、精確な對稱的の配置が得られないので容易に擾亂が起り得る架空線と反對に、起らぬ。

若し運轉を擾亂せらるゝことなく行ひ得るものとするも、電纜心線が大地に對して有する高い

電壓の爲め人命に危害を與へ或は又電纜の破壊を結果し得る電纜の貫通放電が起り得る危険が残されてゐる。

電鐵側の短絡に際して恐れられる電纜心線より大地或は電纜外被への表面放電に對しては之迄考察せられた誘導起電力は關係を有せずして之は電纜心線が大地に對して有する電壓が關係するのである。

絶縁線に於て大地に對する電壓は

$$V = k \cdot J_0 \cdot Z \frac{\sin \gamma (\frac{1}{2} - X)}{\cos \gamma \frac{1}{2}}$$

の式によつて與へられる。但し  $\gamma$  は傳播定數であつて  $Z$  は線の特徴である。

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (A + j\omega I)}$$

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{A + j\omega I}}$$

$X=0$  及び  $X=1$  即ち線の始端及び終端に對しては、 $V$  は

$$V = k \cdot J_0 \cdot Z \cdot T_g \gamma \frac{1}{2}$$

$$\text{及び } V = -k \cdot J_0 \cdot Z \cdot T_g \gamma \frac{1}{2}$$

である。 $X = \frac{1}{2}$  即ち線の中點に於ては

$$V = 0$$

となる。即ち同一長の強電流線によつて誘導せられる絶縁線中では、大地に對する電壓は線の中點に於て大地に對し 0 であつて、端に至るにつれて  $\frac{V}{2}$  に迄上昇する様に分配せられる ( $V$  を大地に對する全電壓とする)。

夫故に短絡に際し誘導起電力が約 1400 ボルトなれば、線の各端に於て大地に對し約 700 ボルトの電壓が生じる。弱電流線が其の一端に於て大地に接續せらるれば、此の電壓分布模様は變化し接地端に於て電壓は 0 となり他端に於て全電壓

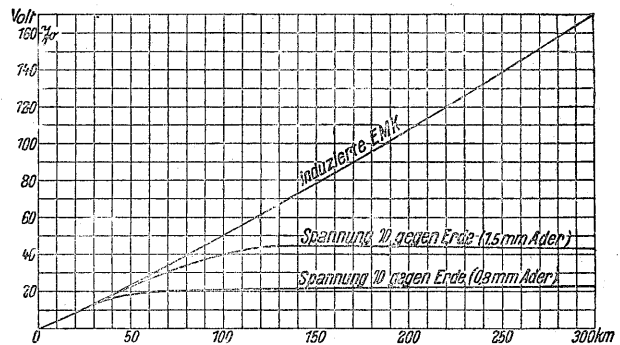
$$V = k \cdot J_0 \cdot Z \cdot T_g \gamma l$$

となる。此の場合に於て線の一端が接地すれば大地に對し約 1400 ボルトの電壓が生じる。従つて電纜心線の接地は出来るだけ避けるを要し或は少くとも出来るだけ速に修理せねばならぬ。

大地に對する全電壓  $V$  は誘導起電力よりも線中の電壓降下だけ小である。絶縁線に於てすらも線の静電容量を超へて大地に向ふ電流路が存在するが故、電壓降下を生じる。誘導起電力は並行長  $l$  に比例して變化するも、大地に對する電壓  $V$  は  $T_g \gamma l$  を以つて増加する。此の値は極限值  $l$  に近づく。即ち並行長の變化につれ同一の誘導電流に於て、大地に對する電壓  $V$  は或る極限值を超へて増加することが出来ぬ。如何なる長さに於て此の極限值に達するかは、如何なる  $\gamma$

の値、従つて弱電流線が如何なる性質を有するかに起因する。夫故に長い間に電化鐵道區間が非常に長くなつた時は鐵道と並行に走つてゐる線中に非常に高い起電力が誘起せられる。然し此の線の大地に對する電壓は或る定つた値以上に増加せぬ。

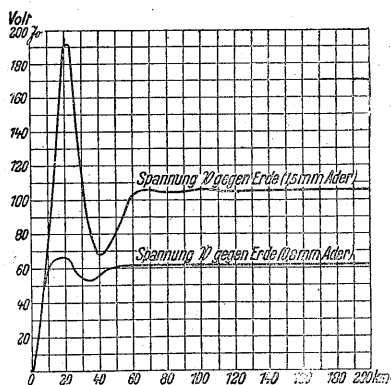
第三圖は電纜心線中の誘導起電力と大地に對する電壓とを並行長に關連して示す。此時の電流は  $16 \frac{3}{2}$  の周波數を持つものである。數 50 ㄱ の並行長迄は大地に對する電壓は誘導起電力に等しいことが知られる。此の長さが變化するにつれて兩者の差は増大する。即ち 15 耗の心線に於ては極限值は約 150 耗に達し、0.8 耗の心線に於ては  $V$  が大になるが爲め約 78 耗に達す第四圖に示すが如く誘導作用を與へる電流  $I_0$  が 50 ㄱ となれば大地に對する誘導起電力と電壓との差は更に大になる。



第四圖 並行長に對する誘導起電力及び電壓  
V  
50 ㄱ の  $J_0$  によつて誘起せられたるもの

$V$  は周波數に従つて増すが故、電流曲線の調波振動によつて生ずる電壓は實際的に並行長に無關係となる。第五圖は  $n = 800$  の調波振動によつて生ぜられた大地に對する電壓を示す。

弱電流電纜は約 2500 ボルトに一分間堪へる様に作られる。大地に對し 1500 ボルト以上の電壓は軌道に密接して布線せられた電纜心線に於てさへも起らぬ。上記補償手段を用ゐぬか或は電纜を軌道から遠ざけねば、1500 ボルト以下の電壓は短時間即ち短絡の期間豫期せねばならぬ。



第五圖 平行長に對する誘導電壓Vの關係  
800 ㄱ の  $J_0$  によつて誘起せられたもの

獨逸國內の既に電化せられた鐵道に於ては標準電纜が布設せられた。而して何も特殊の補償手段は用ゐられなかつた。運轉の擾亂、特に電纜の貫通放電は是迄起らなかつた。又此の施設に與つた人々も是迄決して危害を蒙らなかつた。運轉裝置の取扱者は其の運轉裝置を電纜心線と直接に接續せずして傳達裝置を超へて接續することによつて心線の高い誘導電壓から免れた。電話運轉に於ては之が爲め標準傳達裝置(變壓器)を用ゐ、電信運轉に於ては繼電器傳達を用ゐた。

弱電流運轉をして強電流線の基本波によつて與へられる擾亂から完全に免れしむることは電纜運轉に於ては容易に達せられることであるが、擾亂電壓又は擾亂電流の調波振動によつて生ぜられる影響より免れしめることは六ヶ敷い。調波振動に對しては、可岐路中の電壓降下が  $V$  の値の相異なる

が爲め相異なるので、場合によつては兩岐路間に僅かの電壓差が生じる。 $V$ の値は周波數が高く  
なる程大になる。従つて  $V$  の相異は高い周波數に於ては大いに著しくなる。擾亂電流が電話周  
波數の範圍に横る調波振動を有するならば、之は電話通信に擾亂を與へることが出来る。第一に  
 $V$  の値は電纜心線の容量によつて定まり、又ビュピン心線の場合ではビュピン心線の自己誘導に  
よつて定まる。従つて斯る調波振動による擾亂を除去せんが爲めには、電纜の大地容量と線輪の  
自己誘導とを絶體的に等しからしめねばならぬ。線輪の自己誘導は製造工場に於て必要なる精確  
度を以つて作られるけれども、電纜の容量は左様には行かぬ。一般に於て後者は電纜の布設後補  
償せしめられるのである。

キュツフミュルレルは如何にして大地容量を補償し、之によつて電壓差を電話通信が擾亂せら  
れぬ程に減少すべきかを指示した。彼は大地に對する誘導電壓より出發して、補償の必なる精確  
度を與へる式を誘導した。

此の式は

$$\frac{V_i}{V_l} = -\frac{1}{2}c_1$$

であつて、之に於て  $c$  は兩大地容量の差率であつて

$$c = \frac{C_2 - C_1}{C_1}$$

又  $V_i$  は電壓差、 $V_l$  は往復線の一岐線の大地に對する電壓である。

例へば測定により擾亂調波振動によつて電纜心線中に最大 1.0 ボルトの電壓が誘起せられたと  
し、而して往復線中に於て電壓差が 0.001 ボルトよりも大にならぬ様に望むならば、上記方程式  
よりして一心線の大地容量は他の心線の夫の 0.2% よりも大なる差を持たぬ様にすべきことが知  
られる。

補償自身に關しては、附加蓄電器により或は又心線の適當なる交叉によつて之を行ふことが出  
来る。

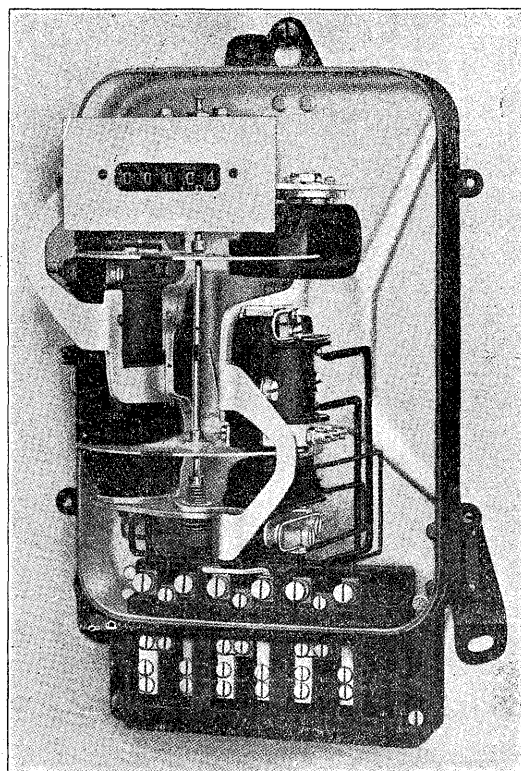
誘導保護として特別に作られた外被を持つ上記電纜を使用する時は恐くは補償を必要としない  
であらう。5 軒の試験電纜に對する試験が示した様に、外被は高い調波に對しても著しい保護作  
用を與へる。電車線中の 1000 周波の電流に於て試験電纜の心線中の誘導電流は僅かに 1.4mA  
なるに反し、此の試験電纜の傍にあつて同一長さで同一心線直徑で同一状態の下にある通信電纜  
では 6.6mA の誘導電流が認められた。兩電纜に人爲的非對稱を與へたる場合にさへも外被保護  
を持つ電纜は之に對し通信電纜よりも著しく不鋭敏であつた。従つて此の電纜に於ては心の對稱  
は普通の電纜程精確に作る必要がない。

調波振動自身は一部分としては電壓曲線が完全に正弦波に作られてゐない發電機に起因し、又



他の部分としては機關車や附近の電動機に起因する。此の際生ずる調波振動は固定子及び廻轉子上の捲線溝によつて生ずるか或は又電流の流れる電機子線輪の磁場に及ぼす影響によつて生ずるか或は又整流子によつて生じる。更に調波振動は變壓器によつて生じ、鐵心磁化の爲めに發生せしめられる。機關車によつて生ぜられる調波振動は特に厭ふべきものであつて、其の周波數は走行速度に應じて絶へず變化する。強電流工學の問題は電力輸送に對しても亦望ましからぬ此の調波振動を出来るだけ抑制するに在るのである。(終)

(Siemens Zeitschrift Heft 9 u. 10, 1924)





＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。