

レーザを使用した超高压変流器

The Laser Current Transformer for EHV Power Transmission Lines.

斎藤成文*・浜崎襄二*・藤井陽一*・横山幸嗣*・大野 豊*

Shigebumi SAITO, Joji HAMASAKI, Yoichi FUJII, Koji YOKOYAMA and Yutaka OHNO

500 kV 級超高压長距離送電の実用化のために、各国において機器の絶縁技術の開発が重要な研究項目に上げられている。本論はレーザ光による超高压送電線の電流測定を試みたもので、レーザをトランスデューサとし、高圧部位には受動素子のみを置き、大型碍管を使わずに地上から直接、高压送電線の電流を無接触、無導体で測定する方式で絶縁問題を解決している。方法としては送電線路の周囲磁界による鉛ガラス内のレーザ光のファラデー回転角を検出することにより送電電流を計測する。

1. 緒言

最近の電力需要の急激な伸びに対し、世界各国ともその需要を満たすため、500~750 kV の超高压 (EHV) の交流または直流の送電網を建設している。東京電力でも、従来の 275 kV 系統では限界に達することが予想され、将来 500 kV 定格で運転する予定の 275 kV 送電線を建設されつつあり、昭和 46~47 年には 500 kV 送電が開始される予定である。

この超高压送電に付随して、超高压機器の研究開発が数多く行なわれているが、いま電気機器とくに変流器 (CT) について考えると、超高压における絶縁耐力の問題とともに、超高压長距離送電系統における安定度と使用機器の損傷の立場から、事故時の保護方式の高速化、高信頼化に伴う計器用機器の高忠実性が要求されてくる。

ところが、従来の鉄心形 CT を超高压に拡張使用すると、絶縁の立場から巨大な碍管を要し、大型で高価な変流器となる、また鉄心形 CT は大電流において飽和し、あるいはひずみ波を生じ、1 次電流に忠実に比例しないこと、周波数特性は 10~50 kHz で急峻なサージに対し、忠実な応答を示さないことなどシステムの安定度の上に多くの欠点がある。

これらの欠点を除くため、最近無線 CT 方式が研究されている。これは高压部位に置いた電流のトランスデューサからの電流信号を適当に処理して、UHF、レーザなどの搬送波にのせて送るものである。これによって絶縁問題は解決されるが、超高压部位に多くの能動素子を必要とし、信頼性の上で不利な点がある。

これに対し、ここで述べるレーザを用いた電流測定法は、送電線を通る電流から発生する磁界によってレーザ波の偏波角がファラデー効果により変化することを利用し、電流を計測する方法である。この方法は従来の変流器のような大型碍管を使わず、地上から直接、高压送電線や母線の電流を無接触—無導体で測定できる点、非常に画期的なものであり、特性も過電流特性のすぐれて

いること、周波数帯域が非常に広くインパルス波形測定の分解能はきわめて高いことなど従来の鉄心型 CT の特性を大幅に改善され、実用化に期待される効果は大きいものである。本文は特に雷サージを観測できるようなレーザ CT 装置を試作し、その特性と実用化に対する問題点の検討を行なっている。

2. 理論

図 1 はレーザ CT の原理図である。地上に置かれたレーザ発振器から送られた直線偏波のレーザ光は、高电压線の近くに送電線に直角に置かれた鉛ガラスを通過する。この時、レーザ光の偏波面は送電電流の磁界によってファラデー回転を生ずる。鉛ガラスで回転した光は別の反射鏡によって地上に置かれた偏光分析器に送り帰される。増幅器の出力は偏波面の回転角に比例した値が得られる。すなわち送電電流の磁界によるレーザ光の偏波面の回転角から電流を測定する。

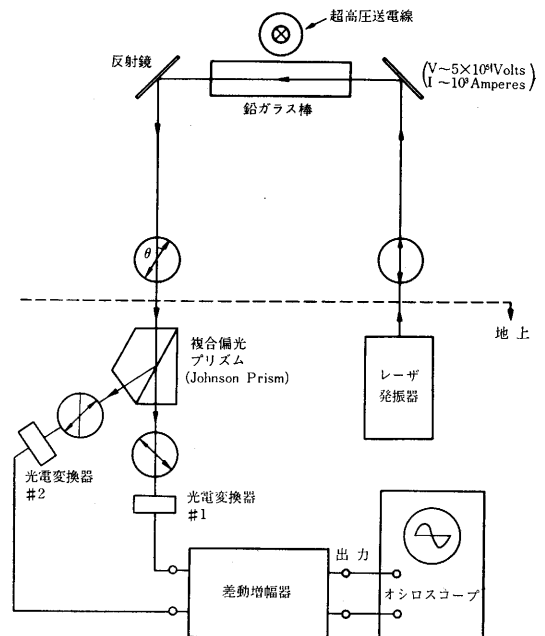


図 1 レーザ CT 原理図

* 東京大学生産技術研究所第 3 部

図 2 (a) はレーザー光の送電電流によるファラデー回転を示す。送電線に直角に図のように置いたときの偏波面の回転角は、送電電流と電線中心と鉛ガラス両端を結ぶ線のなす角 ϕ に比例する。その回転角は次式で与えられる。

$$\theta = \frac{V\phi}{2\pi} I \quad (1)$$

ここで、 I ：電流の瞬時値 (Ampere)

V ：鉛ガラスの Verdet 定数 (min/oe·cm)

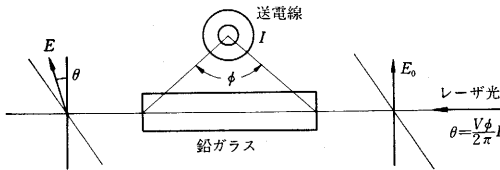
偏光分析器は複合偏光プリズム、光電変換器、差動増幅器とから成る。複合偏光プリズムは二つの互に垂直な偏光成分に分離するものである。送電線に流れる電流がゼロで、複合偏光プリズムの設定角度をもとの偏波面に対し $\pi/4$ のとき、プリズムの偏波面と入射光の偏波面の関係は図 2 (b) で示される。いま回転角がゼロで、二つの光電変換器の出力が等しいとすると、回転角 θ による二つの出力電圧は次式によって示される。

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= K_D K_A \frac{|E_0|^2 |T|^2}{2} \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} + \theta \right) \\ V_2 &= K_D K_A \frac{|E_0|^2 |T|^2}{2} \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \theta \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

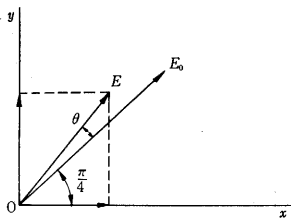
ここで E_0 ：鉛ガラスの入射光の電界振幅

T ：鉛ガラスの伝搬定数

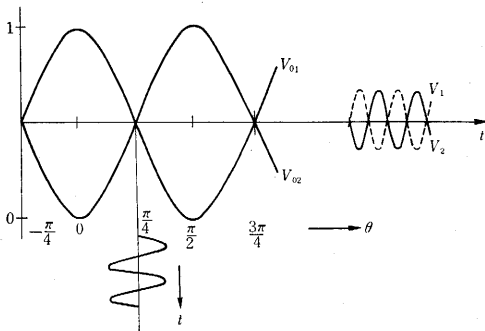
K_D ：光電変換器の検波定数



(a) ファラデー回転



(b) 複合偏光プリズムの入出力光の偏光面



(c) 光電変換器の出力電圧

図 2 ファラデー回転と偏光分析器

K_A ：(自由空間アドミッタンス×光の断面積)

図 2 (c) は出力電圧と回転角の関係を示す。

差動増幅器の出力は V_2 と V_1 の差に比例し

$$\begin{aligned} V &= V_2 - V_1 \\ &= K_D K_A \frac{|E_0|^2 |T|^2}{2} \sin 2\theta \\ &\approx K_D K_A |E_0|^2 |T|^2 \theta \left(1 - \frac{2}{3} \theta^2 + \dots \right) \quad \theta \ll 1 \quad (3) \end{aligned}$$

となり、 θ が小さければ (3) 式の V と θ の間には直線関係にある。送電線電流が正弦波電流

$$I = \sqrt{2} I_{AC} \cos \omega t \quad (4)$$

であれば (3) 式は

$$\eta = \frac{V\phi}{2\pi} \sqrt{2} I_{AC} \quad (5)$$

とおくと、

$$\begin{aligned} V &= K_D K_A |E_0|^2 |T|^2 \{ J_1(2\eta) \cos \omega t - J_3(2\eta) \cos 3\omega t \\ &\quad + \dots \} \\ &\approx K_D K_A |E_0|^2 |T|^2 \left\{ \eta \left(1 - \frac{1}{2} \eta^2 + \dots \right) \cos \omega t - \frac{1}{6} \eta^3 \right. \\ &\quad \left. \cos 3\omega t + \dots \right\} \quad \eta \ll 1 \quad (6) \end{aligned}$$

となる。 η が小さければ出力電圧は送電電流に比例する。 η が小さくなければ基本波成分は $J_1(2\eta)$ に従って飽和し、奇数高調波の振幅は $J_n(2\eta)$ に比例し、出力電圧波形にひずみを生じる原因となり、送電電流に比例した値が得られなくなる。

したがってレーザー CT による電流測定は、電流磁界によるレーザー偏波面の回転角 θ が小さいときには、差動増幅器の出力電圧 V は、増幅器利得を G とすると、

$$V \approx K_D K_A |E_0|^2 |T|^2 G \frac{V\phi}{\pi\sqrt{2}} I_{AC} \cos \omega t \quad (7)$$

となり、 V の実測および右辺 I_{AC} の各係数を実測または計算することによって送電電流 I_{AC} を求めることができる。

3. 試作装置

レーザー CT の構造は図 3 に示すようなもので、レーザー発振器、送受信光学系、光電変換器、差動増幅器、電源などは幅 90 cm、奥行 90 cm、高さ 119 cm の頑丈な鉄製筐体の中に收容されている。碍子はトランスデューサとしての鉛ガラスを支持すると同時に、CT 筐体を送電線より絶縁する役目を持ち、大電流試験の際には 1 本、超高圧重畳試験には 3 本、インパルス試験には 4 本使用した。写真 1 はレーザー CT の外観である。

トランスデューサ部は厚さ 8 mm、一辺の長さ 165 mm の正六角形アクリル板に接着され、さらに厚さ 40 mm のアクリル板に重ね碍子金具に取り付けられる (図 4)。大電流試験には鉛ガラスに直角に通電用銅板を取り付ける。銅板の中心と鉛ガラス間の距離は 2 cm である。

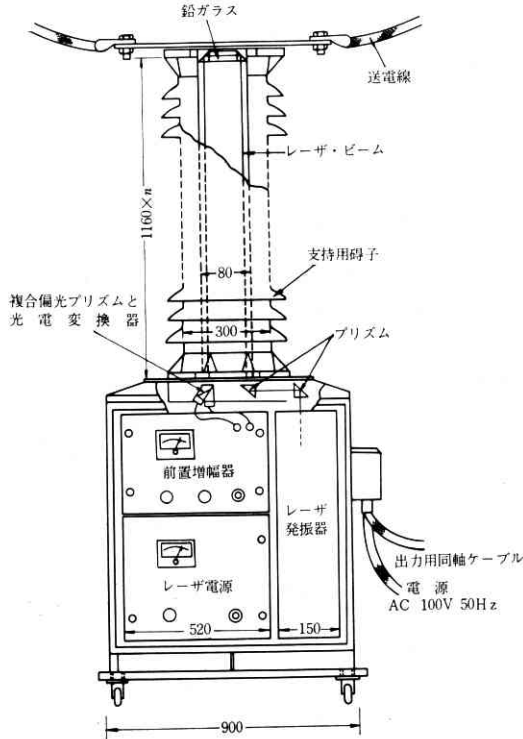


図 3 試験用広帯域レーザ式電流測定装置

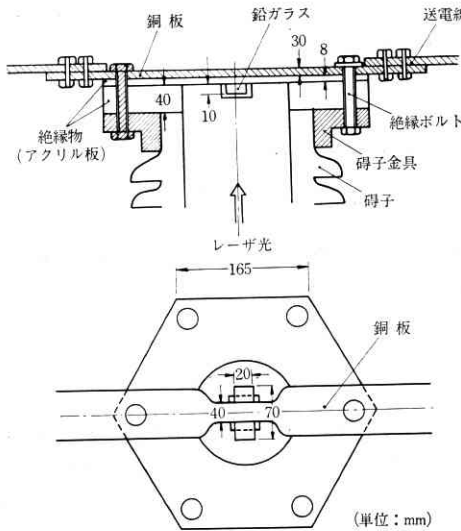


図 4 トランスデューサ支持部 (大電流試験)

高圧、インパルス試験には鉛ガラスに 2.5~100 Turn のコイルを巻き付けたものを使用する。

レーザ光は碍子内を通り、電線に直角に誘電体部によって固定された長さ 6 cm の鉛ガラスを通して並びしてある。鉛ガラスを出た光は複合偏光プリズムで二つの互に垂直な成分に分離され、太陽電池または光電子増倍管によって検波される。その出力電圧は 40 dB の差動増幅器を通った後シンクロスコープに表示される。

(主要性能)

- i) レーザ: Ne-He ガスレーザ, $\lambda=6328 \text{ \AA}$, 出力 10 mW,
- ii) トランスデューサ: PbO 80% の鉛ガラス, 長さ 6 cm, Verdet 定数 $3.2 \times 10^{-5} \text{ rad/AT}$, 屈折率 1.95, 透過率 -2.4 dB
- iii) 複合偏光プリズム: 直交偏光比 -40 dB, 透過率 -0.7 dB
- iv) 光電変換器: (a) Solar cell (SPD 102) 受光面積 $S=8 \text{ mm}\phi$ 周波数レスポンス $f_c=10^2 \text{ KHz}$, 量子効率 $\eta=60\%$, 負荷抵抗 $R_L=600 \Omega$, 検波定数 $K_D=160 \text{ mV/mW}$,
(b) Photo Diode (LSD 39 A) $S=0.9 \text{ mm}\phi$, $f_c=1 \text{ GHz}$, $\eta=60\%$, $R_L=600 \Omega$, $K_D=160 \text{ mV/mW}$.
(c) 光電子増倍管 (R-241) $S=5 \times 18 \text{ mm}$, $f_c=10 \text{ MHz}$, 増倍率 $M=160$ (440 V), $\eta=0.53\%$, $R_L=600 \Omega$, $K_D=800 \text{ mV/mW}$.
- v) 差動増幅器: 利得 40 dB, 帯域 4 MHz (3 dB 低下点), 雑音 (入力換算) $20 \mu\text{V}_{\text{rms}}$, 入力インピーダンス $Z=600 \Omega$, 最大出力電圧 20 V_{pp},
- vi) 光学素子の透過率: 直角プリズム -0.4 dB, 集光レンズ -0.5 dB,

次に試作レーザ CT の性能を示すと、

1) 測定範囲

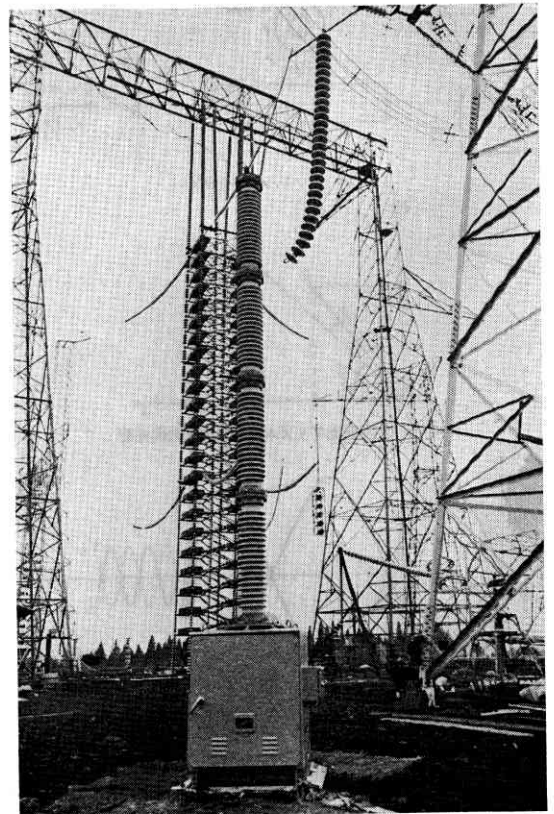


写真 1 レーザ CT の外観

下限はレーザ、増幅器、光電変換器などの雑音に関係し S/N で決まる。上限は偏波面の回転角が $\pi/4$ になる値で決まる。

約 100 AT~24600 AT (AT: Ampere Turn)

2) 周波数特性

レーザ光の鉛ガラスを通過する時間で決まり、1 GHz までとれるが、実際には光電変換器、増幅器などによって制限され、試作装置においては

立ち上がり 0.5 μ sec

まで応答する。

3) 過電流特性

過電流による直線性からの誤差は偏波面の回転角から決まり、図 9, 10 より 10 KAT で 10% 誤差を生ずる。これは 6 cm の鉛ガラスを送電線から 2 cm の距離に置いたとき、定格電流を 1000 A とすると 35 倍まで 10% 以下の誤差範囲にある。

4) 定格における S/N による誤差

レーザ雑音で決まり、普通の CT の帯域を 20 kHz とすると、これに概算して考えると

0.5%

である。

上記の如く、すぐれた特性を持ち、特に非常に広帯域であることは急峻なサージの観測に適している。

4. 実験

1) 大電流試験

送電電流に対するレーザ CT 出力電圧の直線性および波形ひずみの試験を目的とする。

測定回路は光電変換器に 8 mm ϕ の Solar cell を用い、差動増幅器出力をシンクロスコープで測定する。

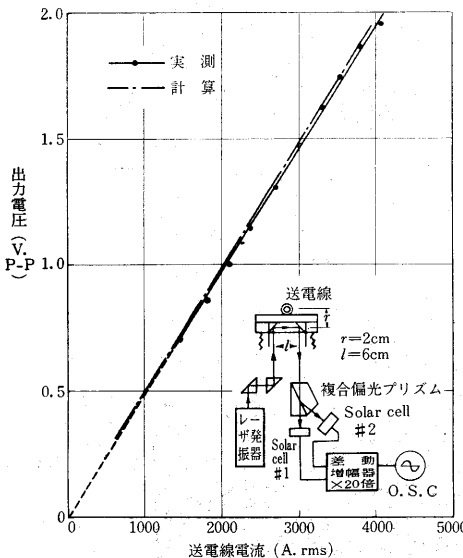


図 5 50 Hz. 大電流特性

図 5 はレーザ CT 出力と従来の変流器を用いて測定した電流値との関係である。図中の鎖線は(6)式に鉛ガラスの Verdet 定数 $V=3.2 \times 10^{-5}$ rad/AT, $\phi=1.96$ rad より $\eta=1.41 \times 10^{-5} I_{Ac}(A)$, 複合偏光プリズムのレーザ入力を $K_A |E_0|^2 |T|^2 / 2 = 3.79$ mW, Solar cell の検波定数 $K_D = 116$ mV/mW, 増幅器の利得 20 倍を代入して求めた。

$$V = 0.495 I(A) \text{ mV}_{p-p} \quad (8)$$

で、レーザ CT の理論値である。一方、実験結果から求めた V と I との関係は

$$V = 0.48 I(A) \text{ mV}_{p-p} \quad (9)$$

となるので、両者は非常によく一致している。(8)式が常に再現性があるならば、精度 3.1% でレーザ CT による電流の絶対測定が可能である。

また実験範囲ではレーザ CT の直線性は十分良いことがわかる、理論的には 35 kA で 10% の誤差を生ずる。レーザ CT 出力波形は、わずかなひずみの影響が観測されたが、これは試験用変圧器励磁電流に伴う入力電流のひずみによるもので、レーザ CT 内部でのひずみはないものと思われる。

雑音はショット雑音の実測値は 50 mV $_{pp}$, 増幅器および Solar cell の雑音は 5 mV $_{pp}$ で、送電電流 1500A に対する S/N は 23 dB となる。また 1500 A で差動増幅器利得を 26 dB としたときの誘導雑音は 20 mV $_{pp}$ で、信号対誘導雑音比は 31 dB である。誘導雑音は送電電流に比例して増加すると考えられ、したがって総合 S/N は 23~31 dB となる。

2) 超高压重畳試験

この試験の目的は、トランスデューサ部が超高压によっていかなる挙動を示すか、また送電線からのコロナおよび誘導電流が電流測定に障害を与えるか否かを調べる。測定回路は図 6 のとおりである。レーザ CT は高さ 1160 mm のポスト 3 本で筐体部とトランスデューサ部の絶縁を保っている。トランスデューサ部には低電流測定における S/N 比を増加させるため 10 Turn のコイルを巻いた鉛ガラスを使用した。写真 2, 3 は原波形とレーザ CT の出力波形で、原波形のひずみはそのままレーザ CT の出力波形に表われており、 S/N 比も十分

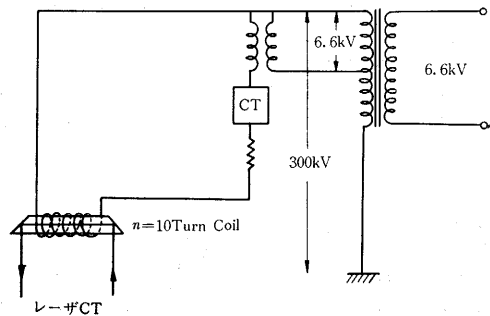
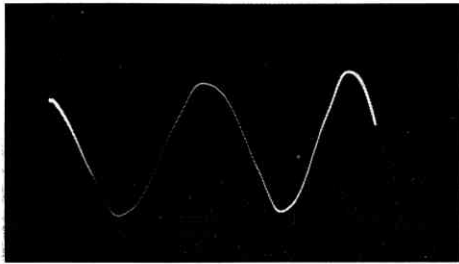
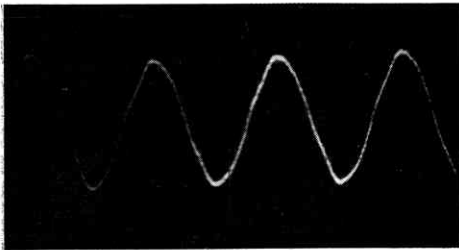


図 6 300 kV, 100 A 重畳実験回路

良く、超高圧印加のために雑音が増したり、波形がひずむことなく、少なくとも対地 300 kV 以下では障害のないことが確認された。



V=300 kV I=74.7A
写真 2 重畳試験原波形



V=300 kV I=74.7A N=10T
写真 3 レーザ CT 出力波形

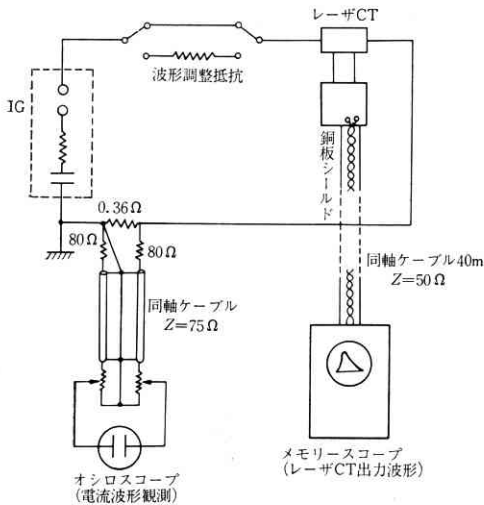


図 7 インパルス実験回路

3) インパルス試験

レーザー CT の時間分解能 (波形忠実度) と衝撃波による付属回路への誘導障害等を調べることを目的とする。

実験回路は図 7 に示すとおりで、衝撃電流の測定は分流器とシンクロスコープによって測定される。なお衝撃電流の流れる主回路はアース電位の変動を押えるため 1 点アースとしてある。

a) 写真 4, 5 は立ち上がり $T_f=5 \mu\text{sec}$ 、波高値 18 A の結果で光電変換器に Solar cell を用いた場合、その応答速度の関係から、レーザー出力波形は原波形と異な

った緩波形が観測され、立ち上がりの早い衝撃波に追従しないことがわかる。

Photo Diode の場合、その周波数レスポンス高く原波形を忠実に再現している。S/N が悪いのは Photo Diode の受光面 $0.5 \text{ mm}\phi$ による受光率の悪いのが原因する。

b) 写真 6, 7 は S/N の改善対策として、光電変換器に光電子増倍管を用い、トランスデューサに 10 Turn

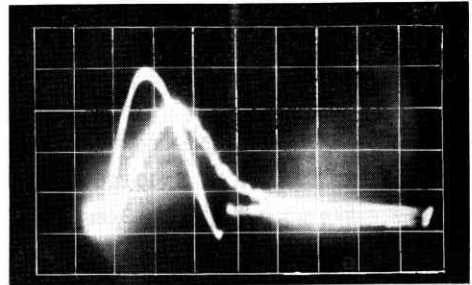


写真 4 光電変換器 (Solar cell)
 $T_f=5 \mu\text{sec}$ $I=18\text{A}$
横軸: $5 \mu\text{sec}$
縦軸: レーザ波 0.2 V/div
電流波 5 A/div

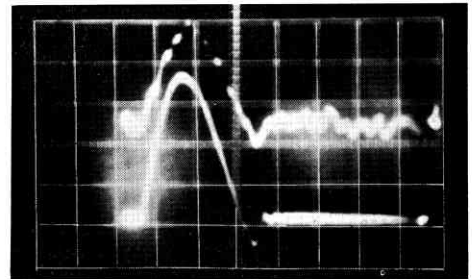
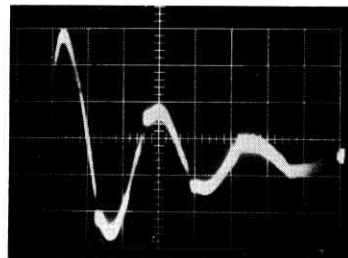
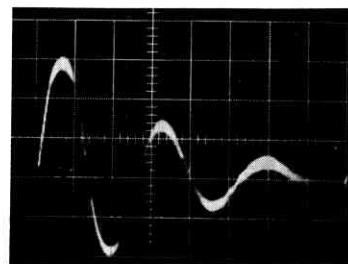


写真 5 光電変換器 (Photo Diode)
 $T_f=5 \mu\text{sec}$ $I=18\text{A}$
横軸: $5 \mu\text{sec}$
縦軸: レーザ波 0.5 V/div
電流波 5 A/div



$T_f=2 \mu\text{sec}$
 $I=1.6 \text{ kA}$
横軸: $5 \mu\text{sec/div}$
縦軸: 400 A/div

写真 6 衝撃電流波



$T_f=2 \mu\text{sec}$
 $I=1.6 \text{ kA}$
横軸: $5 \mu\text{sec/div}$
縦軸: 5 V/div

写真 7 レーザ CT 出力波形

のコイルを巻いた鉛ガラスを使用している。立ち上がり $T_f=2 \mu\text{sec}$ 、波高値 2 kA の原波形とレーザ CT 出力波形である。大幅に S/N が改善されている。原波形上のスパイク (約 $0.2 \mu\text{sec}$) は増幅器の応答外でレーザ CT 出力波形には見られないが、全体として原波形を忠実に再現している。

この他、電力中央研究所塩原試験場の IG 装置による高電圧 4 MV~10MV、立ち上がり $0.7 \mu\text{sec} \sim 1.2 \mu\text{sec}$ 、波高値 8 kA~30 kA のインパルス試験を行なっている。

以上の如くこの試作レーザ CT 装置の実験の結果、良い直線性と波形ひずみのないこと、コロナ雑音の影響のないこと、周波数レスポンスの良いことなどほぼ所期の成果を上げることができた。

5. 誤差の原因と対策

a) レーザ出力変動による誤差……レーザ出力の短時間の変動と長期変動はミラー反射、光電変換器の感度、増幅器の利得などに直接比例すると考えられる。これはレーザの単一モードの安定が重要であるが、回路的に変動を補償する方法、あるいは図 8 のように、2 次コイルを地上において光の偏波方向だけを検出する方法がある。この場合出力電流は 2 次コイルの巻線比だけで決まり、 $\sin \theta$ の非直線性に無関係となるが、時定数が長くなり周波数レスポンスは悪くなる。

b) 鉛ガラスの熱的変化による誤差……反磁性体である鉛ガラスは温度依存性がなくほぼ一定の Verdet 定数 ($-200^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$ 実測) をしめすから、それ自体の回転角は周りの温度変化に対し安定である。しかし鉛ガラスの両端面が光の波面に平行でわずかな反射を持つと、多重反射による干渉効果が鉛ガラスの熱膨脹に関連し誤

差を生ずる原因となる。それゆえ干渉効果を反射防止膜、Brewster 角カットのような適当な方法によって避ける必要がある。

c) 偏波面のだ円化による誤差……プリズムなどで光を反射させると、光の進行方向と反射面の法線とでなす面に対し、垂直(P)か平行(S)かの偏波に対する屈折率のとくに位相が変化し、直線偏波に対し反射波はだ円偏波になる。このだ円偏波を差動検出したときの振幅は反射器の材料により異なるが、一般に出力の振幅が減少する。補償法としては、一方向の偏波を二度の反射で P, S 両方の反射を行なわせれば、振幅と位相の変化は両方も同じになり、直線偏波を保つことができる。

d) トランスデューサ部……鉛ガラス中の光の伝ば距離および導体からの距離が測定周波数の波長より小さいとき、ファラデー回転の(1)式は成立するが、周波数が高いときはそれぞれの部分における磁界と光の位相の遅れを考える必要があり、トランスデューサとしての上限周波数が決まる。また送電線の電流による磁界は実際の場合、非集中配列のため(1)式の ϕ は実験的に校正定数を決めねばならない。

導体にコイルを使用したとき、コイルのインダクタンス L が送電線のサージインピーダンス Z_0 に比べ

$$\omega L \ll Z_0 \tag{10}$$

でないと、測定電流波形にひずみを生ずる原因となる。

それゆえ高周波電流の測定にはコイルを避けるか L を小さくする必要がある。

e) 飽和現象……飽和しない θ の条件は $\theta < \pi/4$ であるから飽和送電電流値 I_c は(3)式から

$$\frac{\pi}{4} > \frac{V\phi}{2\pi} I_c \tag{11}$$

で決まる(図 9)。 $\phi/2\pi = N(\text{Turn})$, $V = 3.2 \times 10^{-5} \text{rad/AT}$

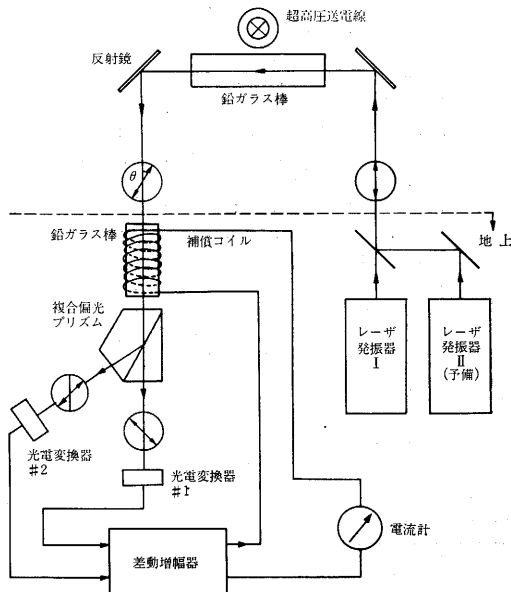


図 8 補償形レーザ CT 原理図

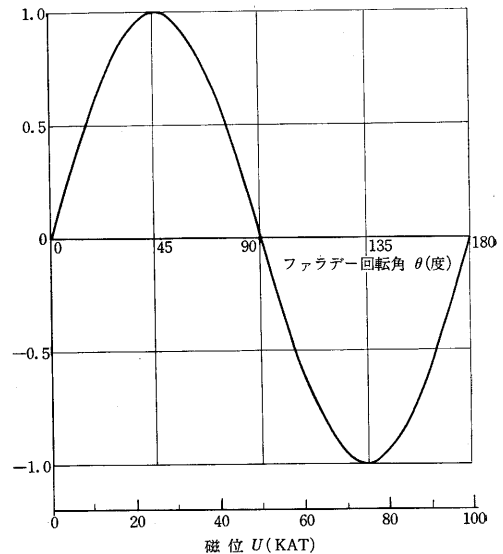


図 9 ファラデー回転角と磁位差

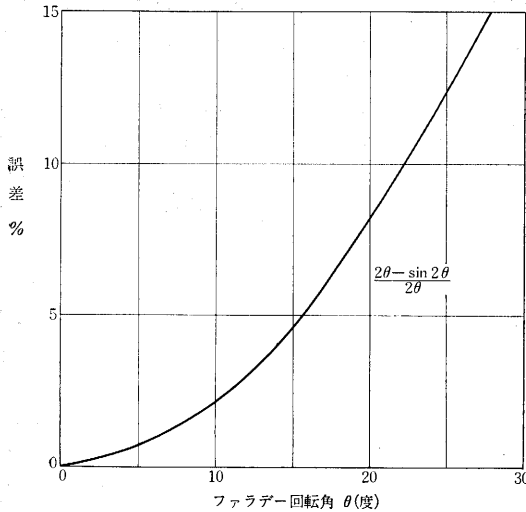


図 10 $\sin 2\theta$ の非直線性による誤差

を代入して

$$I_c N = 2.46 \times 10^4 (\text{AT}) \tag{12}$$

となる。したがって $N=0.32 \text{ T}$ であれば $I_c=7.7 \times 10^4 \text{ A}$ で飽和し、 $N=10 \text{ T}$ であれば $I_c=2.46 \times 10^3 \text{ A}$ で飽和する。

また差動増幅器出力電圧の $\sin \theta$ の非直線から生ずる直線性からのずれによる誤差は

$$E_{\text{error}} = \frac{2\theta - \sin 2\theta}{2\theta} \tag{13}$$

で与えられる(図 10)。したがって定格電流の 20 倍まで良い直線性を得るためには、定格電流で $\eta=2 \times 10^{-2} \text{ rad}$ におさえる必要がある。これは鉛ガラスの長さおよび送電線からの距離の調整により可能である。

6. 結 言

以上無接触 - 無導体方式のレーザ CT について、その基本原理と特徴を述べ、その試作装置における実験の結果はほぼ所期の成果を上げることができた。

将来レーザ CT は種々の分野に応用されることが期待され、その実用化による効果を要約すると、電流計測用として変電所に設置すれば高価で巨大な碍管を必要とせず現用の変流器と比較して小型になるので、変電所計測機器の小型化による変電所自体の小型が予想され、変電所建設費も低減され、経済的に多大の利益が予想される。

1 μsec 以下の分解能が要求される高圧インパルス電流を従来の変流器によって測定しようとする場合、変流器の浮遊リアクタンスによる誤差のため、正確なインパルスの波形測定は著しく困難である。ところがレーザ CT の分解能はきわめて高いので、継続時間の短く複雑な波形をもつ高圧インパルス電流測定が正確に行なわれるものと考えられる。

その他レーザ CT が無接触であること、能動素子を持たないこと、大電流計測に適していることなど実用化による利益は大きいものと考えられる。

一方送電線の保護の立場から計器用変圧器 (PT) も重要な電力情報の検出源であるが、従来 PT を超高圧に拡張すると CT と同様な欠点を生じることから、当研究室において CT と同様にレーザを用いた PT を開発している。原理は水晶中のレーザ光が電界により複屈折性を生じ (ポッケル効果) レーザ光のだ円偏光による位相差を検出して測定する方法である。現在初歩的なデータが得られている。この件については次の機会に報告する予定である。

終わりに、本研究に対しご援助を賜った本学藤高教授、高木教授、河村助教授、安田助教授および東京電力 KK 高木技術部長、三井技術開発課長、志田副長、および電力中央研究所中村室長、竹下氏、笹野氏、河合氏、およびレーザ CT 研究会に厚く感謝する。

(1967 年 6 月 10 日受理)

参 考 文 献

- 1) 昭和 41 年電気連合大会シンポジウム (S 5)
- 2) 飯島, 他, “パルス形地絡継電装置の 30 kV 系統への適用について” 電力中研報告 No. 66041 (Sep. 1966).
- 3) G. H. Moulton: “Light Pulse System Shrinks High-Voltage Protection Device”, Electronics vol. 38, 17 (May 1965). “Optical Communication Link to Aid Measurements on High-Voltage Conductors” Electronics and Power, vol. 12 (Oct. 1966).
- 4) 森本和三ほか, “変流器の過渡特性”
- 5) L. K. Anderson and B. J. McMurtry: “High-Speed Photodectors” Proc. IEEE, vol. 54, No. 10 (Oct. 1966).
- 6) H. Kogelnik and T. Li: “Laser Beams and Resonators”, Proc. IEEE, vol. 54, No. 10 (Oct. 1966).
- 7) 藤井, 横山: “光学的ファラデー効果とサーキュレータ” 電気連合大会 No. 1001 (昭和 41 年).
- 8) S. Saito, et al. “The Laser Current Transformer for EHV Power Transmission Lines”, IEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-2, No. 8 (August 1966).

