

## 発電機の保護・安定化制御のための光計測システムの開発

林, 宏充  
九州大学大学院総合理工学研究科量子プロセス理工学専攻

植田, 清隆  
九州大学大学院総合理工学研究科量子プロセス理工学専攻

栗林, 英行  
九州大学大学院総合理工学研究科量子プロセス理工学専攻 | 九州電力 (株)

能見, 和司  
九州電力 (株)

他

<https://doi.org/10.15017/16563>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 21 (3), pp.257-262, 1999-12. 九州大学大学院総合理工学研究科  
バージョン :  
権利関係 :

# 発電機の保護・安定化制御のための 光計測システムの開発

林 宏 充\* ・植 田 清 隆\*\* ・栗 林 英 行\*\*\*  
能 見 和 司\*\*\* ・竹 下 博 人\*\*\* ・樋 口 貞 雄\*\*\*\*

(平成11年8月31日 受理)

## Development of Optical Sensing Systems for the Protection and the Stabilization of Synchronous Generators

Hiromitsu HAYASHI\*, Kiyotaka UEDA\*\*, Hideyuki KURIBAYASHI\*\*\*  
Kazushi NOUMI\*\*\*, Hirohito TAKESHITA\*\*\*, Sadao HIGUCHI\*\*\*\*

For the sake of stable control of electric power systems, robust protection systems, rapid recovery of breakdown points when troubles occur, subsequent stabilization of electric power systems after trouble and simplification of sensing systems, are required. Laser instrumentation can measure the magnetic flux and the electric current without any contact. Also, it can measure internal phase angle with out any contact. Therefore we developed optical current transformer for the protection of transmission lines and for stability control of the electric power system. We developed measuring system of internal phase angle for the stable control of synchronous generator, too. In this study, as the first step we made both an optical current transformer and measuring system of internal phase angle. As the second step, by measuring the characteristics of various materials, we selected useful optical materials for measuring the current and designed optical current transformer. Finally, we evaluated both the performance of the prototype optical current transformer and measuring system of internal phase angle.

### 1. 緒 言

雷撃などの故障現象が発生した送電線を瞬時に検出して遮断するリレー技術は、電力システムの安定運用に不可欠で極めて高い信頼性を要求される。このためには故障発生時の送電線の電流や電圧の変動を正確に計測する変圧器 (PT) や変流器 (CT) などの計器用変成器が必要になる。これまでの PT, CT は電気機械型 (アナログ) リレーの駆動力を得るため、2次側出力を 110V, 5A 定格とする必要があった。そのため、PT, CT は従来の巻線、鉄心、プッシング等を用いた構造は変えられず、特に CT は設置主回路に対して直列計器となっており、これ以上の縮小化とコスト低減が困難な状況にある。また、発電機の安定運転や無効電力調整範囲の拡大のため、内部相差角のオンライン計測が必要となる。これまで、内部相差角をオンライン測定しながらの運転は行われていない。

一方、現在急速に導入が進んでいるデジタルリ

レーは、入力部が電子回路で構成され、微小電流量や光信号でも作動できるため、従来仕様の PT, CT に課せられていた 2次側出力面からの制約が不要になる。本研究では、デジタルリレーへの適用を念頭に置いて、高圧送電線の電流をレーザにより計測する光 CT を試作した。さらに、九州電力丸田発電所で実施された発電機の 3相突発短絡試験、3相アーク短絡試験の機会に、この光 CT で短絡電流を測定し、現用 CT と比較した。これと同時に、電力システムの光による測定・制御のため、レーザによる内部相差角測定システムを試作し、定態安定限界試験を行い、不安定状態から脱調までの内部相差角、力率位相角を測定し、現用方法との比較を行った。

### 2. 原 理

#### 2.1 光 CT

光 CT は磁気光学ファラデー効果を利用しケーブルからの漏れ磁界を測定することにより電流を測定するものである。ファラデー効果は磁界と平行方向に直線偏光が結晶を通過するとその偏光面が回転する現象で、回転角  $\theta$  は次の式で表わされる。

\*量子プロセス理工学専攻博士課程

\*\*量子プロセス理工学専攻

\*\*\*九州電力(株)

\*\*\*\*(財)電力中央研究所

$$\theta = VHL$$

但し V: ヴェルデ定数  
H: 磁界の強さ  
L: 結晶の長さ

代表的な測定方法としてはクロスニコル法があり、偏光子、検光子、フォトダイオード、アンプ、磁気光学材料、光源等から構成され、検光子を回転させ消光状態の角度を測定する。

### 2.1 内部相差角による安定判別

電気子巻線の1相について、電流  $i$  を基準ベクトルにとり、これと鎖交する磁束  $\Phi$ 、誘導起電力  $\dot{E}_a$  などの時間ベクトルは Fig. 1 のように描ける。このベクトル図の  $\dot{E}_o$  と  $\dot{V}$  との位相角  $\delta$  は内部相差角または、負荷角と呼ばれ発電機の安定判別の重要な状態量である。この内部相差角を発電機ロータ部にレーザをあて、その反射光の光パルスと発電機 PT の出力との位相差より測定した。

### 3. 光 CT 設計方法

光 CT を設計するにあたって、我々はまず光 CT 接続部のケーブル寸法、定格電流及び短絡電流の大きさの調査を行い、光 CT 接続部の発生磁束密度を計算した。次にその計算した磁束密度により十分な感度を示すヴェルデ定数を持った結晶として YIG を採用した。この材料の波長とヴェルデ定数、波長と透過率の関係から、光 CT 用レーザ波長を選定した。最後にレーザ

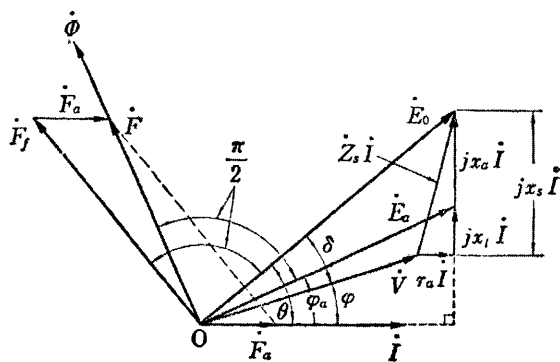


Fig. 1 The time vector figure of synchronous generator

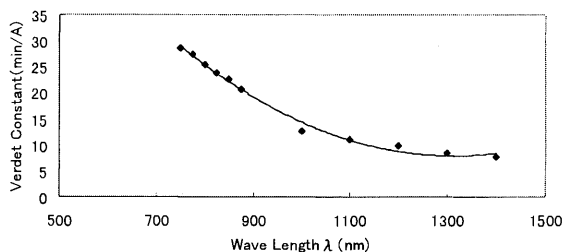


Fig. 2 The Verdet constant-Wave length curve

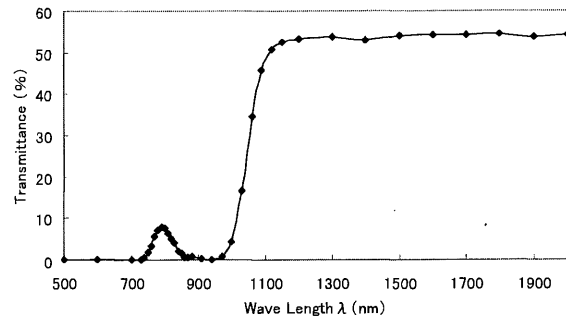


Fig. 3 The transmittance-Wave length curve

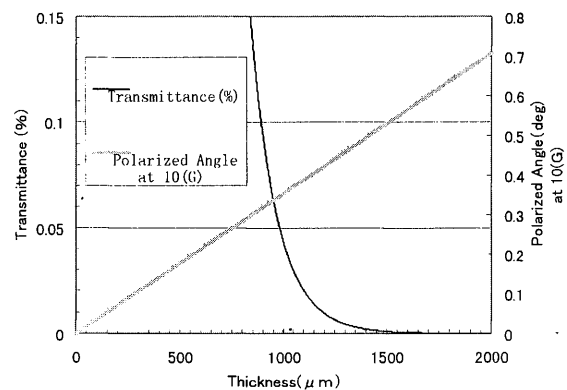


Fig. 4 The transmittance-Thickness curve and the polarized angle-Thickness curve

出力、ファイバの入射面の後方反射損失、YIG 結晶の厚さに対する透過率、フォトダイオードの放射感度、電流電圧変換アンプの変換インピーダンスを考慮し、アンプの最大入力電圧に合うように YIG 結晶の厚さを決定した。

具体的には、発電機母線のケーブル径、定格電流や短絡電流の大きさより、発生磁束密度は 7~70 ガウス発生する。今回の定格 7 ガウスを測定する為にはヴェルデ定数の大きな結晶を用いる必要がある。我々は高い磁束密度では飽和してしまうが、高いヴェルデ定数を持つ YIG を光 CT 用の結晶として選択した。その波長-ヴェルデ定数曲線を Fig. 2 に、波長-透過率曲線を Fig. 3 に示す。Fig. 2 より波長の短い光の方が高いヴェルデ定数を示し、Fig. 3 より波長の短いところでは波長 800nm 付近の光を透過することが分かる。それらの結果より、我々は光 CT 用光源として波長 780nm の半導体レーザを用いることにした。波長 780nm において、結晶の厚さに対する透過率は Fig. 4 のようになる。ここでレーザ出力、ファイバの入射面の後方反射損失、YIG 結晶の厚さに対する透過率、フォトダイオードの放射感度、電流電圧変換アンプの変換インピーダンスを考慮し、アンプの最大入力電圧に合うように YIG 結晶の厚さを決定すると、結晶の厚さは 1120 $\mu$ m 必要となる。また、結晶の厚さ

は検出部に載ってくる光ノイズの関係から薄い方が良い。そこで、我々は結晶の厚さを  $1120\mu\text{m}$  に決定した。

今回、現地試験の発電機の定格電流は  $70\text{A}$  であり、光 CT をケーブルの中心から  $2\text{cm}$  の所に接続した場合、光 CT 部での発生磁束密度は  $7$  ガウスとなった。この時 YIG のヴェルデ定数から偏光角を算出すると、偏光角は最大で  $0.39$  (deg) 回転し、アンプ入力前の信号の振幅が  $2.44\text{mV}$  となり十分な感度が得られる。この時、検光子の透過光強度を偏光角に比例すると近似した誤差は  $0.000042\%$  であり、十分近似されている。この近似誤差の許容範囲を  $1\%$  とした場合、回転角の上限は  $12$  (deg) であり、その時の磁束密度は  $210$  ガウス ( $2100\text{A}$ ) である。また、この YIG の飽和磁束密度は  $1800$  ガウスであるので、この CT は  $0\sim 2100\text{A}$  まで測定可能であることが分かり、今回の定格電流から短絡電流までのダイナミックレンジを十分にカバーしていることが分かる。

## 4. 実験方法

### 4.1 光 CT による電流測定

ファラデー効果による電流の測定方法は Fig. 5 の構成で行なった。レーザー光から偏光子を通して直線偏光を、YIG に入射する。ケーブルから流れる電流に比例した漏れ磁界が生じ、それが YIG に印可される。その磁界により YIG を透過する直線偏光は磁界の強さに比例して回転される。その透過光を偏光子の偏光角から  $45$  度回転させた検光子を通してフォトダイオード等によって読みとることにより、ファラデー回転角の小さな時は偏光角の回転に比例して変化する出力を光の強弱として読みとることができる。そのため、電流に比例して変化する光出力を読みとることができる。これが光 CT の原理である。

この光 CT の出力の電流/電圧変換定数は次の方法で決定した。まず、前もって、今回の取り付け箇所、定格電流を流したときの磁界を計算しておき、その磁界を光 CT に印可する。その光 CT の出力波形は Fig. 6 の様になり、その時の値を読みとっておく。次に光軸のズレなどの影響で現地においては DC 成分が変化しているものと考えられる。それらの結果より、

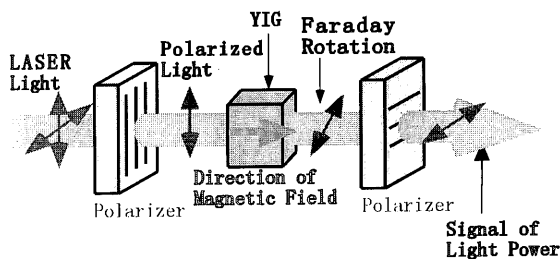


Fig. 5 The principle figure of optical CT

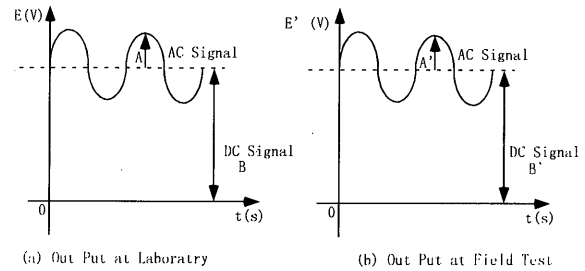


Fig. 6 The out put of optical CT

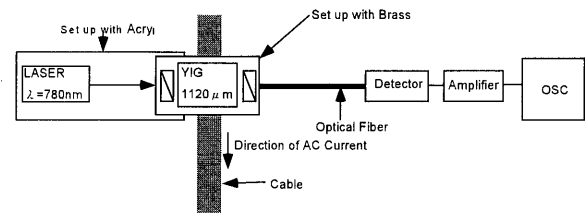


Fig. 7 The System of Optical Current Transformer

定格電流  $70\text{A}$  において、電流値は以下の式になる。

$$i(\text{瞬時値}) = 70\sqrt{2} \times A' \times B / (A \times B')$$

更に、現地での読みとり電流が実際の電流とかけ離れている場合には、現地での定格電流を光 CT によって読みとり、校正し直す。現地の定格電流での信号成分を  $A''$  とすると、

$$i(\text{瞬時値}) = 70\sqrt{2} \times A' / A''$$

となる。今回の試験はこの方法を用いて電流値を校正した。

実際の測定は Fig. 7 の構成で行った。半導体レーザーの光をとばし、偏光子、YIG、検光子を真鍮で1つにまとめた装置に入射する。この真鍮にて YIG ののってくる他相の電磁ノイズをカットしている。レーザーとその装置もアクリルで一つにまとめ現地での光軸設定の煩わしさを解消した。アクリルを用いたのは絶縁対策である。その真鍮部を発電機出口母線に接続し、そこからの光をファイバによってフォトダイオードまで送り電流波形を読みとった。

#### 4.1.1 アーク短絡特性試験

アーク短絡試験の目的は、発電機の至近端でアーク事故が発生した場合の電圧・電流変化を測定し、アーク抵抗の負荷特性を把握するとともに、発電機へ与える影響を分析することで、我々はアーク短絡時の短絡電流を光 CT により測定することにより、光 CT の実用性を実証する。試験時の系統を Fig. 8 に示す。試験は丸田発電所の 1-13 の発電機側に、アーク短絡回

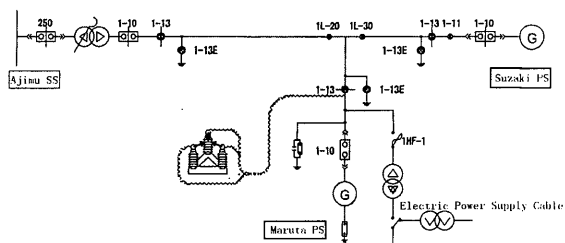


Fig. 8 A system of field test when 2 phase were shorted by an arc

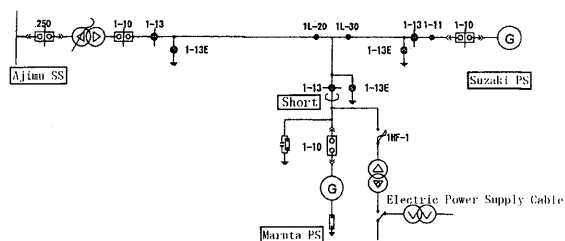


Fig. 9 A system of field test when 3 phase were shorted by an arc

路を設置して発電機を起動し、並列用 CB 投入後のデータを測定する。

#### 4.1.2 三相突発短絡試験

三相突発短絡試験の目的は、三相突発短絡時の発電機電流、界磁電流の現象を把握し、発電機定数と電力系統の電気現象関係の理解を深めることで、我々は三相突発短絡電流を光 CT により測定することにより、光 CT の実用性を実証する。試験時の系統を Fig. 9 に示す。試験は丸田発電所の 1-13 の発電機側を三相短絡させて発電機を起動し、並列用 CB 投入後のデータを測定する。

#### 4.2 内部相差角、力率位相角測定

発電機の磁極による内部電圧と、端子電圧の位相差 (内部相差角) を測定する。その方法は磁極数の半分のシャフト上にある白黒ストロボ模様による反射光パルス信号を内部電圧軸として、端子電圧との角度を各サイクル毎にデジタル処理して得る。本測定結果はアナログ式位相角測定と比較する。位相角測定装置構成図を Fig. 10 に示す。白黒スポットの位置と磁極の位置はずれているが発電機起動後の並列前の内部相差角は 0 度なので、並列前のストロボと電圧の位相差を読みとり、並列後の位相差からその値を引くことにより校正できる。

次に発電機の安定度監視のため運転力率を測定する。その方法は測定した発電機端子電圧と電流の瞬時値がゼロ線をクロスする時間差から電圧を基準にして各サイクル毎にデジタル処理をして得る。

##### 4.2.1 定態安定限界試験

定態安定限界試験の目的は、発電機無効電力調整範

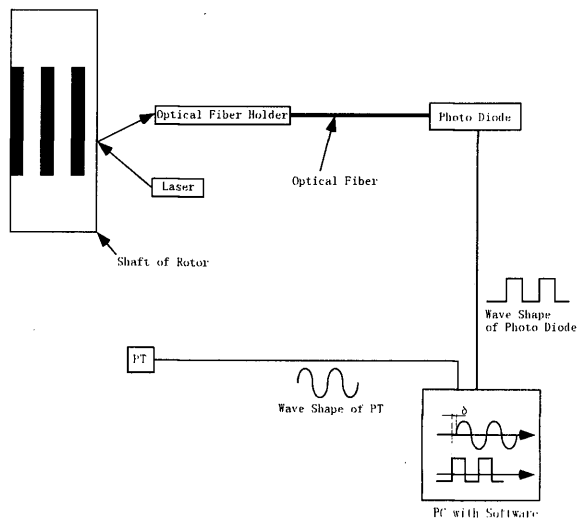


Fig. 10 A internal phase angle measurement system

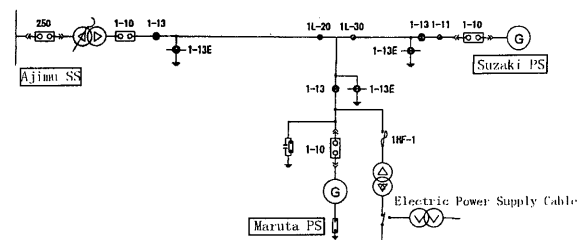


Fig. 11 A system of field test of stability limit

囲を拡大する要因の一つである定態安定限界の電気現象を測定・解析し定態安定限界決定手法を検証することで、我々は試験開始から脱調までの間内部相差角、力率位相角を測定することで安定度を監視するとともに、レーザによる位相差測定系の実用性を実証する。試験時の系統を Fig. 11 に示す。発電機を系統に並列し、励磁を徐々に弱めて不安定領域まで移行させ、定態安定限界を求める。

## 5. 実験結果

### 5.1 アーク短絡電流

Fig. 12 に赤相—青相 2 相アーク短絡の光 CT と現用 CT との電流波形の比較を示す。白相や赤相にのっているノイズは現地での蛍光灯や白熱球、フォトダイオードにのる電磁ノイズや発電機等の振動によるものであり、改良していく必要があるが、青相はほぼ同様の波形を示したので、母線内の電流信号を光 CT で測定できることが実証できた。

### 5.2 三相突発電流

Fig. 13 に三相突発短絡試験の現用 CT の電流値とその相の漏れ磁界をガウスメータで測定し校正した電流波形を示す。このように磁界を正確に計ることにより電流値が測定できることが実証でき、光 CT での測

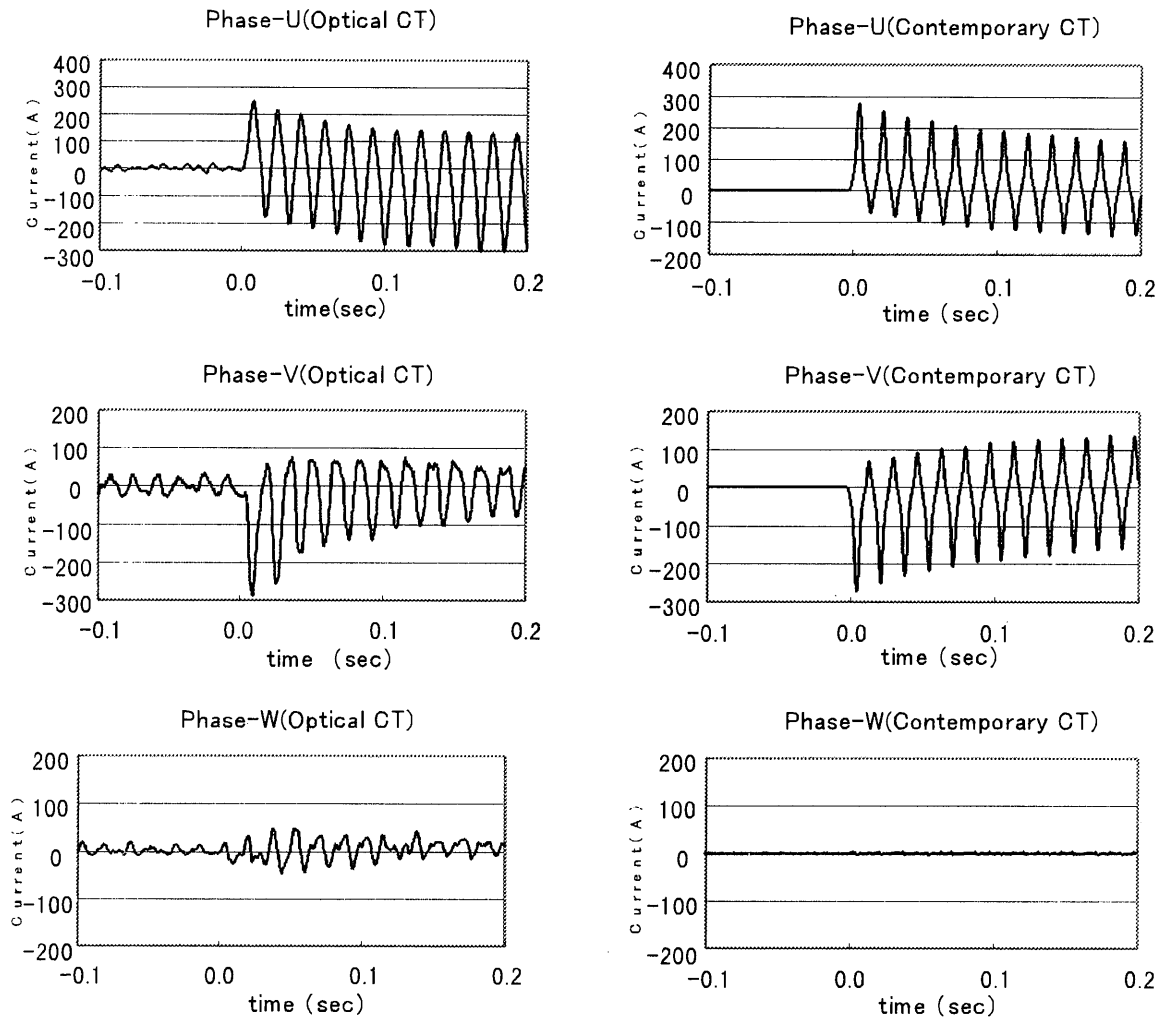


Fig. 12 The short current 2-phase were shorted by an arc

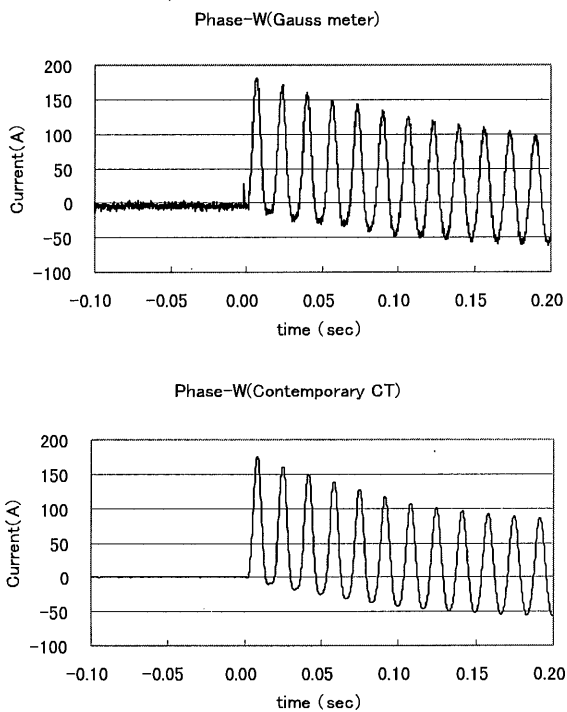


Fig. 13 The 3-phase short circuit current

定も磁束密度を正確に計ることにより電流値を測定できることがこの結果から分かり、現段階の光 CT に種々のノイズ対策を行い精度を向上させる必要があることがわかった。

### 5.3 内部相差角

Fig. 14 に内部相差角の現用測定器 (アナログ式) と光計測システム (デジタル式) で計測した位相差の

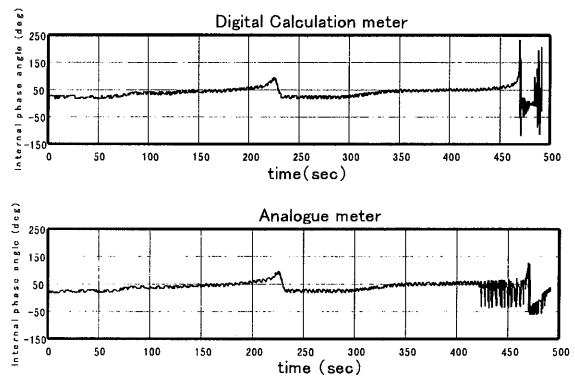


Fig. 14 The internal phase angle when static stability test

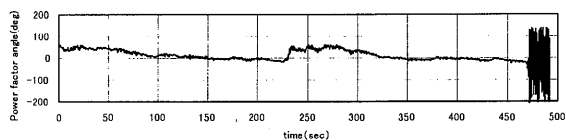


Fig. 15 The power factor angle when static stability limit test

比較を示す。ほぼ同様の波形を示していることが分かり、脱調直前では現用機より良い状態で測定できていることが分かる。

Fig. 15 にデジタル式で測定した力率位相角を示す。測定開始から230秒後に脱調しかかった様子と、470秒後に脱調した様子が分かる。

## 6. 結 言

アーク短絡特性試験及び、三相突発短絡試験により、光 CT にてアーク短絡電流および、3 相突発短絡電流を測定することができた。それらの結果から、次の改良の重要性が明らかになった。

1. 試験現場における蛍光灯や白熱電球の光ノイズの遮断
2. 半導体レーザー偏光子—YIG—検光子—光ファイバの光軸の固定。
3. 測定相以外からの電流、発電機磁束、電源などの電磁ノイズの遮断

今後は今回の経験を生かして光や電磁ノイズに強い測定回路を開発する。具体的には、

1. 半導体レーザー、偏光子、ファラデー素子、光ファイバーを一体化し、光軸を完全に合わせた回路を作成する。
2. この回路のうち光ファイバーを除いて計測後の

レーザを空間で飛ばして受光端で検光する測定回路を作成して、光ファイバの無しと有りの優位性を比較する。

3. 測定回路のレーザはバッテリー駆動にし、レーザ出力にのる電源ノイズをカットし、出力を安定させる。
4. ファイバの端面を研磨紙で鏡面研磨しファイバ入射面の精度を向上させる。

定態安定限界試験により、試験時の脱調過程を精度良く測定する事ができた。この結果今回用いたシステムはデータの入力や処理速度から見て、発電機の安定度監視制御を低コストで簡単に製作できる可能性を示した。今後はこれを用いて新しい発電機の安定度監視制御システムの研究を開始する。

## 謝 辞

最後に本研究において、九州大学赤崎正則名誉教授には丸田発電所での現地試験に赴いて頂き、実験に対する貴重なアドバイスを頂きました。村岡克紀教授、前田三男教授には光学に関する多くの御教授を賜りました。岡田龍雄教授、内野喜一郎教授には今回の実験材料合成においての御協力を賜り、内海通弘助教授、修士一年近藤剛氏には実験について多くの御助力を頂き深く感謝します。また、九州電力株式会社の御協力で丸田発電所での現地試験に参加させて頂き、貴重なデータを得ることが出来ました。九州電力株式会社系統運用部の土谷要夫部長、平山平三郎次長、中原道隆課長、寺藺完一課長及び、総合研究所の提克哉主席研究員、岡元洋主幹研究員の多大な御援助に対し、深く感謝いたします。