UDC 621.317.753:621.311.1.014.7.004.64

資 料

55-B2

電力系統事故発生時の波形記録装置について

正 員 青 木 文 雄 (東京電力)
 非会員 細 川 洋 (東京電力)
 非会員 立 松 健 三 (松下電器)
 非会員 菊 池 国太郎 (松下通信)

1. ま え が き

電力需要の増大に対応して大容量電源の遠隔立地および都心外辺部 500 kV 架空系、都心部 275 kV 地中系の増強をはじめとする電力系統の拡充が行なわれている。

しかし、この電力系統の複雑、巨大化により事故の波及・影響範囲、事故電流などが増大してゆく傾向になってきている。また、サイリスタなどを用いる非直線性の負荷の増加により、系統の拡充と相俟って常時事故時における電流・電圧波形は高調波成分を含むようになってきているため、従来の系統保護装置の高速、的確な動作を困難にする要因が増加している。

このような状況のもとで電力の安定供給とその質の向上に対する社会の要請に応えるため、保護機能の高度化をはじめとする各方策を進めているが、一方、電力系統事故時の高調波成分を含む電流・電圧波形の実態や各種保護装置の動作状況を的確には握ることが具体的な対策を実施する上で極めて重要になってきた。

従来、このような目的に適する装置としては、記憶部に磁気ドラム、または、エンドレス磁気テープを使用し、また、これらのデータのハードコピー記録部に電磁オシログラフ、インク書きペンレコーダあるいは感熱式、放電式のインクレスレコーダを用いたものがあり、電力会社では、これらのうち主としてフランス

のカルパンチェ社で開発された自動オシログラフを用いている。すなわち、このカルパンチェ自動オシログラフは記録インクを塗られたドラムにサファイアによる記録針で記録するもので、事故発生時にはこのドラムに記録紙を圧着し、その事故波形を陰画として得られるようになっている。また、この装置はデータ記憶部、ハードコピー記録部とも機械的に動作する構造となっており、更に、記録周波数も 50 Hz または 60 Hz の商用周波数を対象にしているため、今後の電力系統に使用するには応答周波数帯域、記録精度などの点で満足できない状態になってきている。

そこで、筆者らは送電線や母線などの電力系統事故時の電流・電圧波形記録用として、入力信号をデジタル処理し、そのままアナログ的に連続記録する全デジタル方式の装置を開発した。

本装置は、昭和 52 年 4 月より変電所に設置して実証試験を開始し、従来の記録装置にない貴重な成果を得ている。

実証試験装置は入力要素数として波形入力を 12 要素、オンオフ入力を 15 要素とし、サンプリング周期を 1 入力あたり 2,000 Hz とした。また、インクレスのマルチスタイラス電気ペンにより通電感熱記録紙に記録する方式とし、事故前 60 ms から事故後あらかじめ設定した時間まで連続記録できるものとした。記録振幅は 1 入力あたり最大 50 mm で、257 mm の紙幅の連続記録紙に 500 mm/s の紙送り速度で記録できる。

これまでの約 1 年半にわたる実証試験の結果、実際の電力系統事故時の波形が忠実に記録できる新しい方式の記録装置が実現し、特に、実系統での事故波形が直流成分から商用周波数の第 10 調波成分に至る高調波を実際に近い形で記録できていることは、今後の事故解析の質の向上と対策の的確化に役立つものである。

A New Recording System for the Fault Current and Voltage on the Transmission Line. By Fumio Aoki, Member, Hiroshi Hosokawa, Non member (Tokyo Electric Power Company, Inc.), Kenzo Tatematsu, Non member (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd) & Kunitaro Kikuchi, Non member (Matsushita Communication Industrial Co., Ltd)

青木文雄：正員，東京電力株式会社

細川 洋：東京電力株式会社

立松建三：松下電器産業株式会社

菊池国太郎：松下通信工業株式会社

第1図 開発した装置による事故波形記録(1)

Fig. 1. Fault wave forms (1) recorded with the recorder presented in this paper.

第2図 カルパンチェ自動オシロによる事故波形記録(1)

Fig. 2. Fault wave forms (1) recorded with the automatic oscilloscope made by carpentier Co., Ltd.

第3図 開発した装置による事故波形記録(2)

Fig. 3. Fault wave forms (2) recorded with the recorder presented in this paper.

第4図 カルパンチェ自動オシロによる事故波形記録(2)

Fig. 4. Fault wave forms (2) recorded with the automatic oscilloscope made by carpentier Co., Ltd.

第5図 開発した装置による事故波形記録(3)

Fig. 5. Fault wave forms (3) recorded with the recorder presented in this paper.

第6図 カルパンチェ自動オシロによる事故波形記録(3)

Fig. 6. Fault wave forms (3) recorded with the automatic oscilloscope made by carpentier Co., Ltd.

る。

本資料は、今回開発した記録装置により得られた実証試験での電力系統事故時の電流・電圧波形および本装置の記録方式、装置構成、高信頼度設計について述べる。

特に、記録方式の項では本装置の特長であるマルチスタイラス電気ペン、これを用いたサンプリング補間記録方式についてふれ、高信頼度設計の項では発電電所特有の環境条件である落雷時のインパルス性雑音、電源系統からのサージ性雑音などに対して安定動作を保証するための考え方と具体的に実施した動作信頼性の向上対策について述べる。

2. 系統事故時の電流・電圧波形

電力系統の事故は、発電設備、送電設備の信頼度向上によって年々減少の傾向にあるが、夏期を中心とした落雷シーズンでの雷による系統事故は未だ避けることができない。東京電力管内のある変電所では、夏期の6月から9月初旬までにかけて1台の記録装置当たり30回から70回の記録装置の起動実績がある。

今回、ここで列記する系統事故波形の記録例は、特に、落雷の多い変電所管内での実際の事故電流・電圧波形記録の代表的なものである。

第1図、第3図、第5図の記録例には、電流・電圧の状態が事故前を含めて直流分から高調波成分まで明らかに記録されており、オンオフ要素についても、しゃ断器のトリップ信号、キャリア受信信号、転送トリップ受信信号などが動作時のチャタリングを含めて記録されている。また、第2図、第4図、第6図にはそれぞれ第1図、第3図、第5図に対応した従来のカルパンチェ自動オシロによる記録例を示した。

各記録例の波形要素 12 入力のうち1から4までは送電線 A の黒相、赤相、白相、零相の電流要素が接続されており、入力5から8までは母線各相の電圧要素が接続されている。更に、入力9と11には送電線 A、B の線間電圧要素、入力10には送電線 A の中性点 (NR) 電流要素、入力12には同じく送電線 A のペテルゼンコイル (PC) 電流要素がそれぞれ接続されている。

また、オンオフ要素 15 入力にはトリップ信号8要素と NR トリップ信号2要素が接続されている。

第1図の事故記録は、入力5の母線の黒相1線が雷によって地絡し、PCによって消弧成功した例である。この地絡発生初期、零相電流、黒相電圧などに約500 Hz の高調波電流を記録しているが、第2図では各相ともに見受けられない。また、PC による消弧の

過程で PC 電流は直流成分の影響を大きく受けて記録最大振幅 50 mm を超過しているにもかかわらず、第2図ではその状態が記録されていない。

第1図の記録例では、事故発生時の PC 電流の大きさと前もって設定した記録精度の換算値の関係で最大記録振幅以上の PC 電流となって先端が飽和しているが、事前の設定値から換算できるので実用上問題はない。ここでは、実際の系統事故現象波形を忠実に記録している具体例として示したものである。(なお、第2図の波形信号に工事段階で極性が逆になっている要素がある。)

第3図は2回線並行送電線が雷により回線間にまたがる黒相、赤相の異相地絡を生じたもので、送電線 A は高速度選択短絡継電器 (HSSR) により4サイクル後しゃ断し、これによって送電線 B は黒相1線地絡のみとなり、8サイクル後に自然消滅した例である。

第4図の対応する電流相、電圧相と比較すると、送電線 A のしゃ断後、黒相電圧、零相電圧、NR 電流に第3調波の電流ひずみが顕著に現われており、記録精度、記録応答周波数などが優れていることがわかる。

第5図は並行送電線のうち送電線 A が雷により3線地絡を生じた記録例である。電源変電所端では HSSR によって送電線 A を4サイクルでしゃ断したが、健全側の送電線 B は送電線 A と併用されていたため、一次変電所端では送電線 A を7サイクルでしゃ断するまで継続している例である。

第6図の従来のカルパンチェ自動オシロによる記録例と比較してみると、3線地絡発生時としゃ断時に各相電圧、零相電圧・電流などに高調波によるひずみが生じている状態がよく記録されている。

3. 本装置の記録方式

電子回路の集積技術の進歩は、記録出力方式の面においても大きな変革を起こす要因となっている。

すなわち、一般の記録計は従来のインク式ペンレコーダから日常の手間のかからない電氣的な手法によるインクレスレコーダへと発展してきており、最近では数百本の記録ペンを1ミリあたり数本の間隔で一直線に並べておき、そのマルチスタイラスの一本一本を電氣的なスキニング技術によってパルス的に選択し、波形とか画像などの入力信号を連続的な点のつながりとして記録できる方式も可能になってきた。

このような静止形記録ペンの使用により、従来の機械的な動きによる方式のレコーダ以上の応答周波数特性をもった記録装置が容易に実現できるようになった。

また、波形伝送、画像伝送などのファクシミリにおいても、このようなマルチスタイラスによる記録方式を取り入れる傾向にある。

本装置の記録方式は、上記のようなマルチスタイラス電気ペンを用いてデジタル出力に対応したサンプリング値を連続するドットのつながりとして記録する方式である。

第7図はこのデジタルサンプリングドット記録方式の説明であるが、連続的な入力信号を一定の周期でサンプリングすると入力信号の繰返し周波数が高くなるにつれて振幅方向のプロット間隔が大きくなる。

従って、記録する周波数が高くなればなるほど、かつ、振幅が大きいほどサンプリングドット記録の2点間の間隔が大きくなり、人間の目で見た上ではアナログ波形と比較してほど遠いものとなって波形らしさを失ってしまう。

このマルチスタイラス電気ペンによるドット記録を波形として見易く改善する方法としては、サンプリング周波数を高くする方法、電気的な論理回路操作で補間記録する方法などがあるが、本装置では信頼性、経済性、実用性などの点から論理回路による手法で、サンプリングドット記録の2点間を連続的なドットで補間記録する方式を開発した。

これは、具体的には第8図に示すように任意のサンプリング周期でドット記録される2点間をマルチスタイラス電気ペンの配列間隔で連続的につないでしまう方法である。

第8図は1ミリあたり2.5本のマルチスタイラス電気ペンとした場合の補間記録例であり、記録周波数がそれぞれ 50, 100, 200 Hz で、記録振幅が約 50 mm

第7図 波形入力周波数とサンプリング記録
Fig. 7. Explanatory drawing for the principle of the digital sampling dot recording system.

第8図 波形入力周波数とサンプリング補間記録
Fig. 8. Explanatory drawing for the principle, presented in this paper, in which the intervals left blank between two dots produced with a predetermined sampling frequency are filled with dots to be produced at closer intervals for the ultimate purpose to allow the series of dots to appear as if it is a continuous line.

第9図 サンプリング補間記録説明図
Fig. 9. Illustration of the sampling interpolation.

の大きさの波形入力を 1/2 に縮小して示してあり、大きいドットがサンプリング周期ごとの記録、小さいドットが補間記録をした状態を示したものである。

本方式をさらに詳細に第9図の例について説明すると、時間的に連続する任意の2サンプリングドット記録点 A , B の位置をデジタル量として、それぞれ特定のバッファメモリー M_A , M_B に記憶しておき、サンプリング周期の時間内で $|M_B - M_A|$ の論理計算をして、2点 A , B の振幅方向の差をマルチスタイラス電気ペンの数として求め、その数が A と B のサンプリング2点間の電気ペンの数であることをもとに、 A 点からプラス方向、あるいは A' 点の場合はマイナス方向の電気ペンにパルス信号を伝え連続的な

第 1 表 主な仕様

Table 1. Principal specification.

機能	項目	規格
波形入力 およびオ ンオフ入 力の場合	測定要素数	波形入力 12 チャンネル オンオフ入力 15 チャンネル
	入力負担	波形入力 1 入力あたり約 250mVA オンオフ入力 1 入力あたり約 10k Ω 負荷
	サンプリング 周波数および 応答周波数	サンプリング周波数 応答周波数 1,000Hz の場合 直流から 250Hz まで 2,000Hz の場合 直流から 500Hz まで 4,000Hz の場合 直流から 1,000Hz まで
	測定記録長	系統事故前 60ms から復帰後プリセット時間ま で連続記録ができる
	記録振幅	波形入力 最大 50mm オンオフ入力 1mm のオンオフレベル変化
	マーカ記録	記録紙上の上下両端に 10ms または 20ms ごと
記録部	マルチスタイ ラス電気ペン	512 マルチスタイラス (2.5 本/mm)
	記録紙	通電感熱記録紙
	記録色	黒
	記録紙長	約 40m
	記録紙幅	257 mm
	記録ドット濃 度	マクベス濃度計で 0.7 以上
時刻記録 および組 番号記録	時刻記録	系統事故が発生したときの“月、日、時、分”をキャラクタ 発生 IC 素子によって 7×9 ドット形式で自動記録。また、 記録装置の設置場所コード番号を組番号として、5 けたの数 字でドット記録
	組番号記録	
使用条件	温度	0℃～+40℃ (−10℃～+50℃ で動作保証)
	湿度	40%～85% (30%～90% で動作保証)
	電源	DC 110V $\pm$ 30% AC 100V $\pm$ 20% または AC 200V $\pm$ 20%
	消費電力	通常時 150VA 以内、動作時 450VA 以内
	耐雑音性	直接印加インパルス雑音 5,000V、放射雑音 5,000V、電源線インパルス重畳雑音 1,000 V の各環境雑音範囲で記録が正常であること
構造	高さ	2,300 mm (2 台実装可能)
	幅	700 mm
	奥行	450 mm

点のつながりとして補間記録をする方法である。

この場合、A と B のサンプリング 2 点間の電気ペンに順次与えるクロックパルス周波数 f_i は、サンプリング周波数を f_s とすると $f_i = (|M_B - M_A|) \times f_s$ となる。

このことは、(サンプリング 2 点間の電気ペンの数) $\times$ (サンプリング周波数) の繰返しクロックパルスをサンプリングのつど順次つくり、各サンプリングドット記録点 A と B の間の飛ばされた電気ペンに補間記録パルス信号を送ることを意味している。

このような記録方式により、サンプリングドット記録のプロット間隔の変動を入力波形の周波数に関係なくドットのつながりとして記録でき、また、文字、画

像などもドットの連続的なつながりとしてムラなく記録できる効果がある。

4. 装置の構成

本装置は、電気回路からなる処理記憶部とマルチスタイラス電気ペンからなる記録部とにより構成し、必要な機能と経済性、信頼性、保守性などを検討して第 1 表に示すような仕様とした。また、本装置の構成を第 10 図、記録部の外観図を第 11 図に示す。

動作の概要を説明すると、まずアナログ信号である波形入力は、サンプリング部でサンプリングされ、A/D 変換部によってディジタル変換されて一時遅延記憶部に送られる。この一時遅延記憶部は、事故発生以前の状態のデータを記憶するための機能と事故発生後起動信号の受信から記録紙送り速度が安定するまでの時間に相当するデータの一時遅延記憶機能を備えている。

分配部は一時遅延したディジタルデータを再び波形電圧値に変換するための論理演算機能と、各入力に対応したマルチスタイラス電気ペンの一本一本を高速で選択する機能、また、サンプリングドット波形記録を見易く改善するための補間記録機能を備えている。

第 10 図 装置の構成図

Fig. 10. Construction of the recorder presented in this paper.

第 11 図 記録部の外観図

Fig. 11. External view of the recorder presented in this paper.

第 12 図 マルチスタイラス電気ペン

Fig. 12. External view of the multistylus electric pen assembly.

る。

コントロール部は、外部からの記録開始起動信号を受けて、この信号により一時遅延記憶部、分配部などの連係動作の制御と記録部紙送りの起動、停止を行なう。

マルチスタイラス電気ペンは、多数の電気ペンを一列に配置したマルチスタイラス構成となっており、コパール (Fe-Ni-Co の合金) の板材を径 0.2mm で 1mm あたり 2.5 本の線密度になるようにエッチング加工処理して、合計 128 ペンからなる多針フレームユニットとした。更に、このユニット 4 個をフィルムリード、保持基板などで組み上げ合計 512 ペンからなるマルチスタイラス電気ペンとしている。その外観図を第 12 図に示す。

記録紙は通電によるジュール熱で発色する通電感熱記録紙を用いている。これまでの記録紙には放電記録紙、低電圧放電蒸着記録紙、紫外線感光記録紙などがあるが、本装置は人手を介さずに高速度で瞬時の事故現象を記録しなければならないという厳しい使用条件下で高い動作信頼性を保ち、かつ、一定の記録品質を維持しなければならないという点から通電感熱記録紙を用いた。

この記録紙は、記録カスの発生が少なく、かつ、記録濃度が低下しないように開発したものでマクベスの濃度計で平均 0.7 以上の記録濃度が得られている。

第 13 図に通電感熱記録紙の記録原理を示す。

5. 高信頼度設計

本装置は発電所という特殊な環境の中で、常時の待ち受け状態から突発的な電力系統事故発生時に確実に動作しなければならない。

そこで、本装置の設計では装置を構成するハードウェアの機能を失う致命度を解析して、ハードウェアの信頼性を高める一つの手法として活用されてきている

第 13 図 通電感熱記録紙の記録原理

Fig. 13. Explanatory drawing for the principle on which the electric current thermo-sensitive recording paper generates color thereon.

故障モード解析 (FMEA) を適用して進めた。すなわち、装置の機能を全く失う要因、装置の一部分が機能を失う要因、動作はするが性能を満足しなくなる要因といった故障モード解析の手順に基づいて致命度を分類し評価した。

その結果、発電所特有の雷や電力機器から直接的に電源線、信号線に混入するインパルス性雑音、空間からの放射雑音などの対策が明らかとなった。

具体的には、記録紙送り機構を除いて、すべて静止化し、そして、回路の信頼度対策では、電源入力線にラインフィルタ、サージアブゾーパの付加、論理回路基板にチョークコイル、雑音吸収素子の付加、また、外部からの各入力信号線にそれぞれインピーダンスマッチング素子と雑音吸収素子の付加、更に、筐体と回路アースの絶縁、直流電源の一次と二次間に静電しゃへいなどを取入れた。

なお、発電所の雑音環境と試験条件を同等にすることは非常に難しいが、将来試験方法をできるだけ確にすることをねらいとして、今回は次のような方法で試験を行なった。

まず、直接インパルス雑音印加試験は、筐体を大地に接地した場合、筐体を大地から離れた場合、インパルス誘導線を筐体に 3 回巻きつけた場合、装置の論理回路部分のみに誘導線を巻きつけた場合、入力電源線に誘導線を巻きつけた場合について、本装置が誤動作を開始する限界のインパルス電圧値を実測した。

その結果、それぞれ多少の差異はあったが、各試験条件で $1 \times 40 \mu\text{s}$ 10,000 V のインパルス電圧まで安定動作することを確認した。

次いで、電源線にサージ性雑音を重じょうさせる試験では、試験装置が発生できる最高のインパルス電圧 1,000 V においても誤動作しないことを確認した。

また、放射雑音印加試験については、その方法と結果を第 14 図に示す。図の斜線部分は、放射雑音試験

第 14 図 放射雑音印加試験とその結果

Fig. 14. Method and results of the radiation noise application test.

の結果に基づいて制御回路とクロック回路の入出力信号線にパソコン対策を実施して改善した部分である。

6. あとがき

ここに紹介した本装置は、紙送り機構を除いてすべて静止化していること、信号処理をデジタル化していること、サンプリング2点間を連続的にドット接続する補間記録をとり入れていること、高速記録ができる記録濃度の高い通電感熱記録紙を採用していることなどに特長があり、機能的には、波形入力最大 12 要素、オンオフ入力最大 15 要素と多くの入力要素が系統事故発生月日時分などの文字記録を含めて、257 mm 幅の連続記録紙に記録できるようになっている。

このマルチスタイラス電気ペンを用いた全デジタル方式の電力系統事故時の波形記録装置を試作し、工場において模擬試験、環境試験などを行ない、更に、変電所での実証試験を行ない貴重な成果を得ることが

できた。

すなわち、マルチスタイラス電気ペンによる新しいドット記録方式の実用性が、その高い動作信頼度と忠実度の高い記録品質で実証できた。

記録紙には、変電所での実際の事故波形記録例で示したように、直流分から第 10 調波成分まで明らかに記録されており、今後の事故解析の質の向上、電力系統保護システムの信頼性の向上、電力の安定供給の確保などに大いに役立つものと考ええる。

また、本装置は高調波成分の波形を見易くするために最大 1,000 mm/s の記録紙送り速度にすることが可能であり、更に、本装置は信号処理部と記録部とが分離でき、信号処理部のデジタル出力部に伝送装置を接続して遠方に伝送する機能を付加することができる。従って、通信ケーブル、マイクロ波伝送などの伝送路を用いて複数箇所からの電流・電圧波形を 1 箇所集中記録するシステムの構成も可能である。

終りに当り本装置の研究開発において終始ご指導ごべんたつをいただきました東京電力(株)顧問 高木利夫氏、同理事技術開発研究所所長 三井恒夫氏をはじめ関係者の皆様に厚くお礼を申し上げます。また、松下電器産業(株)専務取締役技術本部長 城阪俊吉氏、技術本部室長 福田雅太郎氏、同電子機器研究所所長 伊賀和夫氏をはじめ関係者の皆様、そして、松下通信工業(株)取締役データ制御事業部長 河原 滋氏、同研究開発部部長 吉田登美男氏をはじめ関係者の皆様に厚くお礼を申し上げます。

(昭和 54 年 2 月 1 日受付, 同 54 年 9 月 25 日再受付)