

一般家庭と工業地域の屋内配線に発生するサージ電圧

(IEEE TRANSCATION ON POWER APPARATUS AND SYSTEM、VOL PAS—89、NO. 6 JULY
1970)

-----全訳完了 (P. 1054 Possible Further Analysis 11行は除く) 2002年4月10日

概要

一般家庭と工業地域の屋内配線に発生するサージ電圧の大きさと周波数をモニターするため、特別な測定器を開発した。2年間以上、20都市400箇所以上で測定した。モニターは、自動記録型オシロスコープと簡単なサージカウンターによって達成された。家庭では、二つの特徴的なサージ電圧の発生源が判明した。それは、家庭内の負荷の開閉と外雷である。外雷で最も多いのは、変電所を通過してくる誘導雷である。工業地域のサージ電圧は、家庭のサージ電圧より低い。けれども、開閉器の負荷側のサージ電圧は、影響大である。今回の測定期間中、屋内で発生するおよそ2500Vのサージ電圧が観測され、かつ120Vの配電回路に重畠された雷による5600Vのサージ電圧が記録された。

導入部分

装置やコンシューマ電気機器に使用される半導体や新しい絶縁システムの拡大は、120Vの電源に発生する過渡的過電圧による影響を受けやすくなってしまった。これらのサージ電圧への感知や対策は、設計者に適切な公差を作りこませたり、少なくとも適切な抑制や保護の必要性があることを認識させた。

特別な測定器によっては、サージ電圧の検知と測定を可能にした。測定の最初の段階では、自動記録型オシロスコープによりランダムに選んだ測定場所で発生する波形・大きさ・周波数の完全な情報を得た。これらのデータは、統計的には制限されているとは言え、問題の存在を立証し、ある発生源を見つけ、典型的な波形を示す事となった。そのことによって、より統計的に妥当な幅広いデータの必要性が明確になってきた。測定の第二段階では、設計が簡単で設置が容易な100個のサージカウンターをこのプログラムのために開発した。これらのカウンターを、USAの東地域と中西部に位置するたくさんの都市の家に設置した。

この論文の目的は、このプログラムの第二段階で得られた記録とその結果の統計的な見解を議論することである。この論文の発行により、他の研究者たちが研究報告の発行を編集できることを希望したい。この論文は、サージ電圧の周波数と大きさの立証の幅広い統計的な基礎を提供することである。工業地域の屋内配線に関しては、数少ないデータである。しかし、たくさんの意義深いケースを経験しており、その地域で容易に遭遇する問題を扱っている。

測定器

市場でサージ電圧を記録することは、特別の課題を提示する。たとえば、測定器は連続的に測定の待機ができなかつたり、発生する（サージ）の大きさ・極性・周波数に予測不可能であつたりする。

テクトロニクスと共同で TYPE 515CRO をフィルムに過渡的電圧を記録し、記録後は自動的にフィルムを進ませるように改造した。

改造は、すべての（オシロスコープ）ノブを取り去るくらいであり、トリガーと掃引回路の改造を含んでいる。

大体のオシロスコープのトリガー回路は、極性を持っている。このことで、最初の信号の極性が判明しない時、かなりの頻度で多くの記録するチャンスを逃してしまう。

サージの記録のため、トリガー回路を基本のトリガーに時間を与えるように改造した。オシロスコープの遅延回路の入力にこの改造により、信号が CRT の陰極管の進路板に到達する前に遅延させ、その間に、掃引はそれぞれの極性に対応した。加えて、ブランкиング回路がビームを保持する。

第二段階の改造は、掃引を一定のスピードから対数的なスピードに変更すること、つまり、スタートは素早くエンドの方は、スロウにすることであった。これは、インパルスの始め（波形）を良い条件で記録することになり、掃引の十分な期間を与えることになるので、長い波尾長を記録できることになる。

最後は、ビーム掃引が作動した時はいつもそのコイルが作動するようなリレーを追加した。このリレーの接点をどうし、カメラのフィルムを連続的に進ませる機能が作動する。

（オシロスコープの）窓枠の斜面に取り付けたカメラは、Beattie-Coleman システムであり、35mのフィルムを100フィート保有し、シャッターが無く、CRT に写しだされた 24 mm * 36 mm の画像形跡を記録する。掃引に続き、数秒間で次の新しいこまにフィルムを送ったら、上記で述べた接点は、モータ回路を閉じる。このフィルムの移動間隔は、掃引がフィルムの送られる間に発生しないよう防ぎ、そのようにオシロスコープのトリガー回路は調整されている。

（ぼんやりした不完全なビーム、カソードの光、光の漏れによって引き起こされる）不確かな輝きに感光体が曝され、フィルムがだめになるのを防ぐため、オシロスコープに組み込んだタイマーが、その都度フィルムのこまを進ませる。サージ電圧の調査が成されるにつれ、現象を自動的に記録することは、現象ごとの異なる正確な時間の記録を得ることに助けになった。

Fig 1 にこのオシロスコープのカメラシステムを示す。比較的高価なこのシステム、家庭で

は（大きさ、カメラの音等）目立つ存在、そしてこまごとに詳しく調査すべく大量のフィルムは、記録すべき場所の数を制限する事となる。けれども、妥当な統計的な考えに基づく結論として、多数の場所の調査が必要である。協力してくれる家のオーナに受け入れてもらうため、過電圧の検知装置は、設置がやさしく、そしてデータのハンドリングが簡単である。このように、コンセントに接続する装置そして限度値以上のサージの発生を捉えるデジタルカウンターは、広く記録する目的には十分である。

Fig2 に示す回路は、この目的のために開発された。この装置は、特別なプローブなしで、延長コードでコンセントに接続する。この接続は簡単で、特別のコンセントに接続された個々の装置に浸入する最終の代表的なサージを確認し、高インピーダンスの整流回路とトリガーセンサー回路の入力信号の電力を供給する。

シリコン対称スイッチ (SSS) に印加される前に、補償分圧回路が進入サージを鈍らせる。この抵抗分圧器 (*Fig1 の $120\text{ k}\Omega$ 、 $12\text{ k}\Omega$ および 250 pF 、 $0.01\mu\text{F}$ の回路) は、例えば、 250 V のように、回路を通過する電圧が限度値に到達した時はいつでも瞬時にターンオンする特質の部品である。この限度値は $0.1\mu\text{s}$ の短さの時間を保つようになっている。SSS がターンオンしたら、鈍ったサージが非常に敏感な速断シリコン制御スイッチ (SCS) のゲートをオンする。このサージが正極性であれば、SCS がターンオンし、ソレノイドカウンターのコイルをとうし $50\mu\text{F}$ のコンデンサーで放電される。高インピーダンス抵抗分圧器 (*Fig 2 の 68Ω 、 68Ω) と半波整流器で、 $50\mu\text{F}$ のコンデンサーを 15 V の電源の細電充電 (*トリクル充電) を行う。この回路の抵抗は家屋の配電システムの負荷に対し無視できる存在であり、コンデンサーを充電する電流には十分な値である。検知される過電圧は高い確率で繰り返されるわけではないので、数秒のコンデンサーの充電時間は問題にならない。

回路の校正是回路素子のボリュームを調整して行われる。このテストの場合、しきい値の水準に関しカウンターの一つのグループは、 1200 V にセットし、他のグループは 2000 V にした。調整済みの電圧水準と時間のサージが $60\text{ Hz} \cdot 120\text{ V}$ の電源ラインに重畠出来るように、測定水準回路を調整した。 60 Hz の電源からサージを隔離、あるいはフィルターオトする必要性から、ある工夫が採用された；けれども、この場合、 1200 V としての最小の水準をもち、基本の 170 V の波高値が、----を代表しかつ回路内の検知信号に含まれる。(?)

おおよそ頂上がフラットで、時間が数 μs から $0.2\mu\text{s}$ までを持つサージは、サージの持続時間の機能として、さまざまな電圧限度値を決定するのに適用される。代表的なレスポンスカープを Fig 5 に示す。このカウンターが示す波高値の応答性は、十分に考慮されるべきである。なぜなら、一般家庭のオシロスコープの記録は、後に議論されるであろうが、振動性のサージの最も短い半波形は、 $2\mu\text{s}$ のオーダであるから。

測定手順

最初の段階では、オシロスコープはニューヨーク Schenectady 地区の家の入り口の地下室に備えられている配電盤に設置した。これらの場所は、統計学者の考えのサンプリングを代表するものではない。しかし、このプログラムの最初の期間中は、統計的な精度より、過渡的過電圧の特徴が関心事の大きな課題であった。プログラムの後になって、測定場所の範囲は、フロリダと南カロライナの他の都会と田舎の家に拡大された。

第二段階で、サーボカウンターを北東と中西部の 20 都市に住んでいる技術者の家の中の普通のコンセントに設置した。二つの明確な記録期間が、計画された。冬：一年のその期間は、雷の活動は通常は最小である。夏、それは、普通、雷の活動が最大である。オシロスコープの入力回路は、数ボルトのレベルで作動するので、たとえプローブから信号が入らなくても、アンプ回路内において直接的な電気的ノイズの放射で感知するくらい敏感である。この種の偽の信号に対して（プローブからの信号と）区別するため、グランドループで偽の信号をはじくように接続された接地端子にをもち、オシロスコープのプローブを短くした。この方法によって、システムに入ってくるどんなノイズも記録され、プローブから離れたショート回路で成された記録の分析で、それが何であるかを後に認識された。

サーボカウンターは一つの極のみを記録する；家主が保管するデータを最小にするため、コードの接続は、極性を持たせなかった。振動サーボ（振動サーボは、このシステムの中では素早く収束してしまう）のエベントのでは、二つの数え方が起こりうる。例えば、分配回路の HIGH の側を Fig-5 のようにリセプタクルの HOT の端子に接続することができる。最初の半サイクルがプラスで 1200V を超えていたら、一つと数える。最初の半サイクルがマイナスで、二番目がプラスの半波形で収束していたら（1200V を超えていないなら）、一つと数えない。最初の半波形が 1200V を十分超え、二番目の波形が収束していくても 1200V に到達していれば、一つと数える。このように 1200V を超えた両方の極性のサーボ発生の実際の数は、カウンタによって示された回数かその 2 倍の間である。この一連の測定を記録する目的は、サーボの正しい数よりむしろサーボが発生するか否かを決定することである。結論は、数の要素の評価は、あまり意味がない。

記録の分析

オシロスコープ

最初の記録の分析は、ある家がしばしばサーボ電圧に見舞われ、ある家では数少ない内雷のみであり、他方ではトリガーレベルが 300v から 400v 以上のサーボを経験していなかっ

た。なお、サージがしばしば発生する設置場所では、ある家のサージは比較的低く（稀に 800v を超える）、一方他の家では 1200v から 2500v のレンジのサージであった。サージ発生の確率は、一時間当たり 0 から 0.5% の幅であり（1 週間から 2 週間換算で 0）で、その波高値は 300v から 5600v であった。

記録のプログラムの結論として、2 個所の架空配線の電柱を含む合計 30 箇所の場所で、計約一万時間測定された。表 1 が、21 箇所の測定分析の詳細をしめす。3 箇所の家と 6 箇所の工場では、400v 以下のしきい値を持つトリガーは無かった。

更にある記録の分析は、頻繁なサージが観測される家では、故意の負荷の切り替えで起こることが判明した。ある場合には、特別の装置（例えば、ボイラー、蛍光灯、ポンプモータ、冷蔵庫、ミキサー）の操作が、サージの発生源として発見された。測定を継続していない期間に、故意の負荷の切り替えにより記録すべきサージがあったと言うわけではない。家主は、サージを記録することと雷や電源システムの乱れを時々関連づけることができたのである。

この全ての情報で明らかになったパターンは、家においては、サージ電圧の 2 つの明らかな発生源を示している；家においては、負荷の切り替えと雷である。

負荷の切り替え：家での負荷の切り替えは時々過渡的サージを引き起こす；特別の家のみで起こる。何軒かの特別の家では、これらの過渡的サージは、フィルムに記録された（サージ）振幅のさまざまな一定の繰り返し波形であった。これは、たぶんスイッチの特性と家屋配線システムのコンビネーションの結果である；さまざまな振幅は、さまざまなスイッチの切り替え時の位相角度とあるいは接続された負荷の結果である。工場の配線では、特別のパターンの同じ繰り返しが、「1 * 他の論文」に記述されている。記録された典型的な波形は、Fig6 から 8 に示す。

一つのケースの場合であるが、1700v 以上のサージが記録された近辺の家の中にオシロスコープを設置することは可能であった。その家の受電設備は、同じ柱上変圧器に接続されていたけれども、第二番目の家では、同時に発生するサージは、観測されなかった。

雷：家屋の中の負荷切り替えとは無関係なサージ電圧は、雷の時と関連性があった。ある場合では、家のオーナーがフィルムのこまを雷の数と関連付けて進ませることができた。二つの異なる場所で雷があった間に記録され、Fig9 と Fig10 に示したサージは、300Hz の幅の周波数で振動する興味深い特徴を顕在化した。Fig9 に示すサージは、架空配線の配電線で記録されたものであり、一方 Fig10 は家屋の中の受電設備で記録された。Fig9 は、Fig10 よりはるかに波形の減衰が小さい；この減衰は、家の受電設備の終端より電柱における配線のインピーダンスが小さいことによると説明できるであろう。この両方のサージは、雷の間に記録された他の多くのサージと同じように、特別な地域性によるほとんど一定である周波数の振動する特徴を示す。この一定性は、システムの振動性は雷によって引き起こされる励起現象であると推定される。たくさんの 800v から 1200v のサージ電圧は、雷の間に観測された。最大のサージ電圧は、5600v である；同時期に観測された他のサージ電圧は、「2 * 他の論文」に示すように 4000v 以上である。

カウンター

オシロスコープの測定で示された過渡電圧の二つの要因に関し、サージカウンターを、二つのプログラムに分類して測定した。最初は、冬であり、カウンターは、1、2週間の間、たくさんの家に設置した；目的は、いくつぐらいの家にサージが保持されるかを決定するためであった。二番目は、春、夏、そして秋の期間、それぞれカウンターを9週間から48週間の間、一箇所か2箇所に設置した；これらの家では、負荷によるサージが無いことが最初のテストで判明した。目的は、外部で発生するサージ、つまり雷による周期や特徴を決定することであった。

最初の期間は、Table 2に示すデータであり、二番目の期間に得られた結果は、Table 3に示す。

記録の統計的分析

内部発生のサージ (*家屋内のサージ；いわゆる内雷)

表IIのデータは、選ばれた計250の家のうち、6あるいは2.4%の家屋が繰り返しサージに曝されたことを示している。真のパーセントの値は、まぎれも無く統計的変動値により2.4%と少し相違する。

けれども、一つには、真の値は1.0から4.7%の間であることは90%の信頼性があると言える。この幅は、追加のサンプルで狭められることが出来る。けれども、正確さはサンプルの大きさの \sqrt{N} に比例することが知られている。このように、サンプルの数の4倍あるいは1000軒が、約1.5の統計的誤差の幅を小さくするのに必要な数である。以上の結果は、統計的変動値のみに關係するので、サンプルのメンバーの選択(たくさんの選ばれた場所の主要な技術者)や期間(冬)の制限的な要素による偏向を考慮してはいない。

内雷の可能性は、経済的なグルーピング(例えば、家で使用する装置は、居住者の経済的な立場で変化する)によることは疑問の余地がない；けれども、サージを発生する装置として大体の家では、ボイラーや冷蔵庫は、よく見られる。

試験の第二段階の結果は外雷に關係したもので表IIIに示す。14ヶ所の地域内で計91の家屋に設置された39のカウンターから、846週の間に6箇所の場所で発生した合計8事象が観察された。9番目の発生事象は、この分析から除いた。なぜなら、それは、同じ雷の時間帯に同じ家で発生した事象である。同じ場所で得られた発生現象の二つの組み合わせの一つは、同じ雷の時間帯で発生し、かつ第二番目は、異なる時間の二つの発生事象を含んでいた。

分析は、次の二つの考え方をベースに導かれた。

1) 1200V以上のサージ電圧はカウンターが家に設置され、ある年の特定の期間のみに発生する。このように、カウンターが年月のある部分のみ家屋に設置されたけれども、例えば夏の月を含む期間は、たとえカウンターが連続的に52週の間測定したとしても、サージが記録

できないように選択されたわけではなかった。一年あたりのサージ回数の平均は、39分の8、あるいは0.205と見積もることができた。この数字は、90%の確率をもって0.102から0.370と言える。

2) サージ電圧は、一年を通じ継続的な割合でランダムに発生する。9週使用したカウンターは、平均で、27週の期間使用するカウンターと同じ数値のサージの3分の一であった。この考えによれば、16年間(846週)と同等の期間内に合計8回のサージが観測され、一年当たり予想で平均0.5回である。0.5は、0.25から0.90の幅があり、90%の信頼性を持つ。

これら二つの外雷の考え方を用いることで、一年当たりのサージの数を予想するため、ある幅が確立された。この手順の計算は、単極性のサージの数のみに関連する。もし全てのサージを考慮するなら、与えられた数値を1200V以上の逆極性サージの割合に一致した数値で掛け算しなければならない。これは、1200V以上の正極性サージの結果だけではないということである。

誘導雷は、記録した一つの家よりたくさんの家に影響を与えやすい。地域的な条件は、厳密にはこれらのサージに影響を与えていている；しかし、これらの要素は、予備的な調査では、配慮されることは無かった。

前述したデータと装置の故障を関連づけるため、与えられた数値は、1200V以上のサージが動作している装置の故障を引き起こす可能性により、変更された。故障の要因は、いろいろな装置で変化するであろう。

電気部品のサージ電圧による影響

このプログラムで記録されたサージ電圧は、サージ電圧発生時の負荷状況の情報を持ち合わせていない状況下で、家屋の通常操作の間に発生した。サージ電圧に含まれるエネルギーの問題は、これらのデータは電圧のみを提示するので、システムのインピーダンスに関係することである。家屋内における配電線のサージインピーダンスの測定値は、代表的な回路では100Ωから300Ωの値を示し、配電盤でのサージインピーダンスは、5Ωから10Ωの値である。けれども、この低い値は、(たとえばほんのμ秒) サージが移動する時間のみ存在する。接続された負荷は、配電線のインピーダンスより低いインピーダンスであろう。この値は、誘導性部品があるときはいつでも周波数に依存し、誘導性負荷は、サージのエネルギーの一部分を吸収しそしてピーク電圧を低下させる。

モータや変圧器のような電気部品は、しっかりした絶縁構成であり、その性能は、疑問の余地がなく、永い実績を持っている。多分、まれな故障は、このデータで示されたサージ電圧を超えた場合であると説明できる。

配線工事の手違いにより(例えば、絶縁物の挟み込み、コンセントボックス内の空間距離不足など)、60Hzの電源のラインとのフラッシュオーバーを引き起こすだろう。実際、ある家屋では、照明装置の固定部分でのスパークの申し立てがあり、注意をせざるを得なかつた。接地線と接地パイプに固定されたフレームの切り替え部分で、家屋のオイルバーナの始動との相関を持って、1700Vのフラッシュオーバーが観測された。この照明設備の欠陥により、家屋の中

で電圧の絶縁距離の限界として、発生した。

半導体部品で構成され、かつライン間の過電圧に直接さらされる製品は、壊れやすい。実際、1200vの（＊カウンタの作動の）始動水準は、この考え方の結果として選択されたのである。興味深いことに、たくさんの2000v以上のサージは、オシロスコープでは記録されたが、1200vではなく2000vに校正された何個かのサージカウンタでは、2000v以上の記録をとりことが出来なかった。

時計のモータの故障を別件で研究したこと、絶縁の水準に対する故障の確率に関する情報を得た。この研究は、何千個の時計を同時に電源ラインに接続してので、サージカウンタープログラムに対し非常に適切であった。3年間以上に渡り、故障の確率がコイルの絶縁の水準に関係したのである。絶縁破壊する確率が100個のうち1個に下がった意味は、絶縁耐圧を約2000vから約6000vに上げた結果と言える。このことは、2000vのカウンタでは、2000v以上の記録は無かったが、実際は2000v上のサージがあった事を示している。

工業地域の場合の経過

著者たちは、サージが装置のトラブルの原因と予想されるたくさんの調査に携わった。工業地域では、個別のケースは、居住地域の配電線より注意を払う傾向にあった。この論文で簡潔に纏められた2つか3つのケースの話は、遭遇した典型的な問題を示している。そこでは、サージが実際はトラブルの原因ではないときもあった。測定場所に、測定者がいることで、トラブルの検証をより進ませ、また時々思わず事実を示すこともある。

これらの検証の場合に、サージカウンターがその装置に（検証と）同じ時に設置され、可能な時は何時でも、数週間あるいは数ヶ月其の場所に継続設置された。今まででは、15の地域で1200v以上のサージは、240vあるいは480vの幹線（Buses）には記録されなかつた。他方、過酷なサージは時々スイッチの負荷側で記録された。けれども、これらの負荷側のサージはサブシステムの動作に関連しており、サブシステムの設計者や操作者によりコントロールできる。しかし、家屋、ビル、工場の全てのユーザに影響を与え、かつほとんどコントロール出来ない幹線のサージと負荷側のサージとは、対照的である。

トラブル

鉄骨溶接工場の480v配電システムの時々起こるフラッシュオーバ

予想：溶接工程に関連するスイッチングサージ

検証：幹線配線にサージ記録のオシロスコープの設置

結果：サージの記録なし。

第二段階の調査：力率改善コンデンサーを幹線に配置したけれども、このことは、最初の調査の議論により明らかにされていなかつた；幹線のこの存在（コンデンサー）は、特に幹線のサージの可能性を除くものではない。最終的な結論は、汚染された空気による絶縁の汚れであった。

トラブル

モータ制御システムの480vの可飽和リクトルに関する故障

予想：リレーの動作に関連するスイッチングサージ

検証：リレーの故意にあるいは制御されたスイッチングの期間、サージの記録。

結果：リレーの接点の跳ね返り振動による巻き線上でのたくさんの急峻なサージ ($0.1 \mu s$)、これは、しばしば、過度の繰り返しのストレスを発生させる。

トラブル

力率改善用コンデンサーバンクのフェーズ時々起こる切れ

予想：スッitchingサージ

検証：切り替え動作の間でのフェーズに流れる電流とシステムの電圧の記録

結果：リレーのチャタリングがフェーズの溶断特性を超えるたくさんのサージ電流を発生させる。

トラブル

工業装置のランプバラストの故障

予想：スッitchingサージ

検証：オシロスコープの設置

結果：数週間の測定の結果、サージなし。その後問題なし。

結論：最適のサージ対策部品がサージのモニターだった。

結論

1) 居住地域の電力配電線は二つの明確な原因によるサージ電圧に曝される。家屋内の負荷の切り替えによるスイッチングであり、雷と最も関連する外雷である。

2) 負荷のスイッチングで発生する内雷は、繰り返し性がある。それらは、一般的に特別の装置と関連し、たぶん、不安定な動作や配線システムのある自然な繰り返しを起こす。それらは、雷あるいは設備からの配線とは無関係である。 2500v のピーク値が観察された。最適な統計的見込みであるが、サンプリングされた家屋の2.4%は、 1200v 以上の繰り返し内雷を経験したことを示す。けれども、サンプル内の統計的偏差値により、この値は、1%から4.7%かも知れない。サージは、一日に数回繰り返される。

3) 雷によって発生するサージの頻度は、家屋の電気製品には影響されず、地域的な条件に影響される。この測定プログラムの限られたデータは、 3000v 以上で時には 5600v に達する数回の雷によるサージ発生を明らかにしている。

4) 別件の事実は、 2000v 以上の重要なたくさんのサージが、居住地域の電力線の中で定期的に発生することを示している。

5) 工業地域の配電線は、電力幹線でのサージに曝されにくい。けれども、サブシステムのスッitchingサージは、スイッチ部分で発生し負荷に影響を及ぼす。