ガス絶縁機器の急峻波サージ測定用 容量分圧センサの開発

正員 八 島 政 史 (電中研)

正員 藤 波 秀 雄 (電中研)

正員 宅 間 董 (電中研)

Capacitive Voltage Sensor for Measuring Very Fast Transient Overvoltages in GIS

Masafumi Yashima, Member, Hideo Fujinami, Member, Tadasu Takuma, Member
(Central Research Institute of Electric Power Industry)

A reliable technique is needed for accurate measurement of very fast transient overvoltages such as disconnecter-induced surges occurring in GIS which have very steep front and high frequency oscillation. Recently, capacitive voltage sensors with very short response times have been proposed for this purpose. However, few studies have been made on the dielectric properties of materials used for a low-voltage-side capacitor, as well as frequency bandwidth of the measuring system.

In the present work, we propose a thin mica plate for a low-voltage-side capacitor which has a surface coated with silver on both sides. This material has been shown to have stable and high static capacitance up to a high frequency range. We also give a quantitative estimate for the frequency bandwidth of the measuring system. Furthermore, we have developed a practical-scale sensor of this type which can successfully measure simulated disconnecter-induced surges of several hundred kV under similar conditions in GIS.

キーワード：ガス絶縁機器，急峻波サージ，測定，センサ，分圧器

1. まえがき

ガス絶縁開閉装置（GIS）に代表されるガス絶縁機器の基本構造は，中心導体の直径が比較的大きい同軸円筒で，サージインピーダンスが小さい。そのため，雷サージの侵入や遮断アークの発生に伴って主回路を高速で伝搬する進行波は減衰が小さい。また，GISでは各種構成機器がコンパクトに配置され，サージインピーダンスの不連続点の間隔が小さいため，進行波は多数回の反射を繰り返す，それらが相互に重畳された複雑なサージ電圧がGISの各所に発生する。

GISの過電圧の中で最も急峻なサージ電圧は断路器サージと考えられており，その電圧立上り時間は数ns～数10ns，電圧振動周波数は数MHz～数10MHzと評価されている⁽¹⁾⁽²⁾。近年，断路器サージはGISの絶縁レベルの低減によるコンパクト化推進のなかで，雷サージに次ぐ過電圧として注目されており，各種条件で絶縁特性が検討されている^{(3)～(6)}。そのなかで断路器サージの測定手法も重要な課題となっている。

GISにおける急峻波サージ電圧を非接触で測定できるセンサとして，静電容量結合を利用した各種の容量分圧センサが提案されている^{(7)～(13)}。これらはセンサヘッドとなる浮遊電極とその対地容量（低電圧側容量）で構成され，浮遊電極と中心導体との間のガス空間を高電圧側容量として利用するため，応答時間が極めて短いという特長を有する。また，GISの接地タンク（シース）側にセンサを収納するスペースや開口部を設け，シース内面と同一面上に浮遊電極を配置すれば，内部の電界分布に与える影響が小さい上，センサ自体の絶縁問題を考慮する必要もない。このように，容量分圧センサはGISの急峻波サージ電圧の測定器として理想的である。しかし，低電圧側容量に使用される高分子フィルムなどの周波数特性について検討した例は少なく，適切な材料の選定や測定系全体の周波数帯域など，なお検討すべき点がある。

本論文では低電圧側容量に適する材料として，銀を焼付けたマイカ板を提案するとともに，測定系の入力インピーダンスの条件と周波数帯域について評価した。さらに，実規模の容量分圧センサを試作し，数100kVの模擬断路器

クス7104で、垂直軸増幅器には7A29（入力インピーダンス 50Ω 、周波数帯域1GHz）または7A26（同 $1M\Omega$ 、200MHz）を使用した。

応答波形の特徴として次の2通りが考えられる。

（1）Rが小さいか、または印加電圧の周波数が低い場合：図3の等価回路は C_1 とRの直列回路となり、出力は印加電圧の微分波形となる。

（2）Rが大きいか、または印加電圧の周波数が高い場合：図3の等価回路は C_1 と C_2 の直列回路となり、出力は印加電圧に比例する。

図3の等価回路の低域遮断周波数は次式となる。

$$f_c = \frac{1}{2\pi R(C_1 + C_2)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式で例えば $R = 50\Omega$ 、 $C_1 = 0.22\text{pF}$ 、 $C_2 = 1\text{nF}$ とすると f_c は約3MHzとなり、急峻波サージ電圧の立上り部分は測定できても、雷インパルスの波尾など、電圧変化のゆるやかな部分は測定できない。したがって、周波数帯域の下限を下げるにはRか C_2 を大きくする必要がある。

図3 測定系の等価回路

Fig. 3. Equivalent circuit of the measuring system.

3. ステップ電圧に対する応答特性

<3・1> 容量分圧センサへの入力波形 同軸円筒モデルの中心導体に入力される電圧波形を把握するため、入力端に分岐を設けオシロスコープ（入力インピーダンス 50Ω ）により直接測定した。結果を図4に示す。電圧立上り時間（全振幅の10%から90%まで立上るのに要する時間）は0.65nsで、断路器サージの電圧立上りを模擬するのに充分急峻である（同図(a)）。また、同軸円筒モデルの開放端で正反射された反射波が約20ns後に重畳されて、階段状の波形になることも明確に観測できた（同図(b)）。図4(c)は同一の条件に対して、EMTPで応答波形を解析した結果で、実測値と良く一致している。容量分圧センサが設置される場所は上記の入力端から約1.2m離れているので、センサに入力される電圧波形は図4とは異なる。これを他の方法で測定することは困難であるので、EMTPによる解析で図5の波形を得た。なお、図4(c)、図5の解析例では、パルス発生器を電流源として扱い、波高値20mAのステップ電流を発生させている。

<3・2> 容量分圧センサの応答波形 表1に示した7種類の低電圧側容量材料のうち、PTFE（No.1）、25 μm 厚PET（No.3）、マイカ（No.5）に対する応答波形の測定例を図6に示す。同軸円筒モデルに入力したステップ電圧の第1波の波高値は321V、パルス幅は $1.0\mu\text{s}$ 、オ

(a) 電圧立上り部分（時間軸：1ns/div）

(b) 波頭部分（時間軸：10ns/div）

(c) EMTPによる解析波形

図4 同軸円筒モデル入力端でのステップ電圧波形
Fig. 4. Step voltage waveform on the input terminal of the co-axial model.

図5 容量分圧センサへの入力電圧波形
Fig. 5. Input voltage waveform at the capacitive voltage sensor.

シロスコープの入力インピーダンスは50Ω（周波数帯域：1GHz）である。

応答波形は各材料によって大いに異なり、静電容量が小さい場合、もとの電圧波形の微分成分しか得られないが、静電容量が大きくなるにつれてステップ電圧の平坦な部分も現れるようになる。応答波形の立上り時間はいずれの材料とも0.65nsと変わりがなく、入力電圧の立上りをそのまま測定できた。

表1の各材料に対し、分圧比の実測値と、ステップ電圧の平坦な部分が減衰する時定数（ピーク値の1/eになる時間）を読み取り、表2に示す。減衰時定数は周波数帯域の下限を評価する数値である。また、EMTPによる解析か

ら計算したこれらの値も併記した。この結果によれば、低電圧側容量の静電容量が大きくなるにつれて分圧比が大きくなり、減衰時定数は長くなる傾向が判る。しかし、表1のNo.1～No.4は減衰時定数が数10ns以下であるので、使用不可能である。また、No.7は静電容量の実測値が最大であるにもかかわらず、分圧比と減衰時定数は静電容量が1nFの材料と大差ない。この点については次節で考察する。

表2 ステップ電圧印加時の分圧比と減衰時定数
Table 2. Voltage dividing ratio and decay time constant of measured voltage in step response.

No.	低電圧側容量材料 (厚さ)	ステップ電圧印加時の 分圧比		同 減衰時定数 [ns]	
		実測値	計算値	実測値	計算値
1	PTFE (1.0mm)	1/140	1/160	1.1	1.2
2	PI (50μm)	1/2100	1/2170	20	20
3	PET (25μm)	1/3900	1/3870	31	37
4	PET (5.5μm)	1/7700	1/7810	49	78
5	マイカ (40μm)	1/14600	1/13200	99	135
6	PET (12μm)	1/15500	1/15500	101	160
7	PET (5μm)	1/4900	1/31000	13	325

(a) 低電圧側容量材料：PTFE

(b) 同：PET (25μm)

(c) 同：マイカ

図6 容量分圧センサのステップ電圧に対する応答波形（時間軸：10ns/div）

Fig. 6. Step response of the capacitive voltage sensor.

4. 考 察

<4・1> 低電圧側容量の周波数特性 容量分圧センサの分圧比が広い周波数帯域にわたって一定であるためには、低電圧側容量が一定であることが前提となる。そこで、表1の7種類の材料に対して、静電容量の周波数特性を広帯域インピーダンスアナライザ（YHP 4192A, 5Hz～13MHz）により実測した。容量分圧センサのBNCコネクタ端を測定点とし、数MHz付近の静電容量の測定が主目的なので、リード線のインダクタンスや容量分の補償（校正）は3MHzで行った。

測定結果を図7に示す。各材料ともおおむね1kHz以下の低周波領域では、静電容量がほぼ一定なので、それぞれこの領域の値で規格化して表示した。同図より、マイカおよびPTFEの静電容量は周波数依存性が小さく、10MHzまでの領域で静電容量の変化は3%以下である。一方、低周波領域での静電容量が最大であるアルミ両面蒸着の5μm厚PET（No.7）は100kHz以上の高周波領域で大幅な低下を示した。この要因として、他との著しい特性の違いから、極薄PETフィルムへのアルミ両面蒸着による、PETの物性的変化が示唆される。したがって、前節で示したようにステップ電圧に対しては長い減衰時定数が得られない。このように、PETフィルムの静電容量－周波数特性に蒸着金属の種類やその膜厚が影響することには注意が必要である。

PTFEは誘電体としての特性は優れているが、静電容量の絶対値が小さいので、総合的にはマイカが最も優れた材料といえる。

図7 低電圧側容量の周波数特性

Fig. 7. Relationship between static capacitance and frequency of low-voltage-side capacitors.

<4・2> 低域遮断周波数の改善 低電圧側容量にマイカのような静電容量が比較的大きい材料を使用しても、低域遮断周波数は1MHz程度であり、雷インパルスの波尾などは測定できないので不便である。そこで、オシロスコープの入力インピーダンスを1MΩとした場合の応答特性を検討した。

入力インピーダンスが1MΩのオシロスコープを容量分圧センサに接続する場合の整合回路はすでに提案例⁽⁸⁾⁽¹²⁾がある。ここではこれにない、図8の測定系を構成した。図中のC₃はセンサの低電圧側容量と接続ケーブルの容量を補償するもので、実測値10.61nFのコンデンサを使用した。ステップ電圧の波高値やパルス幅等の条件は図6と同一である。

応答波形を図9に示す。電圧立上り時間は1.6nsとやや長くなるが、ステップ電圧の平坦な部分も測定できている。電圧立上り時間が長くなるのはオシロスコープの周波数帯域(200MHz)が低いため、これよりも立上りがゆるやかな電圧波形は当然測定可能である。したがって、この測定系でも実用上は充分な応答特性を有しており、雷インパルスの波尾なども測定できるメリットは大きいと考えられる。

<4・3> 分圧比の周波数特性 低入力および高入力インピーダンス測定系に対して、容量分圧センサの分圧比の周波数特性をEMTPで検討した。低電圧側容量材料はマイカ、またセンサへの入力電圧は正弦波とした。結果を図10に示す。実測値と比較するため、ステップ電圧に対する分圧比を10MHz～100MHz付近の領域に一点鎖線で併記した。また、高入力インピーダンス測定系については、交流電圧(50Hz)に対する実測値も併記した。100MHz以上の高周波領域で、破線で示した特性はオシロスコープの周波数帯域を考慮したものである。この結果より、本センサおよび測定系の周波数帯域を3dB(70%)減衰点で定義すると、低入力インピーダンス測定系で1.1MHz～1GHz、高入力インピーダンス測定系で30Hz～200MHzとなる。この帯域で分圧比はほぼ一定であるが、図7の結果

図8 高入力インピーダンス測定系の回路構成
Fig. 8 Diagram of the measuring system terminated with a high impedance.

(a) 電圧立上り部分(時間軸:1ns/div)

(b) 波頭部分(時間軸:10ns/div)

図9 高入力インピーダンス測定系における応答波形(低電圧側容量材料:マイカ)

Fig. 9. Step response for the measuring system terminated with a high impedance.

図10 容量分圧センサの分圧比-周波数特性

Fig. 10. Relationship between voltage dividing ratio and frequency of the capacitive voltage sensor.

から、1MHz 以上の高周波領域では3%程度の分圧比の変動を考慮する必要がある。

なお、低域遮断周波数をさらに低減させるため、センサ出力端と接続ケーブルの間に直列の高抵抗を挿入する方法、センサ出力をFETプローブで測定する方法なども検討したが、前者は感度の低下、後者はノイズの問題で有効な方策とはならなかった。

5. 実規模容量分圧センサの試作

これまでの検討をもとに、図11に示す実規模容量分圧センサを試作した。センサプレートの直径は90mmで接続ケーブルまでの同軸構造部は、サージインピーダンスが約50Ωとなる直径比（約2.3）を維持したまま、円錐状の構造とした。BNCコネクタは気密構造のもので、ガス圧力が数気圧のGISに使用することができる。低電圧側容量には両面に銀を焼付けたマイカ（直径92mm）を使用した。BNCコネクタ端で測定した静電容量は9.14nFであった。

本センサを275kV級GIS母線モデル（中心導体外径200mm，シース内径600mm）に設置して応答波形を実測した。高電圧側ガス空間の静電容量は三次元表面電荷法による計算で0.154pFを得た。測定系は高入力インピーダンスとした。既知電圧の雷インパルスおよび交流電圧（50Hz）に対して分圧比を実測すると、雷インパルスに対しては1/135000，交流に対しては1/139600となり、両者の差は約3%と小さい。また、EMTPを適用して分圧比を計算で求めると、これらの値に対し約4%の精度で一致し、本測定系の応答特性の推定にEMTPは有効な手法である。

次に、高気圧SF₆ガス中の球ギャップ間のフラッシュオーバを利用して、模擬的に断路器サージを発生させて、応答波形を実測した。GISにおける実使用条件と同じく、センサを設置した母線モデルにもSF₆ガスを0.5MPaで封入した。結果を図12に示す。第1波の波高値は260kV，立上り時間は8.1nsで、約38MHzで振動する波形を測定することができた。低入力インピーダンス測定系を使用した場合も応答波形はほぼ同一であり、このような短時間領域においては低周波電圧に対する遮断特性が問題にならないと考えられる。

図10の例と同様に、本測定系の周波数帯域をEMTPにより計算すると、低入力インピーダンス測定系に対して350kHz～1GHz，高入力インピーダンス測定系に対して9Hz～200MHzと評価された。本容量分圧センサおよび測定系は、実機器と同様の条件で数100kVオーダの急峻波高電圧を測定できたことから、十分な実用性を備えたものであると評価できる。

6. まとめ

GISの断路器サージなどの急峻波サージ電圧を精度良く測定できるセンサの開発を目的として、容量分圧センサを試作し、その応答特性を検討した。主要な結果を以下に

図11 実規模容量分圧センサの構造
Fig. 11. Structure of a practical-scale capacitive voltage sensor.

（電圧軸：67.5kV/div，時間軸：10ns/div）

図12 模擬断路器サージに対する応答波形
Fig. 12. Response waveform for a simulated disconnector-induced surge measured by the practical-scale sensor.

整理する。

（1）低電圧側容量材料として材質、厚さの異なる7種類の誘電体を検討し、いくつかの材料は静電容量が周波数によって変化するため、不適当であることを示した。

（2）低電圧側容量材料として提案した銀を焼付けたマイカは静電容量が大きく、高周波領域でも静電容量の減衰が小さいので、本用途に適切な材料である。

（3）測定系の入力インピーダンスにより、周波数帯域が大幅に変化するが、実測とEMTPによる解析を援用して、測定電圧の周波数と分圧比の関係を定量的に評価した。

（4）低入力インピーダンス測定系では、周波数が1GHz程度までの急峻波サージ電圧を測定できるが、数100kHz以下の周波数成分は測定できない。一方、高入力インピーダンス測定系では、周波数帯域の上限は200MHz程度であるが、商用周波数の領域までほぼ一定の分圧比を得ることができた。

（5）実規模の容量分圧センサを試作し、実機器と同様の条件にて数100kVオーダの模擬断路器サージを実測した。

本研究で使用した銀焼付けマイカ、蒸着フィルムの制作にあたっては、双信電機(株)EMC技術部 井上勝夫氏、松下電器産業(株)飯島康男氏(現在、松江松下電器(株))、本州製紙(株)特殊紙研究室 山内庸立氏に御高配賜りました。また種々御指導、御協力いただいた当所 狛江研究所 鈴木俊男副所長、環境推進室 笹野隆生次長、電気物理部 本山英器担当研究員、芝浦工業大学卒論生 鈴木康之氏(現在、東京電力)に厚く感謝の意を表します。

(平成5年5月25日受付)

文 献

- (1) 電気協同研究会:「絶縁設計の合理化」, 電気協同研究, 第44巻, 第3号(昭63-12)
- (2) 電気学会:「急しゅん波サージとGISの絶縁問題」, 電気学会技術報告(II)部, 第324号(平2-2)
- (3) W. Boeck, W. Taschner, J. Gorablenkow, G.F. Luxa & L. Menten: "Insulating Behavior of SF₆ with and without Solid Insulation in Case of Fast Transients", CIGRE Paper, No.15-07 (1986-8,9)
- (4) S. Matsumoto, H. Aoyagi, H. Okubo & Y. Kawaguchi: "Breakdown Phenomena of SF₆ Gas under Fast Oscillating Impulse Voltages", Proc. of the 9th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, pp.327-330 (1988-9)
- (5) G. Riquel, Z.Y. Ren & L. Lefrancois: "Comparison between V.F.T. and Lightning Impulse Breakdown Voltages for GIS Insulation in Presence of Defects on Live-Conductors", 6th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 23.09 (1989-8,9)
- (6) 八島政史・藤波秀雄・宅間 董:「振動性急峻波インパルスに対するGISの絶縁特性(その1)」, 電力中央研究所報告 T90052 (平3-5) および 同(その2) T91024 (平4-3)
- (7) S.A. Boggs & N. Fujimoto: "Techniques and Instrumentation for Measurement of Transients in Gas-Insulated Switchgear", IEEE Trans. on Electrical Insulation, EI-19, No.2, pp.87-92 (1984-4)
- (8) 村瀬 洋・大久保 仁・青柳浩邦・柳父 悟:「GIS用1GHz急しゅん波サージセンサの開発」, 電学論B, 109, 32~38 (平元-1)
- (9) 仲西幸一郎・広兼昇一・加藤賢治・井波 潔:「GIS

母線モデルの急峻波V-t特性」, 電気学会放電研究会資料, ED-89-43 (平元-5)

- (10) M. Cojan: "Measurement of Fast Transient Overvoltages in GIS", CIGRE SC33 TYO-COL 06.04 (1987-10)
- (11) A. Cattaneo, F. Cremonesi & G. Rizzi: "Measurement of Overvoltages during Disconnecting of Capacitive Currents", 5th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 12.02 (1987-8)
- (12) J. Meppelink & P. Hofer: "Design and Calibration of a High Voltage Divider for Measurement of Very Fast Transients in Gas Insulated Switchgear", *ibid.*, 71.08 (1987-8)
- (13) D.A. Bradley: "A Voltage Sensor for Measurement of GIS Fast Transients", 6th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 49.01 (1989-8,9)

八島 政史 (正員) 1959年1月24日生まれ。83年九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻修士課程修了。同年(財)電力中央研究所入所。92年~93年カナダ・マニトバ大学客員研究員。主としてガス絶縁機器の絶縁技術に関する研究に従事。89年電気学会論文賞。IEEE 会員。

藤波 秀雄 (正員) 1952年12月2日生まれ。78年成蹊大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年(財)電力中央研究所入所。92年より中央電力協議会へ出向。89年~90年カナダ・マニトバ大学客員研究員。主としてガス絶縁機器の絶縁技術に関する研究に従事。89年電気学会論文賞。IEEE 会員。

宅間 董 (正員) 1938年9月30日生まれ。66年東京大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。同年同大学電気工学科講師。67年(財)電力中央研究所入所。現在、同所参事。89年~93年九州大学客員教授。75年イギリス電気学会Maxwell賞, 71年および89年電気学会論文賞, 81年および91年同著作賞, 92年同業績賞。IEEE Fellow。