インパルス電圧・電流測定システムの技術動向

正 員 原 田 達 哉

日本工業大学

キーワード

インパルス電圧・電流, 基準分圧器, 基準分流器, デジタルレコーダ

1. はじめに

インパルス電圧・電流試験は, 電力系統に発生する雷・開閉サージなどの異常電圧や, 雷撃電流などを模擬した試験であり, 送配電線, 発電所あるいは電力機器, 電気工作物の絶縁設計, 絶縁協調, 雷害防止などを考える場合に基本となる重要な試験である。また新しく製作された電力機器, 電気工作物に対しては商用試験としてインパルス電圧・電流試験が行われている。

インパルス電圧・電流試験は, 研究・開発試験として, あるいは商用試験として極めて重要な試験であるが, 試験の信頼性は試験電圧・電流の測定精度によって大きく左右されるので, 従来からこの分野に関して活発に研究が行われてきた。また, IEC 規格や JEC 規格により, 測定技術や測定器に関し詳細な規定が定められていた。

最近, インパルス電圧・電流測定に関する IEC 規格の改訂案⁽¹⁾が発表されたが, これによると各国がそれぞれ基準測定システムを保有し, 産業界の測定システムは, それとの比較校正により測定精度を維持するよう改訂されようとしている。このため, 基準測定システムや比較校正試験に関する研究が内外で盛んに実施され, 本年 8 月に横浜で開かれた第 8 回国際高電圧シンポジウム (ISH) においても, 30 編を超える論文が発表され, この分野に世界の関心が集まっていることが示された。

本解説では, これらの最近の情勢を含めて, インパルス電圧・電流測定システムの技術動向について概説する。

2. インパルス電圧・電流測定システムの現状⁽²⁾

インパルス電圧・電流は高電圧, 大電流であるので, 測定システムは, 一般にこれらを適当な大きさの電圧・電流に変換する変換装置と測定器とより構成される。表 1 に主要な変換装置と測定器とを示した。標準球ギャップは直接インパルス電圧の波高値を測定するので測定器は必要ない。また, 光分圧器や電界計は一般に波高電圧計とは組み合わせて使用しない。

表 1 のうち, 変換装置として広く使用されているものは, シールド抵抗分圧器, 制動容量分圧器, 抵抗分圧器,

表 1 主要な変換装置と測定器

測定対象	変換装置	測定器
インパルス電圧	抵抗分圧器, シールド抵抗分圧器, 制動容量分圧器, 容量分圧器, 抵抗容量分圧器, 光分圧器, 電解液分圧器, 電界計	オシロスコープ デジタルレコーダ 波高電圧計
インパルス電流	同軸円筒形分流器, 高周波変流器, ロゴスキーコイル	オシロスコープ デジタルレコーダ
インパルス電圧	標準球ギャップ	

表 2 基準測定システムの応答パラメータ

応答パラメータ	全波 雷インパルス電圧用	裁断波 雷インパルス電圧用	開閉 インパルス電圧用	インパルス電流用
応答時間 T_N	$\leq 15 \text{ ns}$	$\leq 10 \text{ ns}$		
部分応答時間 T_s	$\leq 30 \text{ ns}$	$\leq 20 \text{ ns}$		$\leq 0.1 T_1^*$
安定時間 T_s	$\leq 200 \text{ ns}$	$\leq 150 \text{ ns}$	$\leq 10 \mu\text{s}$	
初期ひずみ T_0		$\leq 2.5 \text{ ns}$		

*被測定インパルス電流の波現長

同軸円筒形分流器, 高周波変流器, 標準球ギャップなどであり, 他は特殊な場合に用いられている。測定器はオシロスコープに代って, デジタルレコーダに全面的に移行しつつある。インパルス電圧・電流試験では, 一般に電圧・電流の波高値を $\pm 3\%$, 波形パラメータ (波頭長, 波尾長) を $\pm 10\%$ 以内の不確かさで測定することが規格で定められている。

3. インパルス電圧・電流基準測定システム

IEC 規格⁽¹⁾の改訂に伴って, 各国がそれぞれ基準測定システムを保有することが義務づけられた。基準測定システムは一般に基準分圧器・分流器とデジタルレコーダとから構成され, インパルス電圧・電流の波高値を $\pm 1\%$, 波形パラメータを $\pm 5\%$ 以内の不確かさで測定できるものでなければならない。

このため, IEC⁽¹⁾では基準測定システムに対し, スケールファクタが $\pm 0.5\%$ 以内の不確かさで定められており, 応答特性が表 2 を満足することか必要であるとしている。以下, 基準分圧器・分流器の技術動向について概説するが, ここに示されている応答パラメータは, デジタルレコーダを含む測定システムとしての値である。

Technical trends on impulse voltage and current measuring systems.

By Tatsuya Harada, Member (Nippon Institute of Technology).

表 3 各国基準分圧器と特性

No.	国 名 (設置場所)	分圧器 タイプ	定格電圧 (kV)	高圧部	制動抵抗 (Ω)	応答パラメータ				
						T_N (ns)	T_a (ns)	T_s (ns)	T_o (ns)	β (%)
1	日 本* (日本工大)	シールド 抵 抗	700 (雷)	10 k Ω	150	6.45	13.0	130	0.12	32.4
2	日 本* (日本工大)	シールド 抵抗補償式	700** (雷)	10 k Ω	150	-0.23	9.71	123.9	0.15	46.2
3	日 本* (日本工大)	シールド 高 抵 抗	500 (開閉)	200 k Ω	500	36.3	40.4	155.5	0.05	5.0
4	日 本 (日立・三菱)	油入縮小 抵 抗	1,000 (雷)	10 k Ω	0	-1.9	4.7	154	0.3	90
5	日 本 (電 中 研)	油入縮小 抵 抗	1,000 (雷)	5.5 k Ω	10 200	-5.8 2.0	4.9 5.5	132 74	0.1 0.2	50.7 28.3
6	フランス (E D F)	シールド 抵 抗	450 (雷)	23 k Ω	220	0.7	8.7	115	0.2	32
7	ド イ ツ (P T B)	(シールド) 抵 抗	300 (雷)	8.1 k Ω	0 200	1.0 6.3	8.4 14.5	251 192	0.6 0.1	68 38.1
8	ス イ ス (ハーフエリ-社)	シールド 抵 抗	500 (雷)	5 k Ω	400	<10	<10	<150	—	—
9	ス イ ス (ハーフエリ-社)	制動容量	500 (雷, 開閉, AC, DC)	500 pF 225 M Ω ***	300	5.7	10.3	109	—	23

- *: 協同研究委員会開発
- **: NO. 1 の分圧器に補償回路設置
- ***: 直流電圧測定用並列抵抗
- ・ NO. 7 の(シールド)は小形であることを示す。
- ・ 定格電圧の項の()内は測定対象電圧, (雷)は全波および裁断波雷インパルス電圧, (開閉)は開閉インパルス電圧。
- ・ EDF: フランス電力庁
- ・ PTB: 理工学研究所(ドイツ)

(雷インパルス電圧用)

図 1 450 kV EDF 基準分圧器(表 3 中 No. 6)

(雷インパルス電圧用)

図 2 300 kV PTB 基準分圧器(表 3 中 No. 7)

PTB 基準分圧器は、一般に直径 2 cm の高圧リード線と 200 Ω の制動抵抗を用いて測定する。

3.1 雷インパルス電圧用基準分圧器

現在まで、種々の基準分圧器が発表されている。表 3 に各国基準分圧器の特性を示す。

D. Kind ら⁽³⁾は 500 kV 制動容量形基準分圧器(当時は標準分圧器と称していた)を 1989 年に発表している。測定の不確かさは、全波雷インパルス電圧の波高値で、0.3%~0.5%, 波頭裁断波で 1.1%, 波頭長 2~3%であるとしている。

HAEFELY 社の 500 kV シールド抵抗形基準分圧器⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、詳細な応答特性は発表されていないが、応答条件と全波および裁断波に対する測定の不確かさが IEC 規定内に入っていると発表されている(表 3 中 No. 8)。

その他に報告されている基準分圧器は、すべてシールド抵抗形である。これは分圧比が近接物体や温度変化の影響

をほとんど受けず、極めて安定していること、分圧比が極めて高精度($\pm 0.1\%$ 以下)で決定できること、経年変化がないことなど、基準分圧器として望ましい特性を備えているからである。

EDF⁽⁶⁾⁽⁷⁾では、1976 年に発表した図 1 に示す多重シールド形抵抗分圧器を現在、基準分圧器として採用している。抵抗値は 23 k Ω である。

PTB⁽⁸⁾では、図 2 に示す 300 kV, 8 k Ω 抵抗分圧器を基準分圧器とし、ヨーロッパ、オーストラリア、日本、中国各国で持回り試験を実施した。

我が国においては、基準分圧器の開発に関し、欧米に比べて大きく立遅れていたが、筆者らの提唱により電気学会内に「インパルス用標準分圧器・分流器開発協同研究委員会」が平成 2 年 12 月に設立され、国内主要重電機、電線、

(雷インパルス電圧用)

図 3 700 kV 基準分圧器 (表 3 中 No. 1, No. 2)

(開閉インパルス用)

図 5 500 kV 基準分圧器 (表 3 中 No. 3)

(雷インパルス電圧器)

図 4 1,000 kV 油入縮小形標準分圧器 (表 3 中 No. 4)

がいしメーカーなどの協力のもとに開発を進めてきた。その結果、IEC 規格案を満足する次の基準分圧器を得ることができた。

図 3 に開発された 700 kV 雷インパルス電圧用基準分圧器^{(9)~(11)(14)}を示す。高さ約 2.2 m のシールド抵抗形分圧器であり、高圧部抵抗体は、カーマロイ線のエアトンペリー巻き、10 k Ω である。本分圧器に長さ 2.8 m の高圧接続線と 150 Ω の制動抵抗を接続して応答特性を測定したところ、表 3 に示すように、全波はもちろん、裁断波に対しても IEC の条件を満足していることが確認された。しかし、応答時間が 6.45 ns で、0.5 μ s の裁断波測定で約 1% の波高値誤差を生ずる。

そこで、低圧部に補償回路を接続して、応答特性の改善を図った^{(12)~(14)}。その結果の応答特性を表 3 の 2 段目に示したが、応答時間 T_N をほとんど零とすることができた。また、応答特性が IEC の条件を満足しない分圧器でも、

補償回路により IEC 条件に合格させることも可能である。筆者の提案したこの方法は、比較校正試験によっても、その有効性が立証された。

なお、1971 年、筆者らにより開発された 1,000 kV 油入縮小形抵抗分圧器⁽¹⁵⁾は、応答特性が極めて優れており、現在各所で使用されている。比較校正試験にも用いられ、1,000 kV の定格にもかかわらず、300 kV PTB 基準分圧器に対し遜色のない結果を示している。表 3 に応答特性が与えられているが、基準分圧器として十分採用できるものである(図 4)。

3.2 開閉インパルス電圧用基準分圧器

開閉インパルス電圧は波頭長、波尾長が長く、測定が容易であるため、あまり検討が行われず、基準分圧器として発表された例は少ない。開閉インパルス電圧用分圧器は高インピーダンスであることが要求されるので、一般に容量形分圧器が用いられてきた。HAEFELY 社の 500 kV 制動容量形基準分圧器⁽⁴⁾は、開閉インパルス電圧のみならず、雷インパルス、交流、直流電圧用の基準分圧器としても使用できると発表されている(表 3 中 No. 9)。

コンデンサは温度や電圧により容量が変化すること、また、長期間にわたる信頼性が明らかでないこと、容量形分圧器は近接物体により分圧比が影響を受けやすいことなどの欠点がある。このため、前記開発協同委員会では、最も信頼性の高いシールド高抵抗形を基準分圧器として採用した。抵抗値は 200 k Ω とした。

図 5 に開発した 500 kV 開閉インパルス電圧用基準分圧器⁽¹⁴⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾を示す。

開閉インパルス電圧用基準分圧器に対する IEC の応答条件は、安定時間が 10 μ s 以下であることだけである。本分圧器のシールド電極を取りはずし、単なる抵抗分圧器とした場合、応答時間 1.1 μ s、安定時間 5 μ s となり、IEC の基準分圧器の条件に合格する。シールド電極を設け、応

答特性(表3参照)を向上させたのは、波頭裁断開閉インパルス電圧の測定などを考慮したためである。

同様なシールド高抵抗(375 k Ω)分圧器⁽¹⁶⁾はドルトムント大学よりも発表されているが、この場合、雷、開閉インパルス電圧測定兼用を目的としており、基準分圧器として開発されたものではない。

3.3 インパルス電流用基準分流器⁽¹⁹⁾

前記協同研究委員会で種々検討を行ったが、基準分流器としては、最も応答特性に優れ、安定性、信頼性の高い同軸円筒形分流器が最適であるとの結論を得た。基準分流器に対するIECの応答条件は、部分応答時間 T_a が0.1 T_1 以下であることだけである。最も波頭長の短い標準インパルス電流1/20 μ sで、裕度 $\pm 10\%$ を考え、 $T_1=0.9 \mu$ sとすると $T_a \leq 90$ nsとなる。数十kAのインパルス電流用同軸分流器の応答時間は数ns程度であり、基準分流器として十分な特性を有している。

3.4 デジタルレコーダ

測定精度が良いこと、測定結果のコンピュータ処理が可能なことなどのために、オシロスコープにかわってデジタルレコーダが全面的に使用されるようになった。このため、1991年、IEC規格1083-1⁽²⁰⁾が定められた。一般のインパルス電圧・電流試験では、波高値および時間パラメータ測定の不確かさが、それぞれ $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 以下のレコーダを使用するよう規定されている。このため、サンプリングレート、積分非直線性、微分非直線性、時間軸非直線性、立上り時間、内部雑音レベル、干渉の限界などを詳細に定め、かつそれらの試験法についても規定している。

現在はIEC規格に合格する8~10ビット、サンプリングレート数十~数百MS/sのレコーダが一般に用いられている。

基準測定システムに使用するデジタルレコーダについては特に規定されていないが、3章で述べた測定の不確かさが要求されるので、前記よりさらに高性能のレコーダが必要である。このため、筆者はソニー・テクトロニクス社と協力して、インパルス試験用デジタルレコーダおよび校正システムの研究を行い、各種非直線性や内部雑音の小さな高性能レコーダの開発⁽²¹⁾を進めている。海外ではHAEFELY社⁽²²⁾が同様なレコーダとパルス校正器を発表している。

デジタルレコーダに関する他の重要な問題は、測定結果のコンピュータ処理である。例えば測定波形には内部雑音が重なるので、移動平均法⁽²³⁾によってその影響を除去する方法などが用いられている。測定波形から波高値、波頭長、波尾長を、また、分圧器の直角波答波形から、応答時間、安定時間など各種応答パラメータを求めるソフトウェアは、各高電圧試験所が独自に作成して使用しているのが現状である。ヨーロッパでは、各種インパルス電圧波形をデジタル処理して磁気ディスクに入力し、これを8か国の機関に送り、それぞれのソフトウェアで、波高値、波頭長、波尾長、裁断までの時間などを求める国際比較試

図6 電界計による5 MV制動容量⁽²⁶⁾分圧器の直線性の検証

験⁽²⁴⁾を実施したが、波形によってはIEC規格の限度を超えるばらつきが見られた。今後、ソフトウェアの改良や国際的な統一が望まれる。

3.5 分圧器の直線性の検証^{(25)~(27)}

比較校正試験は、被校正分圧器の定格電圧の1/5以上の電圧で実施すればよいと定められている。この場合、被校正分圧器の電圧に対する特性の直線性を仮定している。IEC規格案では、標準球ギャップ、インパルス電圧発生器の充電電圧、あるいは電界計などにより直線性を検証するよう規定されている。球ギャップや充電電圧による方法は、精度の良い場合と悪い場合があり、電界計による方法は、部分放電の影響を受けないよう電界計を配置すれば、図6に示すように良好な結果が得られると報告されている。分圧器と電界計の出力電圧の比は $\pm 0.5\%$ 以内に入っている。

4. その他のトピックス

4.1 DWINA-100⁽²⁸⁾およびVIKING-50⁽²⁹⁾

最近、ロシアの計測研究所からツェナダイオードが一定の電圧で通電する現象を利用した電圧校正装置が開発された。多数のツェナダイオードを直列として高電圧用を構成している。100 kVのDWINA-100がCESI(イタリア)に設置され、試験された結果、その優秀性が立証された。その不確かさは直流電圧に対して $\pm 0.01\%$ 、開閉インパルス電圧に対して $\pm 0.1\%$ 以内と報告されている。また、その改良形であるVIKING-50(50 kV用)は、標準雷インパルス電圧に対して $\pm 0.1\%$ 以内、開閉インパルスおよび直流電圧に対してはそれ以内の不確かさであると発表されている。さらに高い電圧用も計画されており、今後、インパルス電圧の基準器としての応用が期待される。

4.2 高周波変流器を用いた分流器の比較校正試験⁽³⁰⁾

分流器と測定器と同一接地線で結ばれるので、インパルス大電流測定の場合、接地電位の上昇のため技術的にいろいろな問題を生じやすい。このため、インパルス電流の測定には高周波変流器を用いることが多い。分圧器と異な

り、分圧器の比較校正試験についてはほとんど報告された例がない。筆者らは標準分圧器で高周波変流器のスケールファクタを校正し、この変流器を介して被校正分圧器を校正して、良好な結果を得ている。この方法は、2つの分圧器を同時に校正するより技術的に容易である。

5. む す び

インパルス電圧・電流測定システムに関し、現在、最も問題となっている基準測定システムを中心として、その技術動向の概要について述べた。インパルス電圧・電流測定に関する IEC 規格案の発表以来、現在ほど世界的にこの分野に対する関心が集まったことはなかった。我が国においても海外に遅れぬよう研究開発を推進することを期待する。(平成5年11月22日受付)

文 献

- (1) IEC Pub. 60-3, 4改訂案: High voltage testing techniques, Part 2, Measuring systems (1993)
- (2) 原田・稲葉: 「高電圧・大電流測定技術の動向」電学論 B, 111, 821 (平3)
- (3) D. Kind, et al.: "The calibration of standard dividers", 6th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), 41.10 (1971)
- (4) HAEFELY 社カタログ (E104. 10): Reference dividers RCZ 500 REF, R 500 REF
- (5) A. Claudi, et al.: "Calibration of digital measuring systems," 8th ISH, 53.02 (1993)
- (6) A. Pigini, et al.: "Record of performance of voltage and current measuring systems," ELECTRA, No. 78, p. 35~69 (1976)
- (7) F. Deschamps, et al.: "Calibrating HV impulse dividers in industrial laboratories," 8th ISH, 50.04 (1993)
- (8) A. Bornamy, et al.: "International comparison of HV impulse dividers," 7th ISH, 61.07 (1987)
- (9) T. Harada, et al.: "Development of reference impulse measuring systems and comparison tests in Japan," 大韓電気学会夏季大会招待講演論文集 p. 19~23 (1991)
- (10) 原田・柏木・佐伯・鎌田: 「インパルス測定用標準分圧器, 分圧器に関する検討」, 平3電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 259
- (11) 柏木・原田・佐伯・鎌田: インパルス電圧・電流測定用標準分圧器, 分圧器, 電気学会高電圧研究会資料, HV-92-5 (平4)
- (12) 原田・佐伯・柏木・小泉・石橋・鎌田: 「700 kV 全波, 裁断波雷インパルス測定用補償式シールド形標準分圧器」, 平5電気学会全大, No. 1292
- (13) 原田・中川・柏木・佐伯・鎌田: 「全波および裁断波雷インパルス電圧用補償式シールド形標準分圧器と比較校正試験」, 平5電気学会全大, No. 433
- (14) 原田・鎌田: 「インパルス電圧測定用基準分圧器の開発」, 電気学会放電・高電圧合同研究会, ED-93-185, HV-93-94 (平5-12)
- (15) T. Harada, et al.: "Development of a high quality resistance

- divider for impulse voltage measurements," IEEE Trans., Power Apparatus Syst., PAS-90, No. 5, p. 2247~2250 (1971)
- (16) D. Peter, et al.: "Resistive voltage divider for 1 MV switching and lightning voltages," 5th ISH, 73.02 (1987)
- (17) 岩瀬・柏木・原田・佐伯・鎌田: 「開閉インパルス測定用標準分圧器」, 平4電気学会全大, No. 1201 (1992)
- (18) 柏木・原田・佐伯・鎌田: 「開閉インパルス電圧測定用シールド高抵抗標準分圧器」, 電学論 B, 113, 485~492 (平5-5)
- (19) 電気学会大電流応用調査専門委員会: 大電流工学ハンドブック, p. 265~272 (平4-5)
- (20) IEC 1083-1-1991: Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests, Part 1-Requirements for digital recorders
- (21) 原田・佐伯・柏木・三宅・高橋: 「インパルス試験用デジタイザおよび校正システムについて」, 電気学会放電・高電圧合同研究会資料, ED-93-185, HV-93-93 (平5-12)
- (22) A. Claudi: Calibration of digital impulse measuring systems, HAEFELY 社, E1-48
- (23) 脇木・原田・柏木: 「インパルス電圧測定に用いるデジタル測定器の内部ノイズによる誤差と補正法」, 電学論 B, 114, 72 (平6-1)
- (24) K. Schon, et al.: "International comparison of software for evaluating HV impulses and step responses," 8th ISH '93, 51.01 (1993)
- (25) Deschamps: "Checking linearity of high voltage impulse dividers," 8th ISH '93, 52.04 (1993)
- (26) G. Rizzi: Determination of the linearity of impulse divider in the light of the revision of IEC 60: Comparison among several methods", 8th ISH, 52.05 (1993)
- (27) Oliveira, et al.: "Linearity tests of HV measuring systems-Experimental results," 8th ISH, 52.06 (1993)
- (28) G. Carrara, et al.: "Some experience in calibration of high voltage DC and switching impulse measuring systems," 8th ISH, 50.05 (1993)
- (29) V. V. Kiseliev: "A new type of differential meter," 8th ISH, 54.10 (1993)
- (30) 柏木・原田・佐伯・鎌田: 「インパルス高電圧・大電流測定系の比較試験」, 電気学会高電圧研究会資料, HV-92-37 (平4-8)

原 田 達 哉 (正員) 1947年, 東京工業大学電気工学科卒業, 1952年同大学院特別研究生修了, 同年, 四国電力株式会社入社, 電力中央研究所出向, 1964年, 研究室長, 1965年, 主任研究員, 1971年理事待遇, 1985年, 佐賀大学理工学部教授, 平成元年, 日本工業大学教授, 超高圧放電研究所センター長。工学博士。IEEE フェロー。1961年電気学会論文賞, 1968, 71, 72年同進歩賞, 1975年電力賞受賞。1970, 71年東京支部会計幹事, 1975, 76年編修理事。高電圧・大電流試験, 放電現象, インパルス電圧・電流測定などの研究に従事。高電圧試験標準特別委員会およびインパルス用標準分圧器, 分圧器開発協同研究委員会各委員長。