

交流電流比標準の現状について

山田 達司*

(平成16年11月29日受理)

Review of Alternating Current Ratio Standards

Tatsuji YAMADA

Abstract

The first project for ac current ratio standards has been launched at NMIJ since 2001. Technical requirements involved in the standards are reviewed at the starting point of the second project. The current comparator required as the standards to calibrate current transformers is discussed referring to CMCs published by NMIs in preparation to international comparisons. The standards for high-range current ratio, high-frequency current ratio and electronic current transformers will be desired.

1. はじめに

交流電流比標準（以降、電流比標準と略す）には、大きく分けると標準変流器と電流比較器がある。両者は変流器の校正に利用されるが、機能的な違いがある。標準変流器は文字通り変流器であり、1次側に入力した電流を巻数比に応じて2次側から出力する。一方、電流比較器は1次および2次側に入力した電流をコア中の起磁力で比較するような構造を持つ。

校正対象となる変流器は主に計測用、保護用に大別される。最近ではロゴスキーコイルや光CTなど、大電流を微弱な信号に変換するECT (electronic current transformer) が登場したが、コアと巻線からなる従来の変流器は構造が単純である故に安価であり、最も利用される電流検出器である。利用範囲は送電系統の大電流計測から大口電力需要家の電力量計測、個人・業務用のクランプ式テストなど様々である。

変流器の校正では、その比誤差（電流比の誤差）と位相角をGUMに基づいて試験されている。現在のところ、電流比標準に関して最高精度を求める場合には一般的に電流比較器が採用されている。（電流比較器は直流用もあるが、ここでは交流用のみを対象とする）電流比較器の構造も単純である故に10ppm以下の安定性が実現でき、計測標準分野においても利用されている。例えば、イン

ピーダンス標準、電力標準、電力損失標準などに電流比較器の技術が応用されるケースがある。このように、電流比較器の利用は変流器の校正目的だけでなく、計測標準分野においてもその価値が高い。

電流比標準が最も利用されている場面は法定計量においてである。電力量計は法定計量で定められる特定計量器の一つであり、それに併用される変流器に関する検査項目は計量法省令で規約されている。電流比標準は法定計量で使用される変流器を主眼において設計される。このことは、電力量計の技術動向が電流比標準の動向に影響を及ぼすことを意味する。例えば、電力量計の電子式化の流れを汲んで変流器にも電子式化の波が押し寄せている状況から、ECTの需要増加が見込まれており、今後その標準整備が求められる。また、電力系統上での高調波問題が浮上しており、電力量計における高調波電流計測のために、変流器の周波数特性を高周波領域まで広げる必要がある。このような情勢の中で、計量標準総合センター（NMIJ）で2001年度に立ち上がり、2003年度に供給を開始した電流比標準に関しては、国際比較に参加できるように校正範囲の拡張に努め、かつ電子式化や高調波問題に対応し、それらの校正能力をAppendix Cに登録できるように各標準を確立することを目指している。

* 計測標準研究部門 電磁気計測科

2. 交流電流比標準の基礎

変流器の基本的な構成要素はお互いに接続されていない2本の巻線から成る(図1)。ここで、1次巻線(巻数 N_1)に電流源を、2次巻線(巻数 N_2)に負荷を接続すると、2つの電気回路と1つの磁気回路が成立する。1次巻線に流れた1次電流 I_1 はAmpereの法則により磁界(磁束)が作られ、その磁界(磁束)が2次巻線に入ると電磁誘導の法則により起電力が発生する。その起電力は電流源となって負荷側の回路に2次電流 I_2 を流す。理想変流器の場合、以上の現象を式で表すと、

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \tag{1}$$

が成り立つ。電流比標準は理想変流器の条件に近づくように様々な技術が導入される。この条件から外れる主要因は①励磁電流、②漏れ磁束、③容量性電流である。このうち最も大きな誤差を与える要因が励磁電流である。励磁電流は磁束を発生させるのに使われる電流である。励磁電流を抑えるには磁束を発生させ易くすればよいので、磁束空間に透磁率の高い材質(コア)が使用される。また、コアの使用により漏れ磁束の問題も大幅に解消される。しかし一方で、ヒステリシス現象や渦電流などの問題を引き起こす。また、非常に透磁率の高いコアを使用しても、電流比標準として満足する精度を求めるには不十分であり、特に励磁電流の対策は必要不可欠である。電流比較器の利用は変流器における励磁電流の問題を解消できる方法の一つである。図2は電流比較器の基本構成を示す。1次および2次側に電流を入力し、検出巻線に接続された検出器がナルになるように補償巻線に微小電流を入力する。バランス時には

$$N_1 I_1 + N_E I_E = N_2 I_2 \tag{2}$$

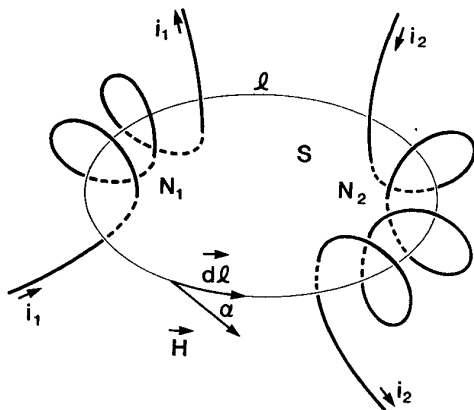


図1 変成器の基本構成²⁾

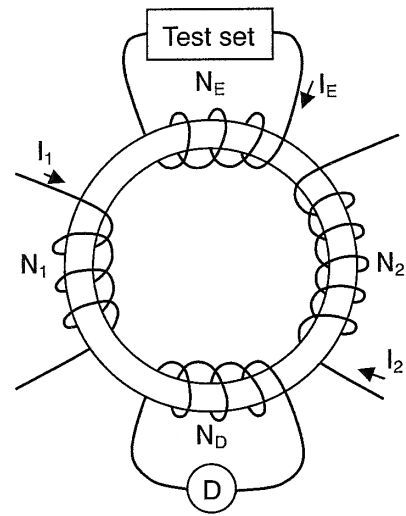


図2 電流比較器の基本構成

を満たす。ここで N_E 、 N_D は補償巻線、検出巻線の巻数である。実際の校正試験では式(3)で定義される誤差 ϵ を導き出す作業となる。

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} (1 + \epsilon) \tag{3}$$

この誤差は複素数で表せるので式(4)のように同相誤差 ϵ_p と直角相誤差 ϵ_q に分けることができる。

$$\epsilon = \epsilon_p + j\epsilon_q = \frac{N_2 I_2 - N_1 I_1}{N_1 I_1} \tag{4}$$

このように電流比較器の基本的な特長は変流器と違って2次側に出力機能を持たないので励磁電流を発生させる必要がない。(このような電流比較器を以降、受動型電流比較器と呼ぶ)このため、受動型電流比較器では漏れ磁束と容量性電流の対策が課題となる。ちなみに、式(4)の同相誤差 ϵ_p と直角相誤差 ϵ_q の発生原因は商用周波数においてそれぞれ漏れ磁束と容量性電流が主に寄与している。

2.1 漏れ磁束対策

漏れ磁束 ϕ_e とは主磁束 ϕ_m 以外の、つまりコアから漏れ出る磁束である。主磁束とは1次および2次巻線(以降、比巻線と呼ぶ)により発生する全磁束 ϕ_0 のうちコアを通してお互いに鎖交する磁束に限られる(つまり、相互インダクタンスを構成する磁束である)。結合係数 k を用いて以上の磁束を表すと、主磁束 $\phi_m = k\phi_0$ 、漏れ磁束 $\phi_e = (1-k)\phi_0$ となる。漏れ磁束は、巻線の形状、巻数、巻き方、コアの形状・材質などに依存しやすい。このため、結合係数もまた複雑となる。長年にわたる研究と技術の向上によって漏れ磁束を抑制してきたが、完全に無くすることはできない。

電流比較器の場合、コア中の磁束を検出する検出巻線に漏れ磁束が鎖交することは誤差を引き起こす原因になる。比巻線からの漏れ磁束や外部磁界による検出巻線への鎖交を抑制する技術としてシールドが用いられる。シールドには磁気シールドと銅シールドがある。磁気シールドはコアと同様に透磁率の高い材質(スーパーマロイ、パーマロイ)が使われ、漏れ磁束を磁気抵抗の低いシールド内に吸収する。一方、銅シールドは電磁誘導作用により漏れ磁束が通るとそれを除外しようとする誘導起電力が発生し渦電流が流れ、その通過を抑制する。この磁気遮断効果は周波数に比例するので商用周波数よりも高周波域での適用が期待できる。また磁気シールドの保護材や静電シールドとしても役立つ。N.L. KusterやW.J.M.Mooreらは、漏れ磁束をシミュレートするために様々な外部磁界を発生させ、各種シールドおよびそれらの組み合わせによるシールド効果の実験的検証を行った^{1),2)}。

2.2 容量性電流対策

容量性電流は、図2で示したように各比巻線間、比巻線相互間および比巻線対アース間の各分布容量に流れる電流である。そのため、各比巻線に入る電流と出てくる電流が絶対値および位相において異なる。容量性電流は各分布容量に電位差が存在するために流れる。電位差はこの場合、1次および2次インピーダンス(比巻線の巻線抵抗と漏れリアクタンスの和)間に生じる電圧降下が主要因となる。また容量性電流は巻数、周波数の2乗に比例する。なぜなら、巻数や周波数の増加は1次および2次インピーダンスを上昇させ電圧降下が大きくなるばかりか、容量性アドミッタンスさえも上昇するために容量性電流は流れ易くなるからである。

容量性電流を抑えるために分布容量、1次および2次インピーダンスを低下させる工夫がなされる。また一方で、巻数の多い2次巻線間の電圧降下を抑制する方法も報告されている。これは、2次側に起電力を発生させてターン毎の電圧降下をキャンセルさせる手法である。例えば、励磁巻線という2本から成る巻線は図3(a)に示すように同じ巻数で直列に、しかも磁気シールド内と外に巻装することで、シールドのみを励磁させ2次巻線に起電力を誘起させている。この方法は別に電源が必要であり、また巻装が大変である。このため補償巻線を導入する方法が一般的である。この方法は図3(b)に示すように、補償巻線が2次巻線と並列に接続し、シールド内部のコアに巻装される。このような構造は2段変流器(2-Stage CT)の原理を応用したもので、磁気シールドを変流器のコアとして働かせることによって2次巻線に起電力を発生させ、補償巻線には励磁電流に相当する電流が流れるように補償したものである(このような補償巻線を使用した電流比較器を以降、補償型電流比較器(Compensated Current Comparator)と呼ぶ。

2.3 2 段変流器

電流比較器を利用して校正試験を行う際、移送用標準器や参照用変流器などの標準変流器を被試験器とするのが通常である。標準変流器は実際に変流器として機能することが求められるため、励磁電流を補償する構造をとる^{3),4)}。励磁電流を補償する技術として、前述した2段変流器が一般的に挙げられる。2段変流器の原理は1922年にH.B.BrooksとF.C.Holtzによって報告され⁵⁾、1957年にI.Obradovicらによって電流比較器が開発された頃から注目されるようになった⁶⁾。2段変流器の原理を図4に示す。その構造は比巻線が巻かれた2つのコア(A、B)とコア

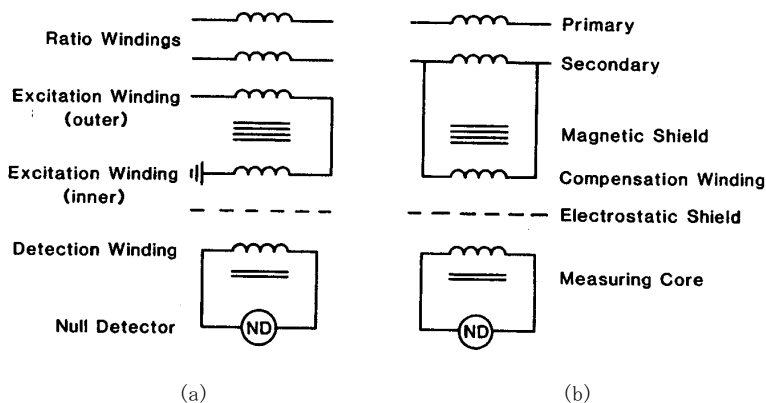


図3 励磁巻線と補償巻線²⁾

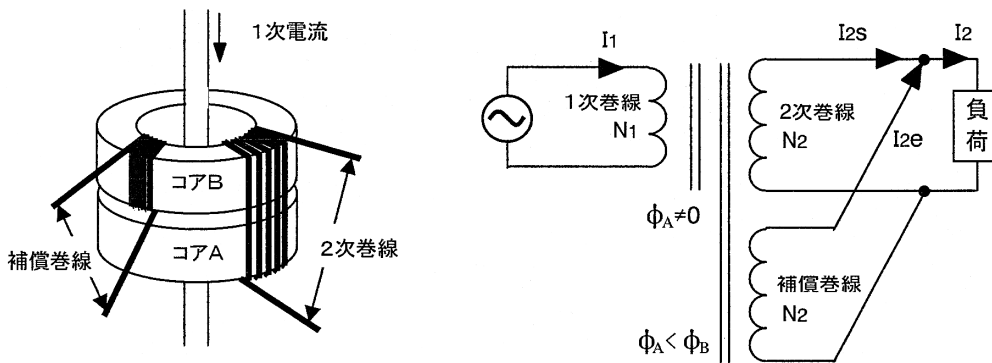


図4 2段変流器の原理⁷⁾

Bにのみ巻いた補償巻線で構成される。補償巻線を2次巻線と並列に接続すると、回路図は右図のようになる。この時、コアAと比巻線で構成する部分では変流器として機能し、2次側で発生した2次電流を電流源として考えることができる。すると、コアB、比巻線、補償巻線で構成される部分は図2で示した受動型電流比較器に類似した構造として考えられ、コアB中に残存している磁束(アンペアターンの差分)を補償巻線で検出するように働く。補償巻線を2次巻線の巻数と同じにすれば、励磁電流分を補償巻線で回収できるようになる。

原理は以上のものであるが、励磁電流を回収して2次側に加算するために、図4のように補償巻線をそのまま2次側に接続すると、補償巻線の両端に2次電圧がそのまま加わることになる。その場合、補償巻線間の電圧は2次電圧と等しくなろうとするため、コアBではその分の磁束を発生させなければならない。結果的に、励磁電流がコアBの励磁インピーダンスに流れてしまい、補償することができなくなる。このため、補償巻線間の電圧をゼロに保ち、かつ励磁電流を2次側に加算するためにオペアンプが利用される(図5)。この時、コアAを中空のトロイダルとし、コアBをその中に入れた構造をとると、コアAが磁気シールドとしても利用できる。

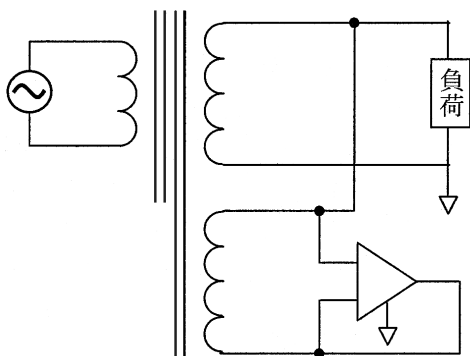


図5 2段変流器の実用的な一例³⁾

3. 各国標準機関の動向

電流比較器は前述したようにユーゴスラビアのI.Obradovic, P.Miljanic, S.Spiridonovicによって開発された後、カナダNRCのN.L.Kusters, W.J.M.Mooreによって比較試験法による変流器校正回路として実用化された。さらに、彼らはE.Soや当時NBSのO.Petersonsとともに電流比較器の精度向上に努め、またその技術を応用した様々な電気標準を開発するに至っている。各国のNMIの持つ電流比標準はNRCの技術に基づく傾向にある。電流比標準に関してBIPMのAppendix Cには現在20カ国のNMIの校正能力(CMC)が登録されている。主要なNMIのCMCを表1にまとめた。同表に示すように、主要なNMIでは校正可能な最大試験電流は10kA以上である。ただし、イタリアのIENやブラジルのINMETROのように、現在は電流範囲1kA程度までであるが登録されているNMIもある。20カ国全てのNMIの最大試験電流は平均するとおよそ18kAとなる。NMIJの電流比標準は今年から供給が開始され、現在の最大試験電流は50Aである。NMIJの電流比標準がAppendix Cに登録されるには国際比較に参加できるように電流範囲の拡張が必要である。

代表的な国際比較を表2に示す⁸⁾⁻¹⁰⁾。電流比較器が確立された当初は試験電流60kAによる国際比較がNRCとPTBで行われたが、それ以降の国際比較は1kA以下の試験電流で行われた。MRAに調印したヨーロッパ諸国のNMI間で実施された大規模な国際比較EUROMET No.473は補完比較として登録されている。現在、ヨーロッパ以外のNMIを含んだ基幹比較あるいは補完比較の実施が検討されている。このように国際比較に参加するにはまず電流範囲の拡張が急務である。EUROMET No.473で行われた1kAまでの試験点は参考値とする。更なる拡張については国内事情を考慮しながら解決しなければならない課題と考えている。

表1 主要なNMIの変流器に対する校正能力

Country	NMI	Current Ratio [A/A]	Frequency [Hz]	Uncertainty (k=2)	
				In-phase [ppm]	Quadrature [μ rad]
Australia	NMIA	0.05/5 - 20 k/5	50	1-10	1
Canada	NRC	0.025/5 - 60 k/5	50, 60, 400	10	10
Germany	PTB	0.05/5 - 100 k/5	16.7, 50, 60	5-30	5-50
United Kingdom	NPL	0.25/5 - 10 k/5	50	10	10
United States	NIST	0.25/5 - 12 k/5	50, 60, 400	10	10

表2 代表的な国際比較

Time	Current Ratio	Frequency	Burden	NMI	Others
1978	40 k-60 kA /5 A	50/60 Hz	0 VA	NRC, PTB	
1982-1983	1-200 A/1 A 5-200 A/5 A	50/60 Hz	1 VA	METAS NIST, NPL, NRC	Pilot: METAS
1999-2000	1-1000 A/5 A	50/60 Hz	5 VA	13 NMI's in the EU	Pilot: NPL EUROMET 473, 612

一方、不確かさについて表1を外観すると、主要なNMIの校正能力は比誤差10ppm、位相角10 μ rad付近であるが、登録されているNMI全体のCMCを見ると、比誤差1~200 ppm、位相角1~150 μ radとばらつく。以上から、主要なNMIと同等レベルの電流比標準は、少なくとも電流範囲10kA以下、不確かさ10ppm以下の校正能力を持つことが望ましいだろう。電流範囲を拡張すると、2次巻線の巻数が多くなることからターン毎に課せられる電圧配分が軽減され、その分の磁束を必要とせず、励磁電流が低下する。しかし一方で、2次インピーダンスと分布容量が増加するため、容量性電流の増加や自己発熱による抵抗変動の増大につながる。

NRCにおける変流器の校正試験回路を図6に示す。被試験器を校正するために、補償巻線に流れる電流を電流発生回路からの微小電流により調整し、バランスさせる方法が行われている²⁾。この発生回路については各NMIによって独自に開発されている。概して2次電流を変流器やシャントによって信号レベルに変換し、RとCによって同相と直角相の成分をつくり、電子回路によるコンダクタンスを通して誤差電流分を発生させる構造が一般的ようである。

オーストラリアのNMIAの校正能力値について表1では1~10ppm、1~10 μ radと示されている(ただし、1ppmは5A/5Aの場合である)。NMIAの電流比標準には2段変流器が採用されており、ニュージーランドのMSLもその技術に基づいて開発が進んでいる^{11),12)}。2段変流器による変流器の校正試験回路は検出巻線を使用せず、2次側に検出器が直接取り付けられてブリッジ回路を構成している。

絶対校正方法については、NRCと同様にビルドアップ式が採用されている。その校正方法は図7に示すように、予め校正された2つの電流比較器(比: m/1とn/1)を標準とし、それぞれ(m+n)/1と(m*n)/1の電流比較器を校正している。このように絶対校正では3台の電流比較器もしくは3台の2段変流器が必要であり、特に電流比較器では2台の交流電源が必要となる。最近、Appendix Cへの登録を目指すNMIによって電流比標準の開発が活発に行われている。特にMSLおよびNMIJによって絶対校正の新しい手法が報告された^{13),14)}。MSLはNMIAの技術に基づいた2段変流器の絶対校正方法を改良し、2台の2段変流器と1台の電源による校正手法を開発した。一方NMIJでは電流範囲50Aまでであるが、1次および2次側ともにバイナリ一型の電流比較器が作成され、1台の電流比較器と1台の電源で絶対校正方法が確立されている。

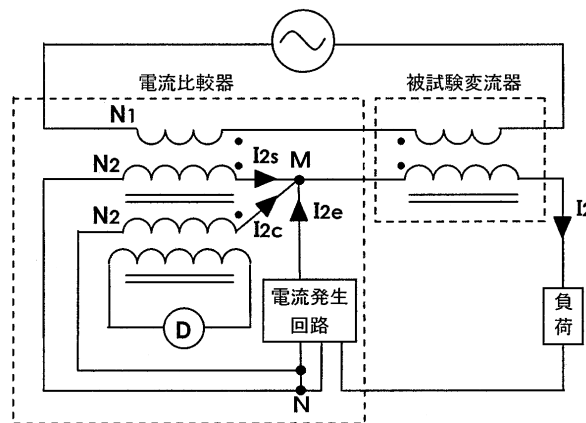


図6 変流器の校正試験回路²⁾

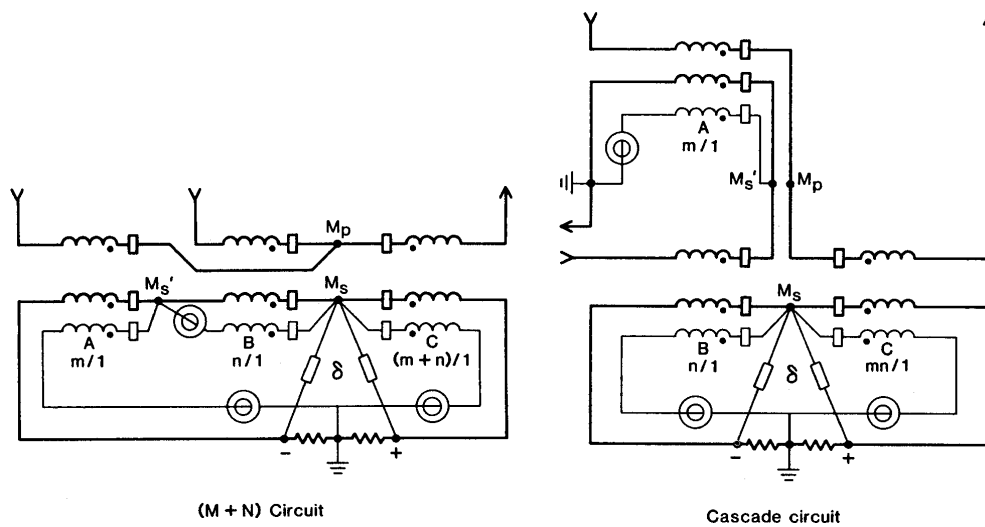


図7 ビルトアップ式による絶対校正試験法²⁾

4. 各国のトレーサビリティおよび法定計量の現状

電流比標準のトレーサビリティは、大抵の場合、法定計量と深く絡んでいる。トレーサビリティ下で電流比標準が最も必要とされている被試験器はほとんどの場合、特定計量器である電力量計 (electricity meters, watt-hour meters) の電流検出用の変流器と考えるとよい。この変流器は配電系統の大電流を小電流 (定格1 Aあるいは5 A) に変換する。

変流器の動向は電力量計の動向に大きく影響される。国際法定計量機関OIMLからの国際勧告R46は電力量計の定格値を明示していないが¹⁵⁾、IEC規格 (62052-11) は50 Aを超える場合の電力量計の使用には変流器を併用することが定められている (例外を含む)¹⁶⁾。変流器を併用する電力量計を単独電力量計 (direct connected meter) に対して、変成器付電力量計 (transformer operated meter) と呼ばれる。

現在のところ、国際勧告R46は単独電力量計でしかも誘導型のみを対象にしているが、IEC規格には単独電力量計は勿論、電子式および変成器付電力量計まで規格化が進んでいる。このように国際勧告R46が最近の電力量計の進歩に対応していない現状から、EU諸国の規制機関では主にIEC (EN) 規格 (62052, 62053シリーズ) に基づいた電力量計の規則 (code) を、アメリカ諸国では主にANSI規格 (C12シリーズ) に基づいた規則を、それ以外の国々は独自の規格に基づいた規則を策定している傾向にある^{17),18)}。(それぞれの規格で最も違いが現れているのは階級 (class) である。例えばIEC規格は精度で、

ANSI規格は定格電流で、JIS規格では契約電力でクラス分けされている。) 表3に、各国の電力量計および変流器に関する法定計量規則と規格との対応関係をまとめた。

変流器の検査 (inspection) では、認定された検査試験場、製品メーカおよび電力会社において参照用変流器と比較試験がなされて合格が判定される。参照用変流器の校正には各認定事業所が所有している二次標準 (secondary standard) との比較試験が行われたり、NMIに校正依頼する場合もある。以上が、典型的な電流比標準に関するトレーサビリティである。この他に、トレーサビリティに含まれる変流器には、単独電力量計の検定時に参照用単独電力量計と併用される変流器、および電力系統で使用される計測用および保護用変流器などが含まれる。

表3 各国における電力量計と変流器の規格と規則

国	電力量計の規格	変流器の規格	規則
Canada	CSA C17	CSA C13	LMB-EG-07
USA	ANSI C12 series	ANSI C12.11 (IEEE C57.13)	州により異なる
Australia	AS 1284	AS 1675	NSC M6
EU	IEC 62052, 62053 MID Annex MI 003	IEC 60044-1, 8	
Japan	JIS C1211, C1216	JIS C1731, C1736	特定計量器 検定検査規則

4.1 電力量計の動向1(電子化への流れ)

電力量計の動向をみると、特に注目する点は機械式(electromechanical)から電子式(static, electronic)化への移行である。この背景には電子式電力量計の低価格化もあるが、それ以上に電力業界の自由化の流れで、料金メニューの多様化、インターネットを利用したネットワーク化が進み、誘導型電力量計では対応できなくなっている実情がある。電子式電力量計へのこの移行は変流器にも変化をもたらしている。すなわち、トランスデューサ、ロゴスキーコイル、光CTなどの電子式変流器ECTの出現である。電子式電力量計の発達は微弱な信号で計測可能とさせ、従来の変成器付電力量計で必要とされる定格入力5Aをもはや必要としない。このため、小信号入力、デジタル入力が可能となり、ECTは電子式電力量計の長所を最大限に発揮させることができる。

ECTについては、IEC 60044-8およびANSI P1331 (draft)で規格化されており、各ECTの定格出力は表4に示すように定められている。主要なNMIではECTに対する標準が整いつつある。NRCとNISTにおいてはECTの2カ国間比較が行われ¹⁹⁾、PTBにおいても標準供給が開始されている²⁰⁾。国内においてもECTが一部で使用されているが、法的にもその使用が可能になるように整備していく必要があると考えられる。

4.2 電力量計の動向2(高調波問題)

最近の地球温暖化問題に絡んだ環境管理規格ISO 14001シリーズは、世界各国で省エネ対策を促し、電源機器、空調機器、照明機器にインバータの利用が増加した結果、高調波電流の増長を引き起こした。高調波問題は、交流電圧ではなく交流電流の波形を大きく歪ませるために電力系統の分路リアクトル、力率改善コンデンサを破損し、さらに力率低下による電力の浪費が深刻な問題となっている。この高調波電流は電力量計による測定誤差を増加させる要因となる。そのため、IEC 62053-21では特殊な高調波電流波形による電子式電力量計の精度試験が定められている。これには変成器付電力量計も該当しており、変流器においても高調波電流の計測に対応

した設計が求められ始めている。そのように設計された変流器を校正するための標準には、高周波領域まで精度の高い電流比標準が要求されることは必至である。今後の電流比標準に関する国際比較には高周波領域の内容が含まれることが予想され、NMIJではそれに対応していかなければならない。

5. 電流比標準の大電流化、高周波化、電子化

3節で述べたように、現在の主要なNMIは試験電流10kA以上の電流比標準を整備している。(試験電流10kAの標準は10kA/5Aまでの変流器を校正できることを意味する。)実施が検討されている基幹比較もしくは補完比較に参加するためにも、早急な試験電流の範囲拡張が必要である。また一方で、4節で述べたように高調波問題やECTの需要を背景に電流比標準の高周波への拡張および出力の電子化への必要性が求められる。そこで、電流比標準の大電流化、高周波化、電子化に向けて直面する問題点および対策を述べる。

5.1 電流比標準の大電流化

電流範囲の拡張には様々な方法が考えられる。一つの方法にはそのまま電流範囲の拡大(比の拡大)をする方法である。この場合、例えば10kA/5Aならば1次側の巻数を1とすると2次側の巻線は2000となる。巻数が増えた場合の誤差要因については既に先述したが、まずは巻線抵抗の上昇への対策が重要である。電流比較器への通電中には巻線抵抗による自己発熱が起こり、時間の経過に伴って抵抗変動を引き起こす。このため十分に太い巻線を使用し、巻線抵抗を低下させる。さらに容量性電流の増加にも注意すべきである。巻数が増えることは分布容量の増大および2次インピーダンスによる電圧降下の増大に繋がる。巻線抵抗による電圧降下は先述のように太い巻線を使用するにしても、漏れリアクタンスと分布容量の増大を抑制するのはこれまでの経験やノウハウが必要となる。T.M.Souders (NIST)は巻線抵抗を低くすることで、1200A/5Aまでは容量性電流による誤差は1~2ppm

表4 ECT仕様の定格出力(アナログの場合)

規格	種類	CTとシャントの組合せ	ロゴスキーコイル	コンバータ電子回路 (鉄心CTや光CTとの組合せ)
IEC 60044-8	計測用	22.5 mVrms, 225 mVrms	150 mVrms	4 Vrms
	保護用	22.5 mVrms, 225 mVrms	150 mVrms	200 mVrms
ANSI P1331	計測用	2 Vrms	2 Vrms	4 Vrms
	保護用	200 mVrms	200 mVrms	200 mVrms

以下にすることができると述べている²¹⁾。

図6で示したNRCによる補償型電流比較器では、受動型電流比較器と違って変流器として機能するために2次側の起電圧によって2次インピーダンスによる電圧降下を補償することができる。また、補償型電流比較器では励磁電流について考慮する必要があるが、励磁電流は巻数の増加（比の増加）に伴って減少する。これは、巻数の増加によって少ない磁束で2次電圧を誘導できるためである。

電流範囲の拡張の二つ目の方法は、受動型電流比較器と標準変流器の併用である。図8のように変流器の校正に対して標準変流器を使用し、それぞれの2次側を受動型電流比較器に接続する。この場合、標準変流器の電流比を被試験用変流器のそれと全く同じする必要がない。例えば、2000A/5Aの標準変流器が2次側20Aまで校正すれば、8000A/20Aの標準変流器として使用でき、電流比較器の巻数比を適切に選択してバランスさせることが可能である。このような電流範囲の拡張方法は一般的に広く普及されている方法である。しかしながら、更なる電流範囲（10kA以上）の拡張には高い電流比の標準変流器を校正が必至となり、それに応じた電流比較器が必要となる。

NRCとPTBは非常に高い電流比の標準を所有している。ここではNRCの大電流用の標準を紹介する。この方式は2つの補償型電流比較器を図9のようにカスケードにする方法である。前段の電流比較器は後段のそれと連結させるために、前段の補償巻線は後段の電流比較器内にその1次巻線と同じ巻数の別の補償巻線とで直列接続されている。またバランスさせるために、点Mと同極性のM'を同様に補償巻線を介して接地し、両者の補償巻線間の電圧をゼロ（接地電位）になるように、言い換えれば検出器がナルを示すように電流発生回路で調節する。

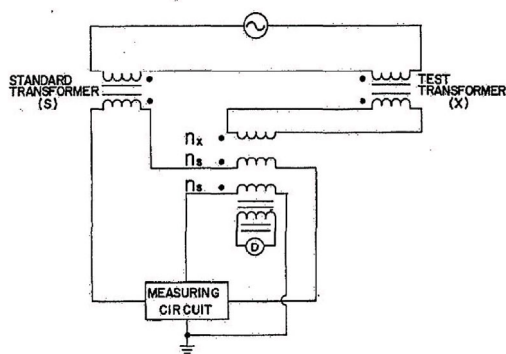


図8 受動型電流比較器と標準変流器を併用した校正方法²¹⁾

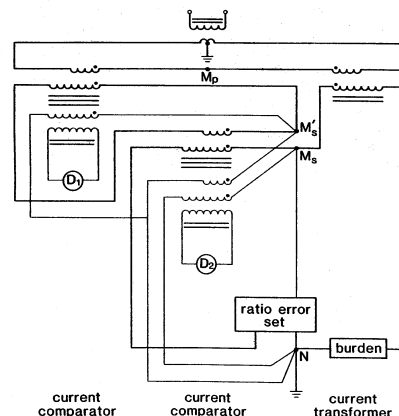


図9 カスケードによる高電流比標準とその校正試験回路 (60kA/5A)²⁾

5.2 電流比標準の高周波化

高周波化への要望には先に述べた高調波問題が主にその背景にある。IEC62053-21によって特殊な高調波電流波形（21次高調波まで考慮）による電子式電力量計の試験基準が定められている。この中には勿論、変成器付電力量計も含まれているため、各NMIで電流比標準の高周波化への対応およびその国際比較の実施は十分考えられる。NRCとNISTは商用周波数（50, 60Hz）以外にも航空用周波数（400Hz）の電流比標準を持っており、1965年に16kHz以下の電流比標準の国際比較が行われている²²⁾。NMIJにおいてもこれに対応し、2010年までに1kHzまでの電流比標準の整備が進められている。

高周波領域では分布容量による誤差が危惧される。しかし、高調波問題の対象となる高調波電流は高次になるほど低下するので、電流範囲をそれほど拡大しないで済む。「家電・汎用品高調波抑制ガイドライン」で規定された限度値を参照すると、例えば20次高調波電流は5%（奇数高調波）、4%（偶数高調波）以下にまで低下する。すなわち、商用周波で試験電流1kAまでの電流比標準に対して、20次高調波電流については50Aまでの電流比標準を作ればよい。このため、比を大きく（2次巻線の巻数を多く）設定しなくて済み、2次巻線間の容量性電流は深刻な問題とならないだろう。

一方、周波数の増加はコアと磁気シールドの比透磁率を低下させる。この低下はおよそ反比例的であり、特にパーマロイなどの金属系で著しい傾向を示す。コアの比透磁率の低下は感度を比例的に低下させるが、感度は周波数に比例して上昇するのであまり問題とならない。問題となるのは漏れ磁束や外部磁界に対する磁気シールドの遮断効果である。NRCでは銅シールドを磁気シールド

の内外に設けることによって遮断効果を補填したり、コアからの漏れ磁束を抑制させている²³⁾。また、周波数に対して安定な特性を持つアモルファス磁性体をシールド材やコア材として使用することも有効である。

前述のように商用周波数で10kA/5A以上の電流比標準を整備する場合、それに伴って1 kHz付近で500A/5A以上の電流比標準を用意すれば、高調波電流に対する変流器の校正ができる。しかしながら、高周波領域で電流比が大きくなると、2次巻線の巻数増加から2次インピーダンスの増加、分布容量の増加へとつながり容量性電流を大きくする要因となる。巻線に流入（流出）する電流 I と起磁力の発生に寄与する電流 I' （容量性電流を差し引いた電流）との関係を式で表すと、

$$I' = (1 + \omega^2 LC - j\omega CR)I \quad (5)$$

(L : 漏れインダクタンス, C : 巻線間の分布容量,
 R : 巻線抵抗)

となり、比誤差は周波数の2乗で比例、位相角は周波数に比例する²⁴⁾。このように分布容量による誤差への対策には L , C , R を可能な限り小さくさせることが重要となる。巻線の選定、巻き方への細心の配慮は不可欠である。その他の分布容量による誤差対策には、2節で述べたようにNRCによって提案された励磁巻線や補償巻線を使用した方法がある。

5.3 電流比標準の電子化

電流比標準の電子化とは、従来の電流比標準からの出力を低電圧化し、被試験器であるECTの出力（アナログ信号あるいはデジタル信号）と比較する校正方法を確立することに他ならない。アナログ信号の場合は両者の出力電圧信号を比較する校正システムが必要であるし、デジタル信号の場合はDA変換器を用いてアナログ信号に変換させる必要がある。

EVTと併用すればECTの可能性として、出力信号を各大口需要家の電力量計を介さず、光ファイバーなどのインターネット回線を利用して直接電力会社に伝送することも将来的には考えられる。実際、電力系統の電流監視にはこの技術が使われている。今後ますますECTの需要増加が見込まれる。

6. 国内の標準供給および法定計量の実情と今後の対応

現在、国内の変流器に関わる標準供給および法定計量については、その多くの業務を日本電気検定所（JEMIC）に委ねている。ここでは交流電流比標準となる特定標準器を所持している。この標準を利用して二次標準器が定

期的校正され、さらに二次標準器によりJEMIC各支社および変流器メーカーの参照用変流器が校正される。さらにその各参照用変流器を使用して、JEMIC各支社では電力量計に併用される変流器が検査され、メーカーでは製品となる変流器の校正が行われる。以上が国内のトレーサビリティである。

今年度よりNMIJの電流比標準が～50A, ～120Hz, 1/1～1/100について標準供給を開始した。しかし、現在のトレーサビリティの中でNMIJの電流比標準が特定標準器となるには、国際比較への参加に向けて試験電流範囲の拡張を目指し、さらに今後のニーズとなり得るECTの標準整備や電流比標準の高周波化などの確かな標準供給を整えることが望ましい。

一方で、新たな電流比標準は技術的整備だけでなく、制度的整備が整って始めて機能する。そのため、電流比標準に関わる制度上の実情を取り上げ、将来的に課題となりうる点をまとめる。

6.1 法定計量

新計量法により指定製造事業者制度を設けられ、電気計器においても指定製造事業者による自主検査が行われている。JEMICでは年約800万台の電気計器を検定するが、そのうち変成器付電気計器はその3～4%を占めている。変流器に関しては約10万台が検査される。

時間別料金メニューの需要や電力管理の義務により、電子式電力量計の役割は不可欠となりつつある。電子式電力量計にも高精度・高信頼・高集積の利点から、アナログ計測からデジタル計測への流れが強まっている。海外では電話回線などの通信媒体と電力量計とによる遠隔メータリングシステムが既に整備されており、検針コストの低減、的確な電力需要情報による効率的な電力供給などが実現されている。国内においても一部で実施が開始されている。また、ロゴスキーコイルは送配電系統における保護用変流器として使用され始めている。

6.2 国内外の規格の実情と今後

以上に述べた法定計量は、計量法の特定計量器検定検査規則に則る。OIMLによる法定計量の国際化の流れの中で、国内ではさしあたって特定計量器検定検査規則をJIS化へと移ることを基本方針としている。そこで、変流器に関連するJIS規格とIEC規格との相違点を検討する。国内規格には、標準用および一般計測用変流器（JIS C 1731-1:1998）、計器用変成器（電力需要用）（JIS C 1736）および高圧受電用地絡・家電電流継電器（JIS C 4601, 4602）についてJIS規格があり、また保護継電器用変成器

(JEC 1201:1996) のJEC規格がある。いずれも国内事情を理由に、国際整合化への対応は困難であるという姿勢をとってきた。JIS規格がIEC規格、特にIEC 60044-1と大きく相違するところは、定格過電流強度の使用など従来通りの耐電流試験が現行する点、各種接地方式に関する点、絶縁性能試験などの形式・受入試験内容がJIS規格では重複する点などが挙げられる。

一方、国際規格については、計器用変流器（計測用および保護用）(IEC 60044-1 : 1996) を始め、計器用変圧変流器 (IEC 60044-3 : 2002)、保護用変流器 (IEC 60044-6 : 1992) に関する規格のみならず、ECT（計測用および保護用）(IEC 60044-8 : 2002) やインターネット技術による電力系統内の計測管理ネットワークシステム（ECT用）(IEC 61850-9-1 : 2002) など世の中のニーズに俊敏な対応している。

このように国内の規格整備が遅れている状況、かつ法定計量の国際整合化への流れに迅速に対応するには、IEC規格あるいはANSI規格に準拠した規格作りを推進すべきであると考えられる。

7. まとめ

電流比標準の基礎となる変流器を述べ、その応用となる電流比較器について紹介した。国外の動向については各国の校正能力をまとめ、NMIJの持つべき標準について提案した。また国外の法定計量の現状に触れ、電力量計に関わる動向とそれに付随して今後のニーズとして注目される電流比標準について取り上げた。このような国外の動向を概観し、NMIJが必要とする電流比標準の大電流化、高周波化、電子化への問題点とその対策を述べた。最後に今後の電流比標準に求められる制度的整備について触れた。以上を踏まえ、今後の方針をまとめる。

- ① 国際比較に参加するための電流比標準の早急な整備（標準の大電流化）
- ② 高調波電流に対する電流比標準の整備（標準の高周波化）
- ③ 電子式変流器（ECT）を校正するための標準整備（標準の電子化）
- ④ IEC（ANSI）規格に準拠したJIS規格作りへの積極的な推進

これからの実施にあたっては、3節に述べたように特定標準器を所有している日本電気計器検定所（JEMIC）と協力関係を保ちながら日本としての統合的な交流電流比標準の構築を目指さなければならない。

参考文献

- 1) O. Petersons: "A Wide-range High Voltage Capacitance Bridge with One ppm Accuracy.", Dissertation papers, 1974.
- 2) WJ.M.Moore and PN.Miljanic: "The Current Comparator.", *IEE Electrical Measurement Series 4*, Peter Peregrinus Ltd, 1988.
- 3) 高橋 "把握式変流器のための誤差補償回路", 電気学会論文誌A, vol.108, No.9, pp.383-388. 1988.
- 4) 久保嶋, 浅井 "電子式標準変流器について", 電気学会計測研究会 IM-00-10, 2000.
- 5) H.B.Brooks, F.C.Holtz: "The two stage Current Transformer.", *AIEE Transactions*, Vol.41, pp.382-391, June 1922.
- 6) I.Obradovic, P.Milfanic, S.Spiridonovic: "Testing of Current Transformers with a Current Comparator and an Auxiliary Electrical System.", *Electrotech. Z. Ausg. A.*, Vol.78, No.19, pp.699-701, October 1957.
- 7) P.J.Betts: "Two-stage Current Transformers in Differential Calibration Circuits.", *IEE Proceedings*, Vol.130, Pt.A, No.6, pp.324-328, 1983.
- 8) A.Braun, H.Dannerberg, WJ.M.Moore: "An International Comparison of 50-60-Hz Current-Ratio Standards at Currents up to 60,000A.", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.27, No.4, pp.430-433, 1978.
- 9) W.Schwitz, R.Kampfer, A.Braun, T.M.Souders, WJ.M.Moore, B.R.Cassidy, T.A.Deacon: "International Comparison of Current Transformer Calibrations.", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.34, No.3, pp.234-237, 1985.
- 10) S.A.C.Harmon, L.C.A.Henderson, A.J.Wheaton: "Comparison of the Measurement of Current Transformers: EUROMET Project 473 and 612", *CPEM Digest*, pp.546-547, 2002.
- 11) P.J. Betts: "Two-stage current transformers in differential calibration circuits.", *IEE Proceedings*, Vol.130, Pt. A, No.6, pp.324-328, 1983.
- 12) P.J. Betts, W.K. Clothier, H.A. Smith: "Method for the Absolute Calibration of Current Transformers.", *IEE Proceedings*, Vol.129, Pt. A, No.5, pp.322-327, 1982.
- 13) A.C. Corney: "Simple Absolute Method for Current Transformer Calibration.", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.50, No.2,

- pp.278-281, 2001.
- 14) T. Takahashi: "Evaluation of Errors in a Current-Comparator System Used for Current Transformer Testing.", *IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement*, Vol.38, No.2, pp.402-406, 1989.
- 15) OIML: "Active Electrical Energy Meters for Direct Connection (Class 2)", *International Recommendation No.46*, October 1976.
- 16) IEC: "Electricity metering equipment (AC) – General Requirements, Tests and Test Conditions – Part 11: Metering Equipment", *IEC 62052*, 2003-02.
- 17) National Standards Commission: "Pattern Approval and Initial Verification of Electricity Meters and Associated Transformers: Definitions, Metrological and Technical Requirements", *NSC 6, 1st revision*, Australia, October 2001.
- 18) Metering International:
http://www.metering.com/archive/032/44_1.htm,
2003-02.
- 19) E.So, R.Arseneau, D.Bennett, T.L.Nelson, B.C.Waltrip: "NRC-NIST Intercomparison of Calibration for Current Transformer with a Voltage Output at Power Frequencies.", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.52, No.2, pp.424-428, 2003.
- 20) H.G.Latzel, G.Roeissle, H.Moser, G.Ramm: "Calibration Scheme for Electronic Voltage and Current Transformers with Analogue Voltage Output.", *13th ISH*, 2003.
- 21) T.M.Souders: "A Wide Range Current Comparator System for Calibrating Current Transformers", *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol.PAS-90, No.1, pp.318-324, 1971.
- 22) B.L.Dunfee, W.J.M.Moore: "An International Comparison of Current-Ratio Standards at Audio Frequencies", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.IM-140, No.4, pp.172-177, 1965.
- 23) N.L.Kusters, W.J.M.Moore: "The Development and Performance of Current Comparators for Audio Frequency", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.IM-14, No.4, pp.178-190, 1965.
- 24) 高橋: "電流比較器を用いた変流器試験システムの試験精度の一推定方法について", *電気検定所技報*, 第24巻, 第3号, pp.61-69. 1988.