

分散型電源の要素技術とその精密電気計測に基づく 評価法の調査研究

村松秀和

(2021年2月5日受理)

A survey on technology for evaluating elements of distributed energy resources based on precise electric measurement

MURAMATSU Hidekazu

Abstract

Distributed energy resources (DER) are next-generation energy supply systems that link various power generation facilities and power storage systems. Evaluating power storage devices and inverters, which are key components of DER, require non-destructive precision electrical measurements under operation of the components. This report addresses the present status of current power and impedance standards and the future prospect from the view point of DER evaluation.

1. 序論

日本のエネルギーシステムを取り巻く状況は依然厳しいままである。日本の電力システムにおける総発電量に占める各電源の割合は、火力83%、原子力2%、再生可能エネルギー15% (2016年時点)¹⁾であり、そのほとんどを占める火力発電のエネルギー源である化石燃料は海外からの輸入に依存している。これは、海外で生じたエネルギー供給上の問題や、近年大幅に増大している新興国でのエネルギー需要の影響を強く受ける懸念が生じることを意味する²⁾。また、化石燃料の利用は、主要な温室効果ガスであるCO₂の排出をもたらし、日本が世界有数のCO₂排出国である要因となっている。

1970年代に発生した石油危機以来、我が国では化石燃料の代替を進めるため、原子力や再生可能エネルギーなどの導入量を増加させてきた。その結果、2010年におけるエネルギー自給率は約20%まで改善された。しかし、2011年3月の東日本大震災及び福島第一原子力

発電所事故に伴い原子力発電所の停止を余儀なくされ、2016年のエネルギー自給率は8%程度まで落ち込んだ²⁾。また、2016年11月にはパリ協定が発効され、21世紀後半までに世界全体での人為的なCO₂排出量を吸収源による除去量と均衡させることを目標とした³⁾。このような状況の中、日本政府は2014年4月に第四次エネルギー基本計画⁴⁾、2018年5月に第五次エネルギー基本計画²⁾を策定し、2030年ならびに2050年までの中長期計画を定めた。このエネルギー基本計画では、「3E+S」(Energy security: 安定供給, Economic efficiency: 経済効率性, Environment: 環境適合, Safety: 安全性)を基本的視点とした”多層化・多様化した柔軟なエネルギー需給構造”の構築を目指すことが掲げられている。そのために、多種多様なエネルギー源をバランスよく活用(エネルギーミックス)し、リスク分散を図り、脱炭素化を進めてゆくと宣言しており、2030年にはCO₂を排出しないゼロエミッション電源(原子力、再生可能エネルギーなど)の比率を44%程度とすることを見込んでいる。そのうち、再生可能エネルギーは約24%を目指している⁵⁾。これにより、2030年のCO₂排出量を

* 物理計測標準研究部門応用電気標準研究グループ

2013年に比して26%削減するというパリ協定に基づいて自主的に策定した目標を達成することを宣言している。

分散型電源は、再生可能エネルギーなどの比較的小規模な発電装置を分散配置する電源の総称で、従来の大規模発電所とは対極的な電源設備といえる。2012年7月の固定価格買取制度（Feed-In Tariff, FIT）の導入により再生可能エネルギーの普及が進んでおり⁵⁾、エネルギーミックスの2030年の目標実現に向けてますます導入量が増加していくと考えられる。しかし、分散型電源の導入にあたっては低コスト化や慣性力の確保、各デバイスの性能向上やエネルギーマネジメントシステムの高度化などの技術課題を解決し²⁾、電力の安定供給、さらには将来的な再生可能エネルギーの主力電源化のために課題解決に取り組んでゆく必要がある。特に、分散型電源システムと、これを構成する要素機器に対して、所望の性能を有し、または維持しているか否かを確認するための評価法を確立することは、分散型電源による電力の安定供給の要となりうる。

以上を踏まえ、本稿では分散型電源の要素技術及びその評価技術について調査した結果を報告し、精密電気計測・電気標準の観点から分散型電源の導入に向けて解決すべき課題について述べる。

2. 分散型電源

2.1 分散型電源とその要素技術

分散型電源は、再生可能エネルギーをはじめ燃料電池やコージェネレーションシステムと併用した熱機関など多種多様で、その特徴もさまざまである。再生可能エネルギーに限っても、地熱や一般水力は安定した出力が得られる一方、太陽光や風力は出力が不安定で周波数も直流であったり低周波領域で周波数が変動するといった特徴を有している。これら特徴の異なる電源を連携運用し、系統に接続するためには周波数変動や電圧変動への対策や、パワーコンディショニングなどの様々な技術が必要である。ここでは、分散型電源システムで基幹要素となる蓄電デバイスとインバータ、エネルギーマネジメントシステムについて述べる。

2.1.1 蓄電デバイス

電力の供給量は電力需要と等しくなるよう調整されている。需要と供給のバランスが崩れると周波数変動や電圧変動が生じ、電力品質に悪影響を与える。電力品質に関する規格と基準値については文献6)にまとめられて

いる。そのため、電力システムには電力需要に対応できる調整力が求められるが、一般に調整力の高い発電方式はコストが高くなることから現在の電力システムでは様々な発電方法を組み合わせて運用されている。図1は、出力調整能力ごとに分類した各電源の1日の発電量の推移を表している。

また、電力供給設備はピーク電力に対応できるように整備されており、ピーク電力と平均電力との乖離が大きくなると、設備の稼働率が低下し、電力コストの上昇につながる。したがって、ピークシフトやピークカット、ボトムアップなどによりピーク電力と平均電力の差を小さくする電力負荷平準化が行われている。代表的な電力負荷平準化技術として、揚水式水力発電が挙げられる。これは、電力需要の少ない夜間に余剰電力を利用して下部貯水池から上部貯水池へ揚水し、ピーク時にこの水を利用して発電するものである⁷⁾。

しかし、太陽光や風力といった発電方式はその出力が季節や天候、時間帯によって変動し、非常に不安定である。加えて、現在の主要なピーク電源である揚水式水力のような調整力も有しておらず、それ単体では電力の安定供給は困難である。蓄電デバイスの利用は、再生可能エネルギーによる出力を調整し、電力負荷平準化を実現する手段の一つであり、需要家が電力網に接続することで生じる逆流や瞬時電圧変動などの問題に対しても有用である。

蓄電デバイスには、研究段階のものを含め様々な種類があり、それぞれエネルギー容量や最大出力などの特性が異なる⁸⁾。実際に利用する際には、各々の特性に見

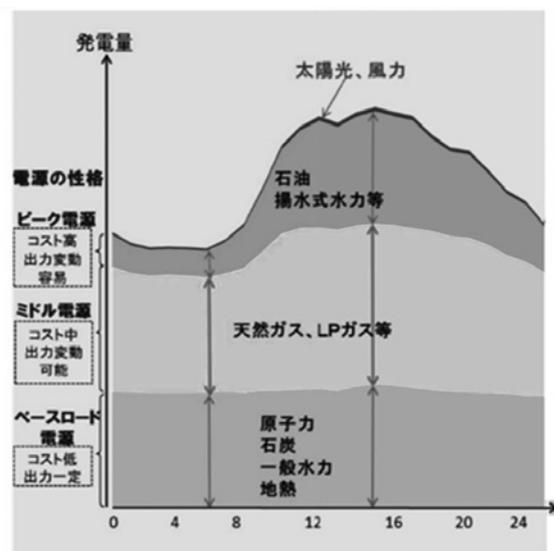


図1 電源の特性による分類⁴⁾

合った用途で使い分けており、隠岐ハイブリッドプロジェクト⁹⁾では、リチウムイオン電池とナトリウム・硫黄電池を組み合わせた蓄電システムの構築が行われた。そのほかにも様々な導入事例^{10),11)}や実証実験^{12),13)}が行われている。

2.1.2 インバータ

インバータは、省エネ対策として普及したパワーエレクトロニクス技術利用機器であり、その用途は主に可変速運転である。インバータは、供給された交流の電力をコンバータ回路により一度直流に変換してからインバータ回路により所望の周波数の電力を生成する装置である。したがって、50 Hzあるいは60 Hzで供給される電力をインバータを介して利用することで、モータの回転数を効率的に変化させることができる。

今後も省エネ対策として利用されることが見込まれるが、分散型電源システムにおいては電力の品質管理に貢献するパワーコンディショナーとしての利用機会が増加すると考えられる。太陽光や蓄電デバイスは直流、風力発電は低周波など、発電方式等により直接出力される電力の周波数は様々であり、系統に接続するためには適切な周波数制御が必須である。この制御はインバータにより可能であり、電力の安定供給に必要な不可欠な技術である。最近では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)のプロジェクト等でスマート・インバータの検討や開発が急速に進められている。これは、インバータに電力会社などの通信機能を持たせ、系統安定のために周波数変動の抑制等を行うものである。^{14),15)}

一方で、インバータの利用は高調波問題を引き起こす。インバータは、直流に整流した電流をスイッチング技術により様々な時間幅のパルスに分解し、これらを合成することで疑似的に正弦波交流の電力を生成する。よって、正弦波生成に取り込まれなかった残留電力は、望まない周波数をもった電力成分として系統に流入してしまい、結果的に系統電力の正弦波を歪ませてしまう。

2.1.3 エネルギーマネジメントシステム

分散型電源は、各電源の単独での使用は想定されており、複数の機器・装置を連携運用することが前提となっている。エネルギーマネジメントシステム(Energy Management System, EMS)は、文字通り、そのような連携を制御し、電力網の管理を行うシステムである。EMSには、その規模などからいくつかの分類がなされ

る。代表的なものは、HEMS(Home EMS)やBEMS(Building EMS)、CEMS(Community EMS)などである。

HEMSは、一般家庭におけるEMSでFITにより太陽光パネルの設置や家庭用燃料電池コージェネレーションシステム「エネファーム」や家庭用コージェネレーションシステム「エコウィル」(2017年終了)を導入する家庭が増加したことからその需要が高まっている。近年では、電気自動車と住宅を連携させたV2H(Vehicle to Home)なども普及し始めている。

BEMSやCEMSも同様に、業務用ビルや街区などのある一定範囲内のエネルギーシステムの制御を行うもので、このようなシステムで管理されたネットワークをマイクログリッドと呼んでいる。世界各国でマイクログリッドの実証実験が行われており、日本国内でも様々な検証が行われている¹⁶⁾。

2.2 分散型電源の課題と評価技術

EMSの運用にあたって重要となるのは、分散型電源システムを構成する各要素や送電される電力そのものの評価技術である。例えば、電力の供給量の調整を担う蓄電デバイスの充放電制御には充電状態の管理が不可欠である。また、インバータ利用で発生する高調波も「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制ガイドライン」やJIS C61000-3-2で定められる高調波電流値を超えないようモニタリングする必要がある¹⁷⁾。加えて、分散型電源の構成要素の劣化状態等を評価することも電力供給網の運用上重要である。以下では、蓄電デバイスの評価及びインバータの評価について述べる。

2.2.1 蓄電デバイスの評価

蓄電デバイスは、電力負荷平準化を実現するうえで欠かせない要素である一方、蓄電設備での発火事故が発生するなど安全利用に向けた課題も抱えている。したがって、蓄電デバイスの評価は、電力供給網の制御のみならず電力の安定供給や安全利用の観点からも重要である。蓄電デバイスの評価法⁸⁾のうち、釘刺試験や圧壊試験は破壊試験であり、サイクリック・ボルタンメトリー法や充放電試験はデバイスへの負担が大きく運用中の評価は難しい。一方で、交流インピーダンス測定による評価は測定対象に微小な交流信号を様々な周波数で印加し、その時のインピーダンスを測定することで評価する方法で、デバイスへの負担が小さく運用中の測定が可能である。

2.2.2 インバータ評価

インバータは前述の通り、省エネ対策のみならず直流での出力を行う発電設備などと系統を接続する場合のパワーコンディショナーとしての利用が想定され、その出力は電力品質の管理上正確に評価されている必要がある。加えて、インバータを構成する各部品は標準交換年数を目安に交換することが推奨されており、使用環境によっては交換年数を短縮する必要がある¹⁸⁾。各部品の劣化は、性能低下や故障の原因となり、そのようなインバータによる出力は系統に悪影響を及ぼす可能性がある。しかし、運用中のシステムからインバータを取り出し、評価を行うことは困難である。したがって、インバータの入力・出力間の変換効率や高調波などを電力計測により評価することは、運用中でのインバータ評価を可能とする手段の一つである。

3. 分散型電源評価に係る標準

分散型電源の各要素の評価法として、精密電気計測技術が有用であることは上述した通りである。精密電気計測においては、測定量の基準となる標準が重要な役割を果たしており、電気量に関しては産業技術総合研究所計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan, NMIJ）と日本電気計器検定所（Japan Electric Meters Inspection Corporation, JEMIC）が特定標準器の維持・管理を行っている。ここでは、分散型電源の各要素の定量的な評価の基準となり得る、電力とインピーダンスに係る標準について述べる。

3.1 電力に係る標準

3.1.1 各標準の概要

電力標準

電力・電力量の国家標準である特定標準器は、2007年に国際度量衡委員会の国際相互承認取決において指名計量標準機関として指名されているJEMICにより維持・管理されている¹⁹⁾。図2は、電力・電力量のトレーサビリティ体系を示している。電力のトレーサビリティ体系には、電力取引に関する体系（図2右側）と計量法校正事業者登録制度（Japan Calibration Service System, JCSS）校正に関する体系（図2左側）があり、いずれも特定標準器にトレーサブルな体系となっている。

図3は、特定標準器のブロック図である。多相発振器からの信号を交流電圧・交流電流発生装置で増幅し、交流電圧 V と交流電流 I を発生させ、交流電力とする。電圧はそのまま、電流は分流器（シャント）により電圧に

変換したのち電圧計で測定する。位相差 θ は、誘導分圧器及びシャントにより適切な電圧に変換された電圧と電流を位相計に入力することで測定する。得られた V 、 I 、 θ を用いて次式により、有効電力 P と無効電力 Q を得る。

$$P = VI \cos \theta \quad (1)$$

$$Q = VI \sin \theta \quad (2)$$

こうして得られた P 、 Q と被校正器物である電力計の示す値とを直接比較することで校正を行う。また、電力量はこれら電力の時間的な積算として得る。

交流電流比標準²⁰⁾

高電圧・大電流を伴う電力を計測する場合には、電力量計に計器用変成器を併用して測定を行う。計器用変成器とは、変圧器や変流器を指し、電力量計に入力される電圧や電流を測定しやすい適正な大きさに変換する役割を担っている。変圧器は後述する誘導分圧器を用いることでその変圧比の評価が可能である。ここでは、変流器の校正に係る交流電流比標準について述べる。

変流器とは、図4のように巻き数がそれぞれ N_1 、 N_2 の一次巻線と二次巻線から成り、一次巻線に入力した電流 I_1 が生成する磁束（Ampereの法則）が二次巻線と鎖交すると電磁誘導の法則により負荷に接続された二次巻線に電流が流れる。通常は励磁電流や漏れ磁束対策とし

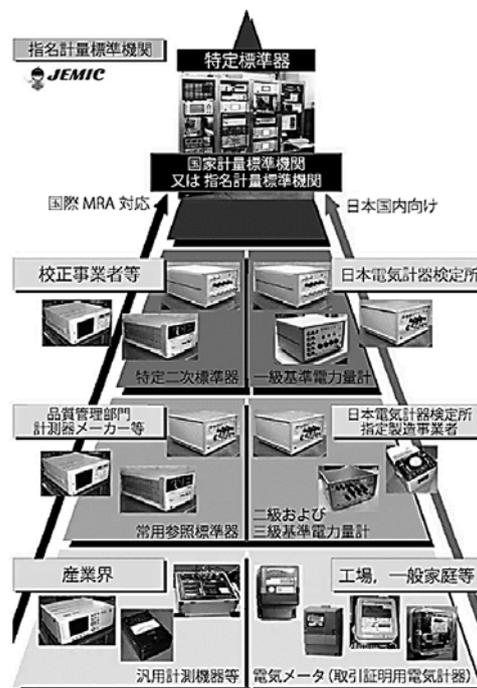


図2 電力標準のトレーサビリティ体系¹⁹⁾

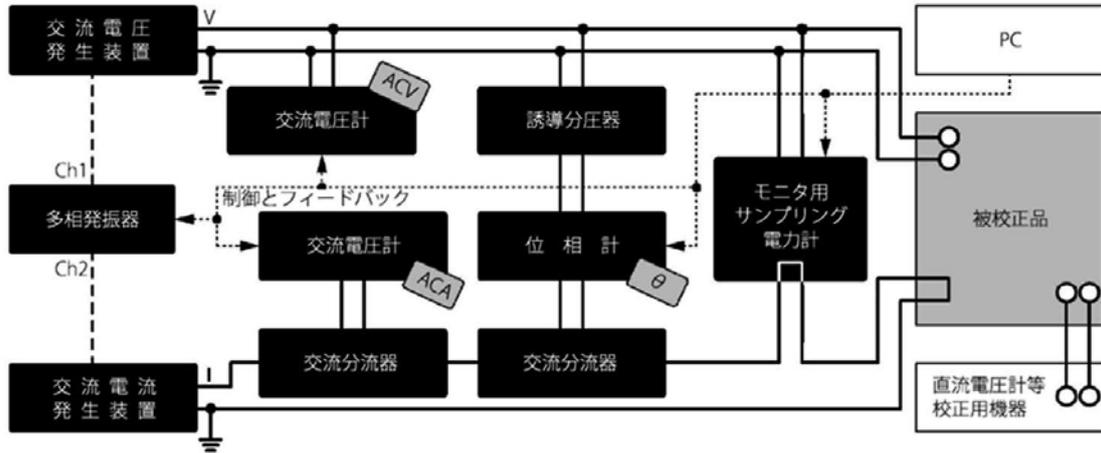


図3 電力標準の特定標準器ブロック図¹⁹⁾

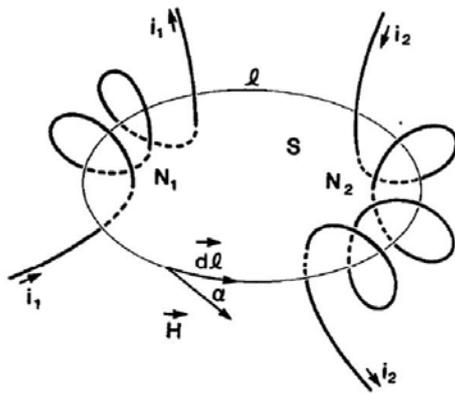


図4 変流器の構成²⁰⁾

て各巻線は高透磁率な磁性体コアに巻きつけられる。理想変流器の場合には、二次巻線に流れる電流 I_2 は、

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

である。実際には、励磁電流などの影響により電流比は巻線比からずれる²⁰⁾ため、理想比からのずれを補償するために二段変流器²¹⁾⁻²³⁾が用いられる。こうして、大電流を小電流に変換して電力量計へ入力する。NMIJでは、この標準変流器の校正に電流比較器が用いられる。電流比較器は、図5のように変流器に磁場検出機構(図の巻線 N_D)と補償機構(図の巻線 N_E)が加わった構造である。変流器との大きな違いは一次巻線にも二次巻線にも電流を入力することである。一次巻線と二次巻線は、それぞれがコア中に生成する磁束が逆向きとなるように巻かれており、生成される磁束は大きさがほぼ同じで打ち消しあうよう設計されている。それでも相殺されずに残った磁束(残留磁束)は磁場検出機構により検出

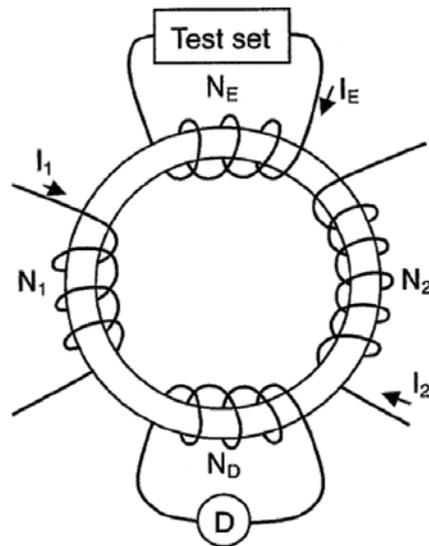


図5 電流比較器の構成²⁰⁾

され、残留磁束が零となるように補償機構に微小電流 I_E を注入する。変流器の校正を行う場合には、被校正器物である変流器と巻き数比の等しい電流比較器のそれぞれの一次側に共通の電流を入力し、変流器の二次側出力を電流比較器の二次側に入力する。補償電流を調整し、残留磁束が零となっているとき

$$N_1 I_1 + N_E I_E = N_2 I_2 \quad (4)$$

が成り立っているので、

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \left(1 + \frac{N_E I_E}{N_1 I_1} \right) = \frac{N_1}{N_2} (1 + \epsilon) \quad (5)$$

となり、変流器の理想比 (N_1 / N_2) からのずれ $\epsilon (= N_E I_E / N_1 I_1)$ を得ることで校正を行う。

高調波電圧電流標準

NMIJの維持する高調波電圧電流標準では、図6のような校正回路によりパワーアナライザの校正を行う。高調波は、基本波成分と基本波の周波数の整数倍の周波数を持つ高調波成分からなり、高調波電圧電流発生器からは基本波が高調波成分によって歪められた信号が出力される。出力された電圧・電流は、それぞれを誘導分圧器、シャントにより低電圧信号に変換してマルチプレクサで切り替えながらデジタルマルチメータでサンプリングを行う。サンプリングでは、時間窓で切り取られるデータ列の始点と終点が一致している必要があるため、基本波周波数と同期したサンプリングを行うような制御を施している。こうして収録されたデータを離散フーリエ変換(Discrete Fourier Transform, DFT)解析した結果とパワーアナライザの測定データを比較することで校正を行っている。¹⁷⁾

NMIJの維持する高調波電圧電流標準とJEMICの維持する電力標準との大きな違いは、データのサンプリング方法である。JEMICの電力・電力量の特定標準器は、正弦波の電圧・電流を測定するのに対し、NMIJの高調

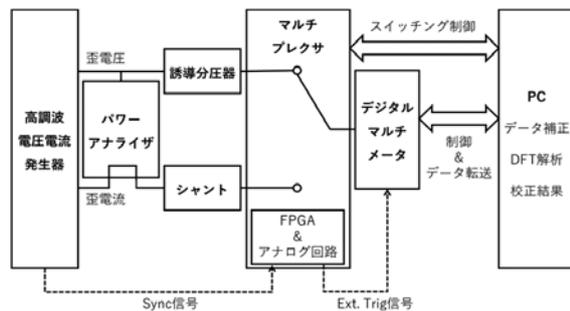


図6 高調波電圧電流標準の校正回路

波電圧電流標準で行われるデジタル・サンプリングでは高調波のような複数の周波数成分を含む電力の測定を行うことができる。ドイツのPhysikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) やオランダのVan Swinden Laboratory (VSL)、スウェーデンのResearch Institute of Sweden AB (RISE)などの各国家計量機関(National Metrology Institute, NMI)では電力標準にもデジタル・サンプリング及びDFT解析が採用されている。PTBではNMIJと同様、スイッチング制御により一台の計測器で測定を行っており²⁴⁾、RISEやVSLでは二台のデジタイザを同期してサンプリングを行っている²⁵⁾⁻²⁸⁾。

3.1.2 標準供給状況と分散型電源評価に向けた課題 電力標準・高調波電圧電流標準

国際度量衡局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)が収録する各国NMIの校正測定能力(Calibration and Measurement Capability, CMC)に登録されているJEMICの校正測定範囲は表1の通りである。これに加え、NMIJの整備する高調波電圧電流標準は周波数62.5 Hz、電圧100 V、電流5 Aの基本波と50次(3.125 kHz)までの高調波に対応している。したがって、日本国内で見れば45 Hzから数kHzまでの電力標準が整備されていると考えることができる。一方、各国NMIの電力の校正測定範囲は表2となっており、日本と他国では電圧・電流範囲に大きな開きがあることが見て取れる。しかし、電圧・電流範囲は変圧器及び変流器により拡張可能であるため、電力のCMCだけでは一概に比較することはできない。そこで、電流範囲の拡張に用いられる変流器のCMCを比較したものが表3である。他NMIと比較すると、NMIJは最大試験電流が小さく、

表1 JEMICの電力の校正測定範囲

NMI	校正器物	周波数	電圧	電流
JEMIC	Power meter	45 Hz to 65 Hz	50 V to 120 V	0.5 A to 50 A

表2 各国の電力の校正測定範囲

NMI	校正器物	周波数	電圧	電流
PTB	Power meter, Power converter, Wattmeter	16.7 Hz to 1 kHz	30 V to 480 V	5 mA to 160 A
VSL	Power meter, Power converter, Wattmeter	20 Hz to 100 kHz	1 V to 100 kV	100 μA to 5 kA
RISE	Power meter, Power converter, Wattmeter, Energy meter	10 Hz to 1 MHz	1 V to 400 kV	5 mA to 4.3 kA

大電流化が課題となっている一方、比較的広い周波数での校正が可能となっている。しかし、変流器の上位標準となっている電流比較器の校正可能な範囲は、最大電流が 50 A、最大周波数が 120 Hz となっており、この点が技術的障壁となっていることから、大電流化に加え、広帯域化も課題となっている。

交流電流比標準の広帯域化

前述の通り、交流電流比標準の大電流化・広帯域化が必要である。大電流化に向けては、巻き数の増加による影響への対策や受動型電流比較器と変流器を併用する方法、補償型電流比較器をカスケードとする方法が文献 20) において紹介されている。また、文献 20) では高周波化に伴う磁気シールドの遮蔽効果や容量性電流の影響についても論じられている。また、フランスの Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) では 1 MHz までの変流器の校正を可能とするため、いくつかの方法の比較検討を行っている²⁹⁾。本稿では、交流電流比標準の広帯域化に向けて電流比較器の磁場検出機構に着目し、考察を行った。

電流比較器における磁場検出機構はその単純さから巻線が採用されることが多いが、交流でしか使うことができない。しかし、分散型電源は直流から高周波までの広帯域な電力を含むため、磁場検出機構も、周波数帯域ごとに当該帯域に適した別々のセンサを利用する方式ではなく、単一センサで広帯域に対応できることが望ましい。そこで、ここでは現在電流センサとして実用化されているホール素子や超伝導量子干渉計、光ポンピング磁力計の特徴をまとめた。

ホール素子

ホール素子は、現在最も広く使われているホール効果を利用した電流センサである。直流を含む広帯域での磁場検出に用いられるが、増幅器を伴う場合がほとんどであることから、一般的に感度が低い。ホールセンサを、

高精度測定に利用した例はなく、利用可能かどうかは未知数である。

超伝導量子干渉計³⁰⁾

超伝導量子干渉計 (Superconducting Quantum Interference Device, SQUID) は、極低温電流比較器 (Cryogenic Current Comparator, CCC) において残留磁束の検出を担っている。SQUID は、超伝導体で形成されたループにジョセフソン接合を有する素子で、非常に感度が高い一方、超伝導転移温度以下の低温環境を必要とする。

光ポンピング磁力計

光ポンピング磁力計は、セシウムやルビジウムなどの気体の電子スピンの磁場により分裂することを利用したものである。室温で SQUID に匹敵する感度が得られることが期待されるが、周波数帯域が狭い³¹⁾。

このように、現状広帯域な電流比較器で利用可能な理想的な磁場検出デバイスは存在しないため、新規技術の開発が求められる。

3.2 インピーダンス標準

3.2.1 インピーダンス標準の概要

インピーダンス標準のトレーサビリティ体系には大きく分けて二つある。一つは、1956 年に A. M. Thompson と D. G. Lampard により提案されたクロスキャパシタ³²⁾という特殊なキャパシタによるもので、その原理上、長さ測定のみでキャパシタンスを決定できる SI トレーサブルな体系である。もう一方は、量子化ホール抵抗 (Quantized Hall Resistance, QHR) にトレーサブルな体系である。QHR は 1980 年に von Klitzing らにより発見された量子ホール効果³³⁾により得られる基礎物理定数に則った量子化抵抗値である。量子ホール効果は、強磁場下の二次元電子系でホール抵抗が量子化する現象で、

表 3 各国の変流器の校正測定範囲

NMI	最大試験電流	電流比	周波数
NRC*	60 kA	0.005 to 4 800 000	50 Hz, 60 Hz, 400 Hz
PTB	100 kA	0.01 to 20 000	16.7 Hz, 47 Hz to 63 Hz
NMIA*	20 kA	1 to 4 000	50 Hz
NPL*	10 kA	0.05 to 10 000	50 Hz to 400 Hz
NIST*	18 kA	0.05 to 2 400	50 Hz to 400 Hz
NMIJ	50 A	1 to 1 000	45 Hz to 4 kHz

*NRC(National Research Council, カナダ)、NMIA(National Measurement Institute, Australia, オーストラリア)、NPL(National Physical Laboratory, イギリス)、NIST(National Institute of Standards and Technology, アメリカ)

その抵抗値 $R_H(i)$ はプランク定数 h と電気素量 e から成る von Klitzing 定数 R_K を用いて

$$R_H(i) = \frac{h}{ie^2} = \frac{R_K}{i} \quad (6)$$

と表される。 i は整数であり、占有率と呼ばれる量である。 2019 年までは、この von Klitzing 定数は SI の体系の中では、プランク定数と電気素量の不確かさを持った値として定められていた。 このため産業界の高度な校正要求を満たすため、暫定的に不確かさのない協定値 $R_{K-90}(=25\ 812.807\ \Omega)$ を用いて標準供給がなされていた。 これにより厳密には SI トレーサブルではない状態が続いていたが、2018 年 11 月の国際度量衡総会により採択された改定 SI でプランク定数と電気素量が定義値となったため、QHR に基づくインピーダンス標準も SI トレーサブルとなった³⁴⁾。

NMIJ では、QHR を基準にインピーダンス標準を整備している。 その実現方法は次の通りである。 まず、QHR から CCC を介して $100\ \Omega$ の標準抵抗器を校正し、直流電流比較器 (Direct Current Comparator, DCC) により抵抗値の拡張を行い、直流抵抗標準を構築する^{35), 36)}。 直流抵抗標準をもとに $10\ \text{k}\Omega$ の交直差計算可能抵抗器を校正し、これをもとにインピーダンスブリッジを介して $100\ \text{k}\Omega$ 標準交流抵抗器に値付けを行う。 この標準交流抵抗器からインピーダンスブリッジにより交流抵抗値を拡張することで、交流抵抗標準を実現している。 続いて、 $100\ \text{k}\Omega$ 標準交流抵抗器をもとに直角相ブリッジを介して $1\ \text{nF}$ 標準キャパシタを校正する。 キャパシタンス標準も交流抵抗標準と同様にインピーダンスブリッジにより校正範囲の拡張を行っている。 また、インピーダンスブリッジにより適切な値付けをされた標準キャパシタを標準インダクタと直列に接続した LC 直列回路により標準インダクタを校正することでインダクタンス標準を実現している。 インピーダンス標準は、以上の交流抵抗標準、キャパシタンス標準、インダクタンス標準により構成されている。^{37), 38)}

続いて、インピーダンス標準を構築するうえで欠かせない四端子対インピーダンスブリッジと誘導分圧器について述べる。

四端子対インピーダンスブリッジ³⁹⁾

インピーダンスブリッジは、交流抵抗標準やキャパシタンス標準において、そのインピーダンス範囲拡張に用いられる。 インピーダンスブリッジの基本回路は図7で、被校正インピーダンス素子 Z_X と基準インピーダンス素子 Z_S の比 Z_X / Z_S が巻線比 N_X / N_S として得られるものである。 (a) の電圧比較型ブリッジの場合、入力電圧

V_{in} が変成器により巻き数比 N_X / N_S に等しい比で分圧され、零点検出器が零を指示するとき電圧比 V_X / V_S とインピーダンス比 Z_X / Z_S が等しいことによる。 (b) の電流比較型では、インピーダンス比 Z_X / Z_S はそれぞれの素子を流れる電流の比 i_S / i_X に等しく、電流比は先に述べた電流比較器により巻き数比 N_X / N_S として得られる。

しかし、図7のような二端子測定は、外部磁場と回路との相互作用や、浮遊容量の影響により、精確な測定が困難となる。 そこで、精密なインピーダンス計測においてよく用いられる定義が、二端子対定義や四端子対定義^{39), 40)}である。 四端子対定義では、図8の DP (Defining Point, 電圧・電流定義点) から引き出した端子対で測定される電圧・電流を制御し、

$$Z = \frac{V_{HP}}{I_{LC}} \Big|_{V_{LP}=0, I_{HP}=I_{LP}=0} \quad (7)$$

によりインピーダンスを定義する。 この四端子対定義を実現した測定を可能とするインピーダンスブリッジが図9の四端子対インピーダンスブリッジである。 このブリッジでは、四端子対定義が実現していることを確認するための検出器が各所に配置されており、内部導体と外部導体による同軸回路に流れるコモンモード電流を抑制するために同軸チョークが設置されている。 こうして四

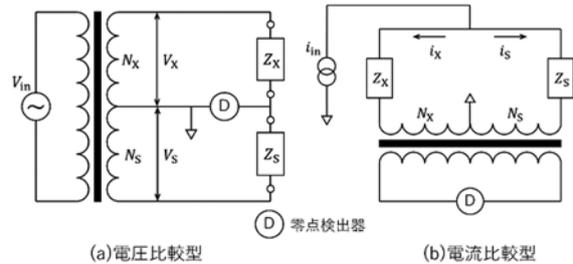


図7 インピーダンスブリッジ基本回路

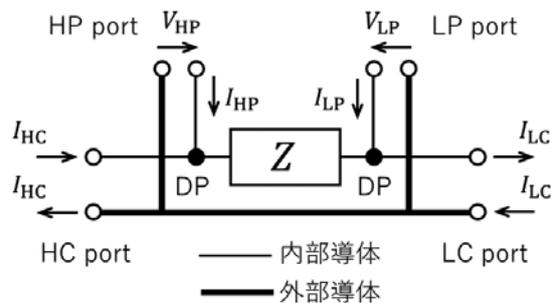


図8 四端子対定義

端子対条件を満たすことができれば外部磁界との相互作用や浮遊容量の影響なく高精度にインピーダンス校正を行うことができる。実際に NMIJ で用いられている電圧比較型インピーダンスブリッジ回路は図 10 であり、図 9 のブリッジにさらなる補助回路を加えたものとなっている。

誘導分圧器 ^{41)~43)}

誘導分圧器は、電磁誘導現象を利用して入力電圧を高精度に分圧する装置であり、電圧比較型インピーダンスブリッジにおいて比の基準となる変成器の分圧比の校正に用いられる。つまり誘導分圧器は、インピーダンス標準の比較の連鎖を高精度に実現するための重要な要素技術である。誘導分圧器は図 11 で点線枠に囲まれた部分で、高透磁率の磁性体コアに巻き付けた巻線から出力端子を引き出すと、入力電圧 V_{in} を巻き数比に応じて分圧することができる。

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \quad (8)$$

実際には、巻線抵抗などの寄生インピーダンスの影響で分圧比は巻線比からずれることとなるが、図 12 のような Two-stage 型誘導分圧器であれば分圧比巻線（図 12 点線枠部分）に流れる電流を小さくすることができるため、小さい分圧比誤差が実現できる。さらに、適切な磁気シールドを施すことで、理想比に近い分圧比が得られる。誘導分圧器の分圧比は、温度や湿度、機械的振動などの外的要因に対して非常に安定で、NMIJ では 1 kHz において標準不確かさ 10^{-9} V/V (=1 nV/V) 台で校正を実現することが可能である。

3.2.2 標準供給状況と分散型電源評価に向けた課題

以下では、蓄電デバイスは大容量キャパシタとみなせることからキャパシタンス標準に着目する。

表 4 は、NMIJ が供給するキャパシタンス校正範囲で

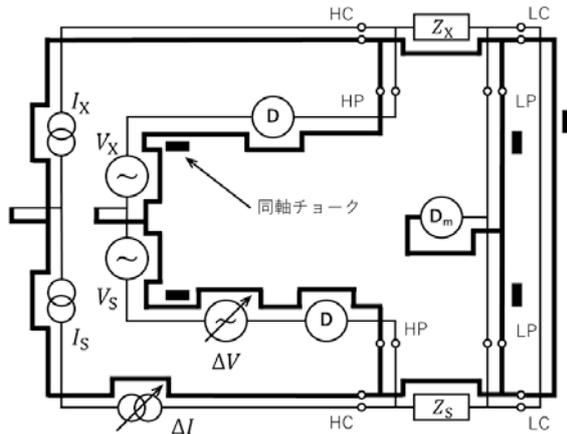


図 9 四端子対インピーダンスブリッジ回路

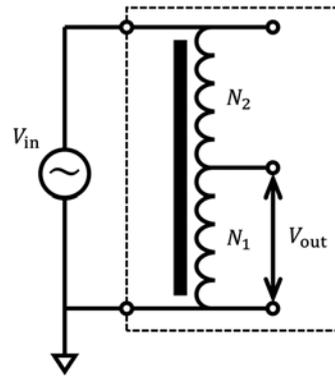


図 11 誘導分圧器

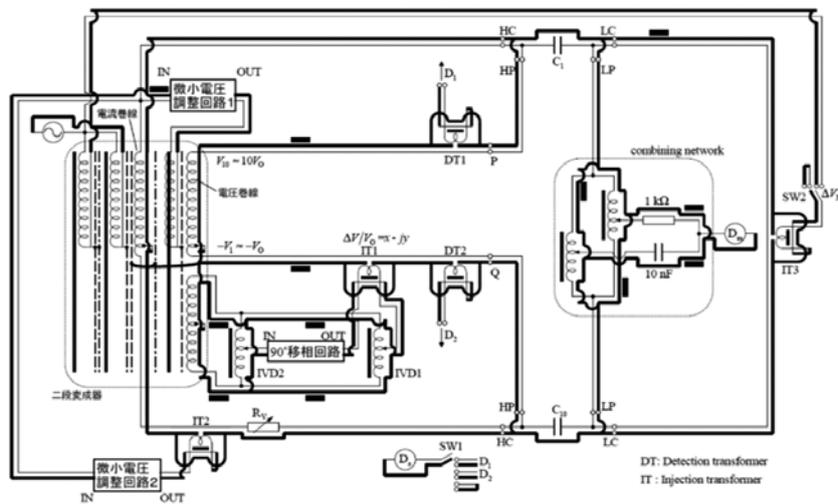


図 10 NMIJ で用いられる四端子対インピーダンスブリッジ回路 ³⁹⁾

ある。jcss 校正は、JCSS において特定標準器による特定二次標準器の校正であり、CMC 登録は BIPM のデータベースに登録されているものである。ただし、インピーダンス校正範囲は登録事業者によって範囲拡張が行われており、例えば JEMIC では 1 kHz において 1 pF から 10 μF にわたる連続した範囲で JCSS の認定を受けた校正を行っている⁴⁴⁾。

一方で、キャパシタ（コンデンサ）は大容量化が進んでおり、国内メーカーが世界有数のシェアを誇る積層セ

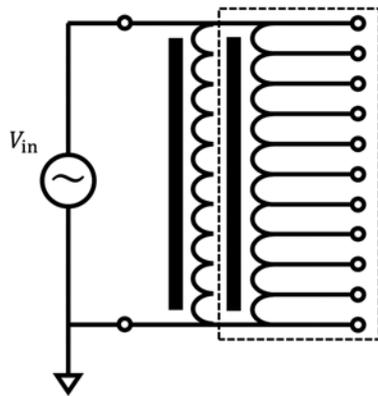


図 12 Two-stage 型誘導分圧器

表 4 NMIJ キャパシタンス標準供給範囲

キャパシタンス	周波数	jcss校正	CMC登録
10 pF	1 kHz		○
	1.592 kHz	○	○
100 pF	1 kHz		○
	1.592 kHz	○	○
1 nF	1 kHz		○
	1.592 kHz	○	○
10 nF	1 kHz		○
	1.592 kHz		○
100 nF	1 kHz		○
	1.592 kHz		○
1 μF	1 kHz		○
	1.592 kHz		○
10 μF	1 kHz		○
	60 Hz		
100 μF	120 Hz		
	1 kHz		
	60 Hz		
1 mF	120 Hz		
	1 kHz		
	1 kHz		

ラミックコンデンサなども近年では数 mF の容量の製品も市販されている。また、蓄電デバイスとしての利用が期待される電気二重層キャパシタをはじめとする大容量キャパシタはその容量が数 F にもなり、現在供給されているキャパシタンス標準では対応しきれていないのが現状である。したがって、蓄電デバイス評価のためにも大容量キャパシタンス計測技術の開発が必要不可欠である。

ここで、各国のキャパシタンス標準の状況を確認すると、主要国 NMI が CMC 登録している容量範囲は図 13 の通りで、各国とも 1 nF 付近で最も不確かさが小さく、容量の拡張に伴って不確かさが増大している。μF オーダーの容量範囲では、標準供給を行っていないか、不確かさが非常に大きいのが現状である。大容量キャパシタンスの計測技術は各国で研究がなされており、これまでに様々な手法が開発されてきた⁴⁵⁾⁻⁴⁹⁾。中国の NMI である National Institute of Metrology (NIM) では、2010 年より大容量キャパシタンス計測技術の開発に取り組んでおり、誘導シャントとサンプリング技術に基づき 1 F までの測定を行っており、その不確かさは数百 μF/F となっている⁵⁰⁾⁻⁵²⁾。キャパシタンスではないものの、VSL では、サンプリング技術を利用した、極めて低いインピーダンスを測定可能なブリッジの開発を行い、1 mΩ までの測定を行っている^{53),54)}。NMIJ でも、大容量キャパシタンス計測のための電流比較型ブリッジを開発しており⁵⁵⁾、これにより 100 μF などの標準供給を行っている。この技術を応用して、蓄電デバイス評価のための測定技術開発も行っている⁵⁶⁾。

3.2.3 大容量キャパシタンス計測の検討

表 5 は、10 μF 標準キャパシタの不確かさ推定例である。各不確かさ要因についてその不確かさが見積もられている。このうち、最も主要な要因は、四端子対定義条件の実現の不完全さによる不確かさである。この不確かさ要因は、さらに三つの項目に内訳がなされていて、このうち最も大きい要因は、同軸チョークの不完全さによるものである。表 6 は、四端子対定義条件の実現の不完全さによる不確かさの内訳を容量ごとにとまとめたものである。ここからわかるように、容量の増加とともに同軸チョークの不完全さによる不確かさが大きくなっている。

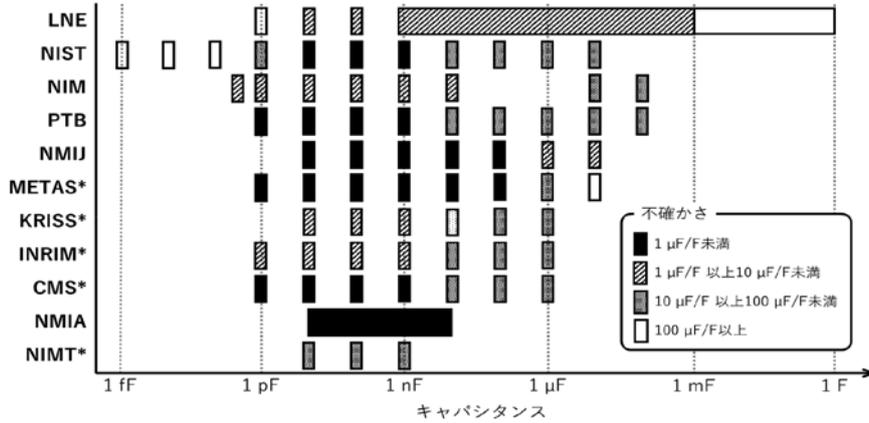
同軸チョーク⁴⁶⁾は、図 14 のように内部導体と外部導体から成る同軸ケーブルを高透磁率コアに複数回巻きつけたものである。このとき、同軸チョークは内部導体を一次巻線、外部導体を二次巻線とする変流器を形成し、

その等価回路が図 15 である。一次巻線と二次巻線の巻き数は等しく n である。内部導体には、電源 U と負荷 Z が接続されており、外部導体は導体の微小なインピーダンス z のみの、ほぼ短絡したとみなせる回路である。内部導体に流れる電流 I_P は、コア中に磁束 ϕ_P を生成し、これにより誘導される起電力によって外部導体には電流 I_S が流れる。各電流 I_P 、 I_S は、コア中に生成する磁束

ϕ_P 、 ϕ_S が打ち消しあうように流れ、これらは次式を満たす、

$$n \frac{d\phi}{dt} = U - I_P Z = I_S z = j\omega L(I_P - I_S) \quad (9)$$

ここで、 $\phi = \phi_P - \phi_S$ 、 n は巻き数、 j は虚数単位、 ω は電流の角振動数、 L はコアの透磁率や形状、巻き数で決まるインダクタンスである。式 (9) から



*METAS(Federal Institute of Metrology, スイス)、KRISS(Korea Research Institute of Standards and Science, 韓国)、INRIM(Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, イタリア)、CMS(ITRI Center for Measurement Standards, 台湾)、NIMT(National Institute of Metrology (Thailand), タイ)

図 13 1 kHz における各国キャパシタンス標準供給範囲とその不確かさ

表 5 10 μF 標準キャパシタの不確かさ推定例³⁹⁾

不確かさ要因 Source of Uncertainty	シンボル Symbol	タイプ Type	測定回数 Number of repeated observations n	確率分布 Probability Distribution	標準不確かさ Standard Uncertainty $u(x_j)$	感度係数 Sensitivity Coefficient c_j	$ c_j u(x_j)$
1000 pF 仲介標準	$u(C_{T10})$	B		-	0.18 fF	10000	1.8 pF
$\Delta V/V_0$ (実測値 at 995 Hz)	$u(\Sigma v_k)$	A	5	-	0.67 μV/V	5 μF	3.4 pF
$\Delta V/V_0$ (実測値 at 1005 Hz)	$u(\Sigma v_k)$	A	5	-	0.67 μV/V	5 μF	3.4 pF
変成器の10:1比からの偏差	$u(\alpha)$	B		-	0.01 μV/V	40 μF	0.3 pF
測定の分解能に起因する不確かさ	$u(\Sigma a_{res,k})$	B		Rect	0.30 μV/V	10 μF	3.0 pF
四端子対定義条件の実現の不完全さ	$u(\Sigma a_{4TP,k})$			-	1.82 μV/V	10 μF	18.2 pF
(内訳) 同軸チョーク		B		-	1.81 μV/V		
(内訳) 補助調整		B		Rect	0.16 μV/V		
(内訳) combining network		B		Rect	0.08 μV/V		
仲介標準器の電圧補正に起因する不確かさ	$u(\Sigma c_k)$	B		-	0.66 μF/F	10 μF	6.6 pF
合成標準不確かさ							20.2 pF
相対合成標準不確かさ							2.02×10^{-6} (F/F)

表 6 容量ごとの四端子対定義条件の実現の不完全さによる不確かさの内訳³⁹⁾

不確かさの要因	0.01 μF		0.1 μF		1 μF		10 μF	
	$u(a_{4TP,1})$	$u(b_{4TP,1})$	$u(a_{4TP,2})$	$u(b_{4TP,2})$	$u(a_{4TP,3})$	$u(b_{4TP,3})$	$u(a_{4TP,4})$	$u(b_{4TP,4})$
同軸チョークの不完全さ u_1 [μV/V]	0.00	0.00	0.02	0.02	0.18	0.18	1.8	1.8
2つの補助調整の不完全さ u_2 [μV/V]	0.08	0.10	0.08	0.10	0.08	0.10	0.1	0.1
combining network の調整の不完全さ u_3 [μV/V]	0.04	0.07	0.04	0.07	0.04	0.07	0.0	0.1
RSS (root sum square) [μV/V]	0.09	0.12	0.09	0.12	0.20	0.22	1.8	1.8

$$I_p = I_s + \frac{z}{j\omega L} I_s \quad (10)$$

であり、 $|z| \ll |j\omega L|$ が成り立つとき、

$$I_p \approx I_s \quad (11)$$

となり、コモンモード電流が零となる。したがって、同軸チョークによるコモンモード電流の抑制の効果を向上させるには巻き数を増やすのが最も簡単である。さらに徹底したコモンモード電流対策を行う場合は、図16のような補償機構を有するアクティブカレントイコライザ⁴⁶⁾を導入する。アクティブカレントイコライザでは、前段で検出されるコモンモード電流が零となるように後段で電流を注入する仕組みとなっている。

一方、同軸チョークの有効性を定量的に評価することは困難であり、Cutkoskyによって大まかな評価法が示されている程度である⁵⁷⁾。しかし、その方法は煩雑であるためNMIJではより簡易的な方法で同軸チョークの評価を行っている³⁹⁾。具体的には、同軸チョークが不

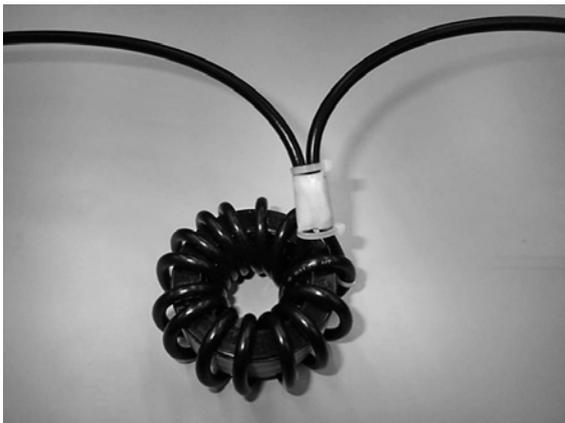


図14 同軸チョーク

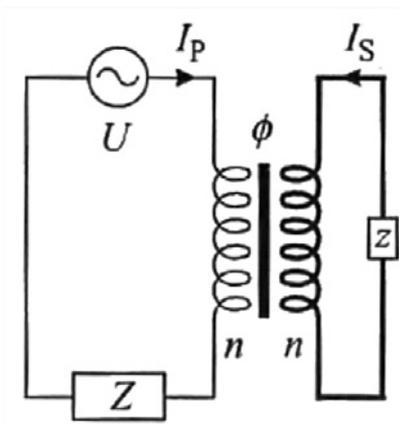


図15 同軸チョークの等価回路⁴⁶⁾

完全であることにより流れるコモンモード電流による影響を以下の三点に分類して推定している。

(a) 二端子対回路モデルからの逸脱に起因する影響

四端子対のうち、二つの電流端子対(図8におけるHC及びLCポート)に流れるノーマルモード電流にコモンモード電流が重畳した場合の影響を、素子や同軸ケーブルのインピーダンスを推定することで見積もっている。

(b) コモンモード電流が電圧ケーブルを流れることにより生じる電圧降下の影響

四端子対のうち、二つの電圧端子対(図8におけるHP及びLPポート)の外部導体を流れる電流による電圧降下の影響を外部導体のインピーダンスを推定することで見積もっている。

(c) 周囲のケーブルを流れるコモンモード電流が電圧ケーブルに誘導する起電力

この影響に関しては、電圧ケーブルに隣接する電流ケーブルからの影響が大きいと考えられる。無限に長い銅線とそれに平行な同軸ケーブル間の相互インダクタンスをモデルとして検討されているが、その誘導起電力の影響は(a),(b)と比べて無視できるほど小さいと見積もられている。

現状では、以上のような方法で同軸チョークの不完全さによる不確かさを推定しているが、定量的な評価を実施するためにはコモンモード電流を実測する必要があり、今後の課題となっている。

4. 総括

2030年のエネルギーミックス実現に向けて分散型電源の大量導入が見込まれている。分散型電源は複数機器の連携運用が前提であり、各構成要素の評価技術は必須である。そこで、精密電気計測は非破壊かつ運用中での測定が可能であると想定されることから各要素の評価法として適していると考え、精密電気計測技術を支える電

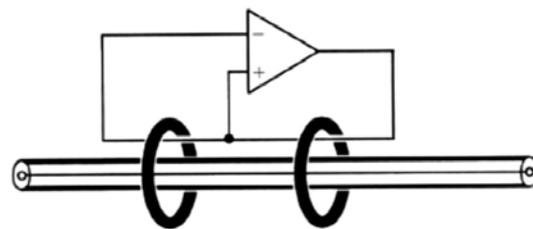


図16 アクティブカレントイコライザ⁴⁶⁾

気標準についての調査を行った。

NMIJ 及び JEMIC には各種標準が整備されているが、広帯域電力評価や大容量キャパシタ評価を行う上では不十分な状態である。したがって、交流電流比標準の広帯域化やキャパシタンス標準の大容量化により積極的に対応してゆく必要がある。

謝辞

本調査研究をまとめるにあたり貴重なご助言とご鞭撻を賜りました産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 応用電気標準研究グループ 坂本憲彦 研究グループ長、金子晋久 首席研究員ならびに有益な情報を提供して下さった応用電気標準研究グループ 山田達司 主任研究員に深く感謝致します。最後に、貴重なご意見を頂きました皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁：2030年エネルギーミックス実現に向けた対応について～全体整理～、https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/025/pdf/025_008.pdf (2018)
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁：第五次エネルギー基本計画、https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf (2018)
- 3) United Nations: Paris agreement, https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (2015)
- 4) 経済産業省 資源エネルギー庁：第四次エネルギー基本計画、https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf (2014)
- 5) 経済産業省 資源エネルギー庁：日本のエネルギー2019、https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy_in_japan2019.pdf
- 6) NTS：エネルギーの貯蔵・輸送 電気・熱・化学 (2018) 120-123
- 7) 財団法人 エネルギー総合工学研究所：新エネルギーの展望 電力負荷平準化、<http://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/09/1997-1.pdf>
- 8) 坂巻 亮：インピーダンス標準とそれを応用した蓄電デバイス評価技術に関する調査研究、産総研計量標準報告 9 (2016) 355-370.
- 9) 中国ネットワーク株式会社：隠岐ハイブリッドプロジェクト、<https://www.energia.co.jp/nw/safety/facility/okihybrid/project/index.html>
- 10) ソニービジネスソリューション株式会社：市民・行政一体となり実現した「災害に強い蓄電システム」、https://www.jeita.or.jp/japanese/local3/pdf/jeita_cpslot_2016_case11.pdf
- 11) 三菱不動産株式会社、日本ガイシ株式会社：「柏の葉スマートシティ」に電力貯蔵用 NAS 電池システム設置、https://www.mitsui-fudosan.co.jp/corporate/news/2015/0128_01/
- 12) 橋本竜弥、川俣智幸、島田和義：東北電力(株)西仙台変電所 大型蓄電池システムの運用開始、https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2015/09/70_09pdf/f05.pdf
- 13) 長嶋 洋：大容量蓄電システム需給バランス改善実証事業、http://www.kyuden.co.jp/library/pdf/environment/action-report16/booklet/report/P3_160810.pdf
- 14) 一般社団法人 太陽光発電協会：太陽光発電の大量導入に向けたグリッドコードの整備、https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin-energy/keito_wg/pdf/023_09_00.pdf
- 15) 吉井 誠：スマートインバータの実証試験を配電ネットワーク試験場で開始、東光高岳技報 7 (2020) 21-23.
- 16) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：新エネルギー等地域集中導入技術ガイドブック、<https://www.nedo.go.jp/content/100083461.pdf>
- 17) 山田達司：高調波計測に関する現状、産総研計量標準報告 5 (2007) 303-310.
- 18) 東芝産業機器システム株式会社：インバータの点検・保守について、<http://www.inverter.co.jp/member/teclib/inv/data/man/e6581113/e6581113.pdf>
- 19) 加藤宏彰、田所拓也：日本電気計器検定所の概要と電力・電力量標準の供給について、日本電気学会誌 139 (2019) 430-433.
- 20) 山田達司：交流電流比標準の現状について、産総研計量標準報告 3 (2005) 587-597.
- 21) H. B. Brooks, F. C. Holtz: The Two stage Current Transformer, AIEE Trans. 41 (1922) 382-391.
- 22) I. Obradovic, P. Milfanic, S. Spiridonovic: Testing of Current Transformers with a Current Comparator and an Auxiliary Electrical System, Electrotech. Z. Ausg. A 78 (1957) 669-701.
- 23) P. J. Betts: Two-stage Current Transformers in Dif-

- ferential Calibration Circuits, *IEE Proc.* **130** (1983) 324-328.
- 24) G. Ramm, H. Moser, and A. Braun: A New Scheme for Generating and Measuring Active, Reactive and Apparent Power at Power Frequencies with Uncertainties of 2.5×10^{-6} , *IEEE Trans. Instrum. & Meas.* **48** (1999) 422-426.
- 25) S. Svensson: Verification of a Calibration System of Power Quality Instruments, *IEEE Trans. Instrum. & Meas.* **47** (1998) 1391-1394.
- 26) S. Svensson, K. Rydler: A Measuring System for the Calibration of Power Analyzers, *IEEE Trans. Instrum. & Meas.* **44** (1995) 316-317.
- 27) T. Bergsten, V. Tarasso, and K. Rydler: A Calibration System for Electric Power at Frequencies up to 1 MHz, *17th International Congress of Metrology* (2015)
- 28) H. van den Brom: Progress Report on Electrical Metrology at VSL (2015-2017), *CCEM/17-Report-VSL*
- 29) D. Fortune, D. Istrate, F. Ziade, and I. Blanc: Measurement Method of AC Current up to 1 MHz, *20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop on ADC Modelling and Testing Research on Electric and Electronic Measurement for the Economic Upturn Benevento* (2014)
- 30) 岡崎雄馬：量子メトロロジートライアングルの現状と基盤技術, 産総研計量標準報告 **9** (2016) 323-340.
- 31) I. K. Kominis, T. W. Kornack, J. C. Allred, and M. V. Romalis: A Subfemtotesla Multichannel Atomic Magnetometer, *Nature* **422** (2003) 596-599.
- 32) A. M. Thompson and D.G. Lampard: A New Theorem in Electrostatics and its Application to Calculable Standards of Capacitance, *Nature* **177** (1956) 888.
- 33) K. von Klitzing, G. Dorda and M. Pepper: New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant on Quantized Hall Resistance, *Phys. Rev. Lett.* **45** (1980) 494-497.
- 34) Bureau International des Poids et Mesures: The International System of Units 9th edition (2019)
- 35) 金子晋久：量子ホール効果抵抗標準の研究の現状, 産総研計量標準報告 **2** (2004) 617-625.
- 36) 大江武彦：量子電気標準の現状と研究開発動向, 産総研計量標準報告 **6** (2007) 119-127.
- 37) 中村安宏, 堂前篤志：ものづくり産業の国際競争を支援する電気標準, *シンセシオロジー* **3** (2010) 213-222.
- 38) 坂本憲彦：インピーダンス標準の校正測定技術, 電気化学・インピーダンス測定のデータ解析手法と事例集, 技術情報協会 (2018) 89-100.
- 39) 米永暁彦, 堂前篤志, 中村安宏：四端子対インピーダンスブリッジを用いた標準キャパシタの校正法とその不確かさ, 産総研計量標準報告 **6** (2007) 101-117.
- 40) R. D. Cutkosky: Four-Terminal-Pair Networks as Precision Admittance and Impedance Standards, *IEEE Trans. Commun. & Electron.* **83** (1964) 19-22.
- 41) 菅野 充：精密電気計測, コロナ社 (1994)
- 42) 中村安宏：Two-stage 型誘導分圧器の校正とその不確かさ評価, 産総研計量標準報告 **4** (2005) 45-52.
- 43) 坂本憲彦：キャパシタンス標準の現状と課題, 産総研計量標準報告 **4** (2006) 175-188.
- 44) 日本電気計器検定所：校正案内, <https://www.jemic.go.jp/kousei/calibration.html> 及び, 標準コンデンサの JCSS 校正, https://www.jemic.go.jp/wp-content/themes/jemic/kousei/JCSS/03_01_t.pdf
- 45) H. P. Hall: A Precise Standard of High Capacitance, *IEEE Trans. Instrum. & Meas.* **IM-25** (1976) 495-497.
- 46) S. Awan, B. Kibble, and J. Schurr: Coaxial Electrical Circuits for Interference-Free Measurements, *IET* (2011)
- 47) R. Hanke: Precise Kelvin Double Bridge for Measuring Dissipation Factors and Capacitances up to 1 F, *IEEE Trans. Instrum. & Meas.* **IM-27** (1978) 434-436.
- 48) Yu. P. Semenov and E. So: VNIIM-NRC Intercomparison of Calibration Systems for Large Value Capacitors up to 10 μ F at Frequency up to 1 kHz, *CPEM Digest* (2008)
- 49) J. Kucera, T. Funck, and J. Melcher: Automated Capacitance Bridge for Calibration of Capacitors with Nominal Value from 10 nF up to 10 mF, *CPEM Digest* (2012)
- 50) D. DongXue, H. XiaoBing, and W. Wei: High-Value Capacitance Measurement based on Inductive Shunt, *CPEM Digest* (2010)
- 51) D. DongXue, H. XiaoBing, W. Wei, and L. YanQiang: Improvement of High-Value Capacitance Measurement, *IEEE Trans. Instrum. & Meas.* **62** (2013) 1795-1800.
- 52) D. DongXue, Y. Yan, C. Yan, and W. Wei: Measurement for Capacitance Standard up to 1 F, *CPEM Digest* (2018)
- 53) H. E. van den Brom, E. F. Dierikx, and L. Jol: Sampling Ratio Bridge for Impedance Measurements Down

- to 1 m Ω , CPEM Digest (2012)
- 54) E. Houtzager, H. E. van den Brom, and E. Dierikx: Development of a Wide-Range Sampling Impedance Ratio Bridge, CPEM Digest (2014)
- 55) N. Sakamoto and Y. Nakamura: Calibration Method for Large Capacitances using a Current Comparator with an Inductive Voltage Divider, CPEM Digest (2010)
- 56) N. Sakamoto and H. Fujiki: Development of Low-impedance Standard for Safety Evaluation of Storage Cells, CPEM Digest (2014)
- 57) R. D. Cutkosky: Techniques for Comparing Four-Terminal-Pair Admittance Standards, J. Res. Natl. Bur. Stand. C 74C (1970) 63–78.