

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760259

研究課題名（和文） 究極の交流電圧発生を目指したジョセフソン電圧標準の研究

研究課題名（英文） Research on Josephson Voltage Standard toward Ultimate AC Voltage Waveform Synthesis

研究代表者

丸山 道隆 (MARUYAMA MICHITAKA)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員

研究者番号：30415947

研究成果の概要（和文）： 交流電圧の基準となる理想的な交流電圧波形の発生を目指し、プログラマブルジョセフソン交流電圧標準（ACPJVS）システムの最適化と測定手法の開発を行った。市販の標準信号発生器を用いた同期サンプリング手法による校正システムの構築を行った結果、62.5 Hz の周波数で 3.5 ppm の標準相対不確かさを得ることができた。使用したデジタルボルトメータのタイムベースエラーを補正すれば、1 ppm 程度までの不確かさ低減が見込まれる。これにより、当初目標である 60 Hz で 1 ppm という値を達成するとともに、従来の交流変換標準における低周波領域での校正の不確かさを低減する手法を確立する目的が得られた。

研究成果の概要（英文）： We have optimized an AC Programmable Josephson Voltage Standard (ACPJVS) system and developed the precise measurement method toward ideal AC voltage standard waveform synthesis. We developed the calibration system for commercial calibrators based on a synchronous sampling method and obtained the relative standard uncertainty value of 3.5 ppm at a frequency of 62.5 Hz. With considering the time-base error of the digital voltmeter used, we can expect further suppression of the uncertainty value down to about 1 ppm. As a result of the above experiments, we achieved our original goal of 1ppm at 60 Hz and also obtained prospects for improving uncertainty of the calibration at low frequencies in the conventional AC-DC transfer standard.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：量子デバイス、超伝導素子、精密計測、ジョセフソン効果、電圧標準、交流電圧

1. 研究開始当初の背景

(1) 計測器を用いて得られる測定値の正確さを、場所や時間によらず普遍的・客観的に保障することは、すべての科学測定における

基本となるのに加え、家電製品の技術的な信頼性を高めたり、各種製品や原料、エネルギー資源などの国際的な商取引における障害を排除したりする上でも重要な課題である。

(2) 本研究で扱う電気計測の分野に焦点を絞ると、直流電圧に関しては、すでに超伝導ジョセフソン効果を利用した手法により、9桁の精度で基準電圧を発生するシステムが国家標準として30年以上にわたって維持・管理されている。

(3) 一方、交流電圧に関しては、電気信号を熱に変換するサーマルコンバータと呼ばれる素子を用いて、交流信号を実効値で測定し、直流の電圧標準と比較する手法（交直変換標準）が用いられている。この手法は、広い範囲をカバーする方式として、欠かすことのできない重要なものである一方で、波形情報が得られない、高調波を含む信号に対して精度が保障されない、などの課題があった。

(4) このような課題を解決するため、現在、直流のジョセフソン電圧標準を交流信号へと発展させた、次世代ジョセフソン交流電圧標準の開発が各国で精力的に行われている。提案されている幾つかの方式の中で、本研究で採用する方式：「プログラマブルジョセフソン交流電圧標準（以下、ACPJVS と呼ぶ）」は、10V 程度の高い出力電圧が得られる方式として注目されており、電力標準などへの応用が期待されている。

(5) 産総研ではこれまでに、直流用のシステムをベースとして、小型冷凍機を用いたACPJVSシステムを開発し、0.1 Hz から2 kHzまでの周波数で振幅約4 Vまでのステップ近似された交流波形の生成に成功している（図1）。しかし、この方式では、素子に印加するバイアス電流のON/OFFに伴う過渡現象に起因したエラー（トランジェント・エラー）が避けられず、精度（測定値の不確かさ）を悪化させる要因として大きな課題となっている。

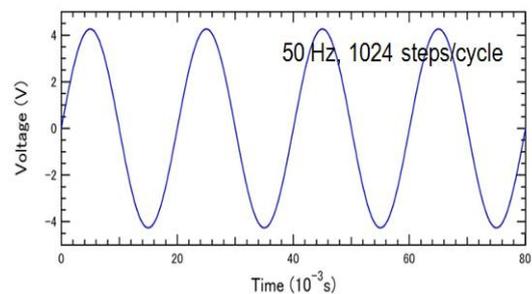
2. 研究の目的

(1) 本研究では、離散的な同期サンプリング手法の開発および測定システムの構築を行い、現行のACPJVSを用いたトランジェント・エラーの回避に取り組む。これにより、とくに低周波領域で課題となっている、交直変換標準の不確かさを低減し、校正手法の確立を目指す。

(2) また、現行システムにおけるトランジェント・エラーの定量的な評価を行い、そのメカニズムを理解する。そのうえで、広帯域冷凍機システムの開発や、高速バイアス回路の作製を行い、トランジェント・エラーの低減を目指す。



(a) システムの外観写真



(b) 出力波形（正弦波の例）

図1. 産総研で開発されたACPJVSシステムと交流電圧波形生成

3. 研究の方法

(1) デジタルボルトメータ（DVM）を用いたサンプリング測定を行い、現行システムにおけるトランジェント・エラーを定量的に評価する。

(2) 市販の標準電圧発生器（キャリブレータ）を含む、同期サンプリング方式による測定系を構築し、校正手法を確立する。

(3) 冷凍機チャンバー内の配線を広帯域化するとともに、バイアス回路の改良を行い、トランジェント・エラーの低減に取り組む。

4. 研究成果

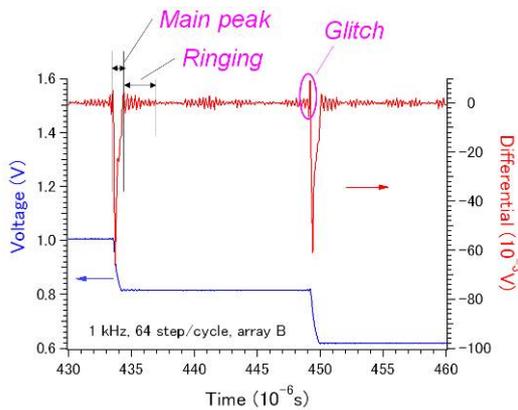
(1) まず、現行システムにおけるトランジェント・エラーの大きさを定量的に調べるため、デジタルボルトメータ（DVM）を用いたサンプリング手法による測定を試みた。ここで、信号周波数は約1 kHzとし、DVMのアパーチャ時間は1ステップ幅（約16 us）より十分小さい2 usとした。

ACPJVS用バイアス制御回路とDVMとの間で同期測定を行った結果、トランジェント幅の大きさに周期的な変化が見られ、信号波形のステップ位置に依存することが分かった。ま

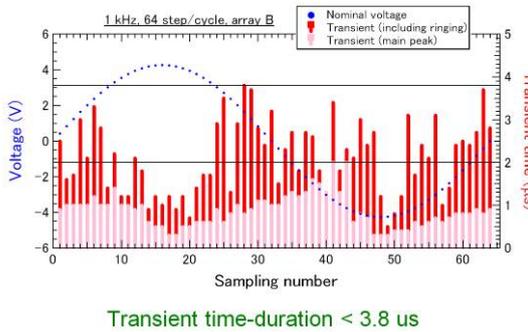
た、トランジェントの微分波形から、トランジェント波形が主ピークと、その前に位置する急峻なピーク、およびその後ろに位置するリングングとから構成されていることが分かった (図 2 (a))。これらの結果から、現行システムにおけるトランジェント・エラーの原因として、バイアス制御回路のスイッチ時間、バイアス配線の帯域、およびデジタル/アナログ変換時のグリッチ等に起因していることが推測される。

また、正弦波波形の全周期にわたるトランジェントの大きさを評価した結果、今回得られた最大トランジェント幅は、主ピークで 2.0 us 以下、リングングを含めても 3.8 us 以下の大きさであり、DVM の離散的なサンプリングモードを用いた測定では現行システムにおいても十分な能力を有することが分かった (図 2 (b))。

以上により、今回明らかになったトランジェント・エラーを考慮したサンプリング測定の最適化や、バイアス配線の広帯域化によるトランジェント・エラーの低減を目指す今後



(a) 出力の微分波形
(上: 微分波形、下: 出力波形)



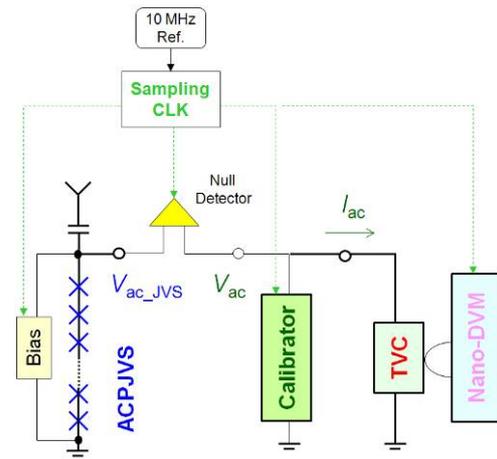
(b) 正弦波波形の全周期にわたるトランジェントの大きさ

図 2. 現行システムにおけるトランジェントの評価

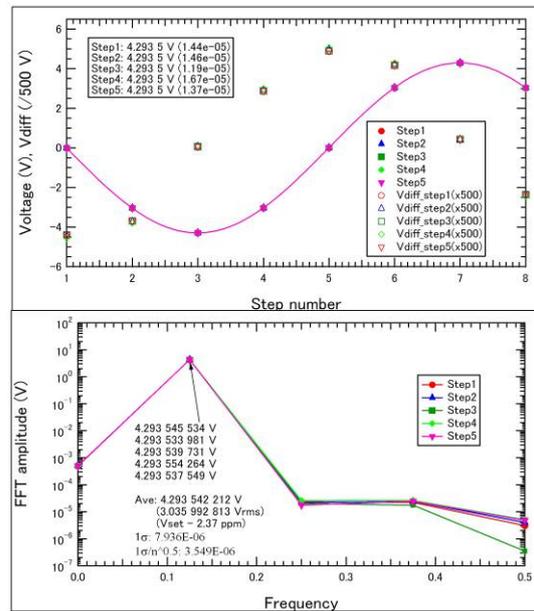
の方針が得られた。

(2) サンプリング測定においては、10 MHz 参照信号を基準として、高精度に同期された測定系の構築を行った。本研究で行う精密測定においては、同期信号を送送するための配線や、機器をコンピュータ制御するための通信用ケーブルなど、信号線以外の結線により、意図しないグラウンドループが形成され、不要なノイズが測定に影響しうるため、細心の注意を要する。

機器の接地方法やノイズを防ぐガードの設置方法を最適化した結果、市販の標準信号

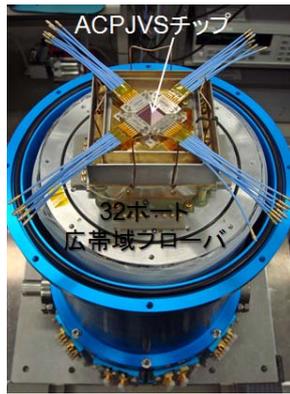


(a) サンプリング測定のブロック図

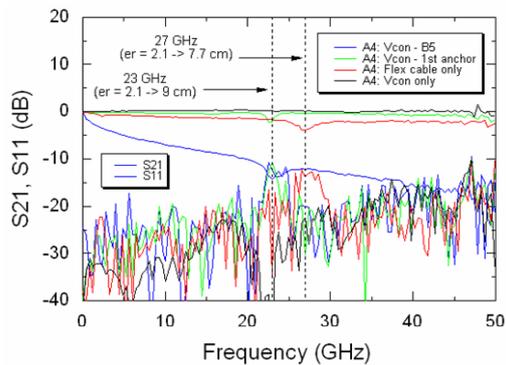


(b) キャリブレータの校正結果 (62.5 Hz)
(上: 再生波形、下: FFT 結果)

図 3. サンプリング手法による低周波測定



(a) 外観写真



(b) 広帯域配線の特性と故障診断の様子 (点線の個所で不具合を同定)

図4. 広帯域実装を実現した新冷凍機システム

発生器 (キャリブレータ) からの正弦波出力波形を校正する実験に成功した (図3)。この校正において、62.5 Hz の周波数で 3.5 ppm の標準相対不確かさを得ることができた。さらに、DVM の基準クロックの不確かさ (タイムベースエラー) を補正することにより、1 ppm 程度まで不確かさを低減できることが分かった。これにより、当初目標である 60 Hz で 1 ppm という値を達成するとともに、従来のサーマルコンバータを用いた交直変換標準による低周波領域の校正の不確かさを低減する手法を確立する目途が立った。

また、これまで低周波域での特性は計算機シミュレーション等による推定でしか得ることができなかったサーマルコンバータ素子の詳細な周波数特性を実測することが可能となり、今後、より高精度なサーマルコンバータ素子を開発する上での有用なツールを得ることができた。

(3) トランジェント・エラーの低減においては、冷凍機チャンバー内の配線を広帯域化した新たな実装システムを設計し、作製した

(図4(a))。作製においては、広帯域な信号伝送と熱流入の抑制という相反する要求を満たすためのケーブル選定および熱設計が行われた。また、非常に繊細なケーブルの損傷等を検出するため、冷却状態での高周波特性を測定し、適宜、不具合箇所の同定と補修を行った (図4(b))。

一方で、バイアス制御回路内の配線を広帯域化することにより、トランジェント・エラーの設計値を 100 ns 以下に抑制した。また、従来のバイアス制御回路において、チャンネル間の干渉が素子の動作マージンを大幅に狭めていることを見出した。これらを改善するため、チャンネル間のグランド電位を分離独立化した新たなバイアス制御回路を開発した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① M. Maruyama, C. Urano, N. Kaneko, New Drive System for Programmable Josephson Voltage Standard Using Pulse Packet Bias, 2012 CPEM Digest, 査読有, 2012 (7/1 発行予定), DOI:なし

② M. Maruyama, T. Yamada, H. Sasaki, H. Yamamori, C. Urano, N. Kaneko, Generation of Stepwise AC Waveforms Using a NbN-Based Programmable Josephson Voltage Standard System with a 10-K Cooler, 2010 CPEM Digest, 査読有, 2010, 8-9, DOI:なし

[学会発表] (計2件)

① M. Maruyama, C. Urano, N. Kaneko, New Drive System for Programmable Josephson Voltage Standard Using Pulse Packet Bias, Conference on Precision Electromagnetic Measurement, 2012年7月2日 (予定), 米国・ワシントンDC

② M. Maruyama, T. Yamada, H. Sasaki, H. Yamamori, C. Urano, N. Kaneko, Generation of Stepwise AC Waveforms Using a NbN-Based Programmable Josephson Voltage Standard System with a 10-K Cooler, Conference on Precision Electromagnetic Measurement, 2010年6月14日, 韓国・テジョン

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸山 道隆 (MARUYAMA MICHITAKA)
 独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員
 研究者番号: 30415947