

高精度電力発生と操作性を追求した「交流電力校正器 LS3300」

LS3300 AC Power Calibrator with High Accuracy, Stability, and Usability

土田 直人 ^{*1} 井上 賢 ^{*1}
Naoto Tsuchida Ken Inoue

横河計測は、2017年に交流電力校正器 LS3300を発売した。LS3300は、「電力標準を持つことにより電力計測のYOKOGAWAとしてのプレゼンスを向上する」ことを目的として、新たに開発した電力計用の校正器である。

交流電力校正器は、任意の力率で高精度・高安定な交流電圧および電流信号を発生することが必要であり、そのためには高精度な位相制御が重要である。LS3300は、FPGAを用いた“デジタルアシストアナログ技術”により、高い精度の位相制御を実現した。また、LS3300複数台を連結することで、三相4線式の電力校正を可能とした。複数台の装置であるにもかかわらず、各装置の設定や制御を連動し、あたかも1台のような操作性、動作を実現している。本稿では、LS3300で使用したこれらの技術について紹介する。

Yokogawa Test & Measurement Corporation released the LS3300 AC power calibrator in 2017. The LS3300 is for calibrating power meters, which helps Yokogawa strengthen its presence in the field of power measurement.

AC power calibrators are required to generate AC voltage and current signals accurately and stably at any power factor, and thus require highly precise phase control. The LS3300 achieves this control by using FPGA-enabled digital assist analog technology. With multiple units connected, the LS3300 can calibrate 3-phase 4-wire power with the same operability and performance as a single unit. This paper describes these technologies implemented in the LS3300.

1.はじめに

横河計測は、交流標準電圧電流発生器2558Aの発売以来、YOKOGAWAの高精度校正器ブランドを再構築し、ビジネスを展開してきた。本機LS3300はその活動の第4弾である。これまでの3製品(25xxAシリーズ)は、アナログメータや温度計の校正を想定し、従来製品の機能やデザインを踏襲して開発した。それに対してLS3300は、電力計の校正を想定し、機能やデザインを一新した製品である。図1に本器の外観を、表1に代表的な仕様を示す。

一般に計測機器は、正確さを保つために定期的な校正が必要である。校正作業は、国家標準にトレーサブルな機器を用いて行われる。単相電力計の校正において、横

河計測が従来提案してきた方法は、2台の2558Aと参照用電力計を使用する方法であった⁽¹⁾。2558Aは位相確度を規定していないため、電力発生毎に参照用電力計で電力値や位相を確認・調整する必要があった。

LS3300は、位相確度を規定し、電圧と電流を同時に出力可能ため、1台で単相電力計の校正が可能である。また、複数台を連結することで、三相電力計や位相計の校正に対応する。



図1 LS3300 フロントデザイン

*1 横河計測株式会社 技術開発本部 第3技術部

表1 LS3300と2558Aの代表的な仕様の比較

		LS3300	2558A
交流電圧	確度規定範囲	10 mV ~ 1250 V	1 mV ~ 1200 V
	確度 50/60 Hz *	± (300 ppm of setting + 50 ppm of range)	± (400 ppm of setting + 100 ppm of range)
交流電流	確度規定範囲	0.3 mA ~ 62.5 A	1 mA ~ 60 A
	確度 50/60 Hz *	± (400 ppm of setting + 50 ppm of range)	± (550 ppm of setting + 100 ppm of range)
周波数	確度規定範囲	40 ~ 1200 Hz	40 ~ 1000 Hz
	確度 *	±100 ppm	±100 ppm
交流電力	確度規定範囲	電圧、電流、周波数の上記条件	—
	確度 50/60 Hz (PF=1) *	± (400 ppm of setting + 50 ppm of range)	—
	電力安定度 (PF=1)	±100 ppm	—
力率 (Lead/Lag)		-1 ~ 0 ~ 1	—
位相角設定範囲		-180.000 ° ~ 359.999 °	-180.000 ° ~ 359.999 °
位相確度 50/60 Hz *		±0.03 °	—
最大出力		約 36 VA	約 36 VA
寸法 (mm)		426 (W) × 132 (H) × 450 (D)	426 (W) × 132 (H) × 400 (D)

※ 1 年確度

2.特徴

2.1 高い位相確度

電圧と電流の位相差を公称値 ϕ_0 と誤差 $\Delta\phi$ (それぞれ単位は°) の和とし、 $\Delta\phi$ の高次の項を無視すれば、交流電力は式 (1) で表される。

$$VI \cos(\phi_0 + \Delta\phi) = VI \left(\cos(\phi_0) - \sin(\phi_0) \frac{\pi \cdot \Delta\phi}{180} \right) \quad \cdots (1)$$

(V = 電圧実効値, I = 電流実効値)

従って、力率 1 以外 ($\phi_0 \neq 0$) では位相誤差 $\Delta\phi$ が電力値に影響を与える。任意の力率で高確度・高安定な交流電力を発生するためには、位相確度が重要である。LS3300 は位相確度: ±0.03 ° の優れた性能により、力率 1 以外においても、高確度・高安定な交流電力を出力可能である。

2.2 単相から三相までの電力校正に対応

LS3300 は 1 台で単相 2 線、複数台で単相 3 線、三相 3 線、三相 4 線に対応する。複数台を使用する三相電力校正システムは、制御用 USB ケーブルと同期用 BNC ケーブルを接続することで、簡単に構築可能である。設定(信号の振幅、位相など) や制御(出力オン/オフなど) を連動することで、複数台の装置で構成しているにもかかわらず、あたかも 1 台のような操作性、動作を実現した。

2.3 高確度、高安定、広出力範囲

LS3300 は、2558A の開発で獲得した交流発生技術に改良を加えることで、代表レンジでの電力確度 ±450 ppm (±0.045%)、電力安定度 ±100 ppm (±0.01%) を実現した。LS3300 単体での最大出力は、電圧 1250 V、電流 62.5 A である。

2.4 同期運転による大電流出力

LS3300 は 3 台の同期運転時、150 A レンジを選択することで最大 187.5 A の並列出力が可能である。設定や制御は連動し、3 台の位相同期を保証するため、極めて低ひずみの交流大電流出力を実現した。これにより、100 A を超える交流電流センサー等の校正に対応する。

2.5 AUX 出力

LS3300 は、クランプ電力計本体や電力計の外部電流センサー入力(電圧入力)の校正を行うための、AUX 出力を装備した。その電圧出力範囲は最大 6.25 V である。電流センサーの出力レンジに合わせて、500 mV と 5 V レンジが選択可能である。

3.本器の構成

図 2 に本器のブロック図を示す。LS3300 は、発振器の出力をコントロールする一次側と、トランスで絶縁した二次側から成る。網掛け部分は FPGA を使用したデジタル処理部である。デジタル処理部で所望の振幅、位相、周波数を有する電圧および電流デジタル波形情報を発生し、アナログ信号へ変換後、アンプで所望の振幅に増幅し、トランスで絶縁して出力信号とする。アン

ブやトランス等のアナログ性能を、デジタル処理で補完する「デジタルアシストアナログ技術」により、電圧、電流、位相の超高安定性を実現した。

次に位相制御について説明する。LS3300 は任意の位相を発生するため、機器間の同期信号として、直交する二相正弦波 (sin 波と cos 波) を用いている。位相回転部では、三角関数の定理 (2) に基づき、所望の位相回転を実現する。つまり入力された二相正弦波 $\cos(\omega t)$, $\sin(\omega t)$ に、それぞれ $\cos(\theta)$, $-\sin(\theta)$ (θ は任意の位相角) の重みをかけて、それらを加算している。

$$\cos(\omega t)\cos(\theta) - \sin(\omega t)\sin(\theta) = \cos(\omega t + \theta) \quad \cdots (2)$$

仮に二相正弦波 $\cos(\omega t)$, $\sin(\omega t)$ の振幅が一致しない場合や、直交性にずれがある場合、上記位相回転の計算結果に誤差が生じる。そこで、LS3300 では信号精度改善

部を新規に設け、同部にて再生成したデジタル二相正弦波信号を基準信号として、高精度なデジタル位相制御を実現した。

デジタル処理後の信号は、DA 変換後、ゲイン補正值と乗算し、電圧および電流アンプで増幅して、電圧および電流出力となる。また、電流出力を装置内部の抵抗に流すことで電圧に変換され、AUX 出力となる。

デジタルアシストアナログ技術による高安定性実現のため、電圧出力値および AUX 出力値の二次側 LO 端子電位を基準とした出力電圧を AD 変換し、フォトカプラで絶縁してデジタル処理部に帰還する。また、電流出力値は変流器 CT により出力電流を検出するとともに絶縁し、一次側電位で IV 変換と AD 変換を行い、デジタル処理部に帰還する。

以下に、同期信号入出力部、振幅位相制御部、同期運転について解説する。

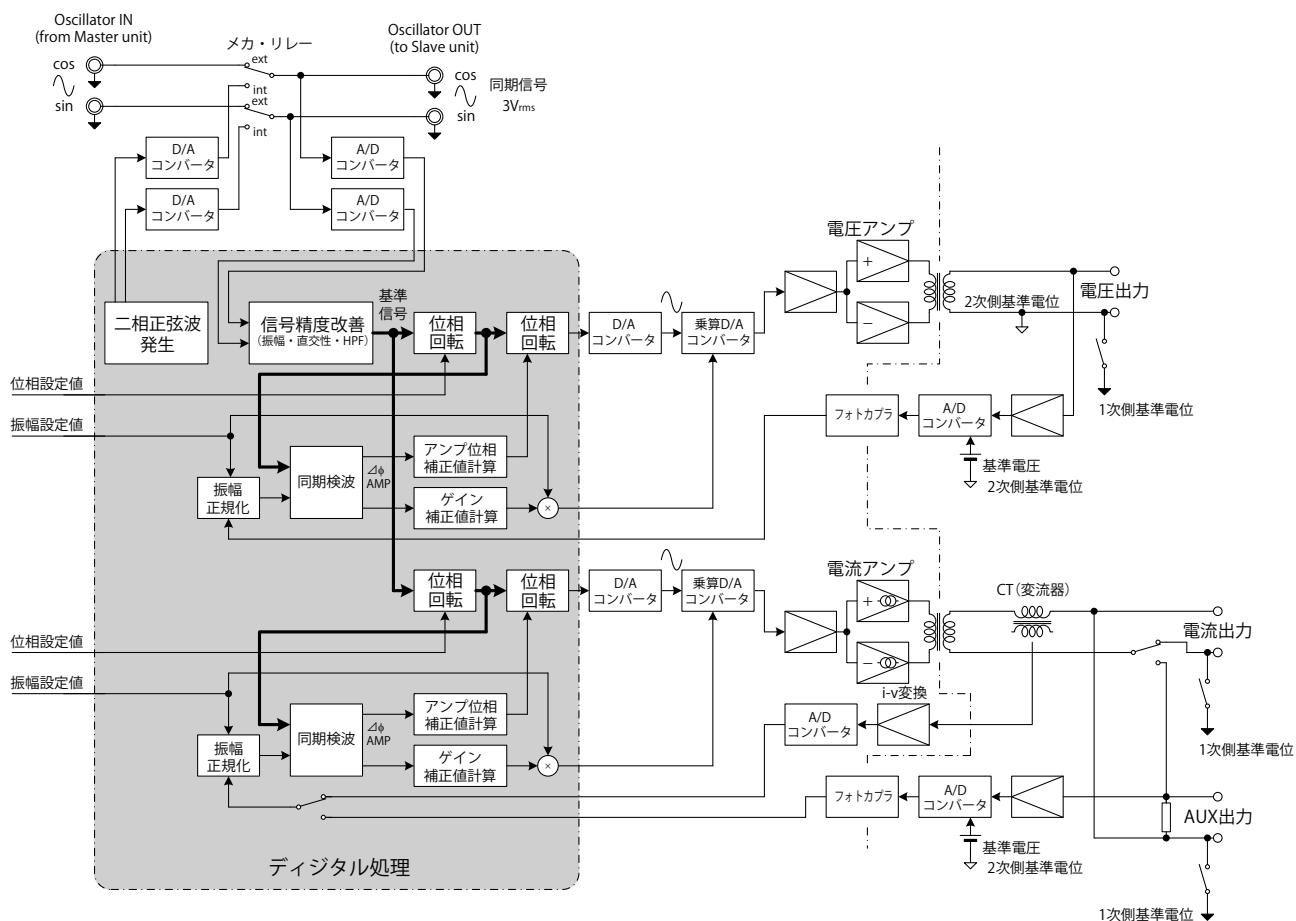


図 2 LS3300 ブロック図

3.1 同期信号入出力部

図2の同期信号入出力部を抜粋し、図3に示す。網掛け部分はFPGAを使用したデジタル処理部である。太線部分は二相正弦波を示す。マスター機はスイッチをint側にセットし、二相正弦波発生部からのデジタル信号をDA変換し、同期信号を発生する。スレーブ機はスイッチをext側にセットし、外部入力端子からマスター機の同期信号を得る。マスター機とスレーブ機は、同一の同期信号をそれぞれAD変換する。ADC 1段分の遅延が等しく発生するため、機器間の遅延差を回避している。同期信号はAD変換後、信号精度改善部（PLL）にて振幅・直交性を改善し、振幅位相制御部の基準信号として使用する。

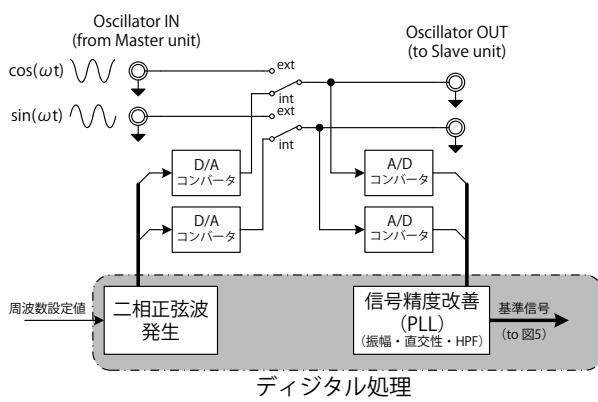


図3 同期信号入出力部 ブロック図

図3のPLL部は、AD変換後の同期信号と、PLL自身が outputする基準信号とで位相を比較し、安定した基準信号を outputしている。図4に、二相正弦波を使用したPLLの動作を示す。多くのPLLで使用される「チャージポンプ」による位相比較方法では、位相比較の頻度が信号の1周期毎に1回である。これに対して二相正弦波を使用したPLLでは、任意の時刻の瞬時値に基づき位相差を求める

ことができるため、信号の1周期に複数回の位相比較が可能である。LS3300では、周波数40Hz～1.2kHzの同期信号に対し、375kHzレートで複数回の位相比較を行う。これにより、PLLとしての応答性が向上できるだけでなく、雑音に対して安定な動作も可能になる。

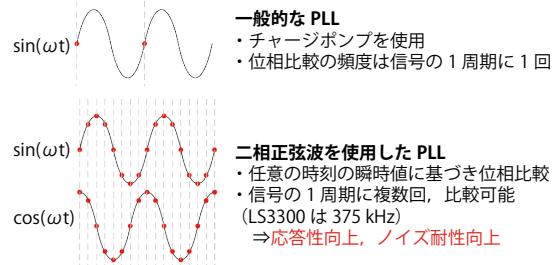


図4 二相正弦波を使用したPLL

3.2 振幅位相制御部

図5に振幅位相制御部を示す。ここでは電圧出力側について説明する。電流側も同様の動作である。図3と同じく、網掛け部はデジタル処理、太線部は二相正弦波を示す。基準信号には、2段階に分けて位相回転を与える。1段目の位相回転部では位相設定値 ϕ を、2段目の位相回転部ではアンプ位相補正值 $\Delta\phi$ をそれぞれ与える。位相回転後の基準信号は、DA変換後、ゲイン補正值 V' と乗算し、電圧アンプで増幅して、所望の振幅 V 、位相 ϕ の電圧出力を得る。

同期検波部に帰還された出力信号と、前述の位相回転部（1段目）からの基準信号により、アンプ位相補正值 $\Delta\phi$ と振幅比 α を求める。アンプ位相補正值 $\Delta\phi$ から計算した補正值を位相回転（2段目）に与える。また、振幅比 α から計算したゲイン補正值は電圧出力の振幅を制御する。従来機種の2558Aでは、帰還信号を全波整流し振幅比のみを検出していました。LS3300では、新たに同期検波部を実装することで、振幅と位相の両方を検出可能となり、高安定な電力出力を実現した。

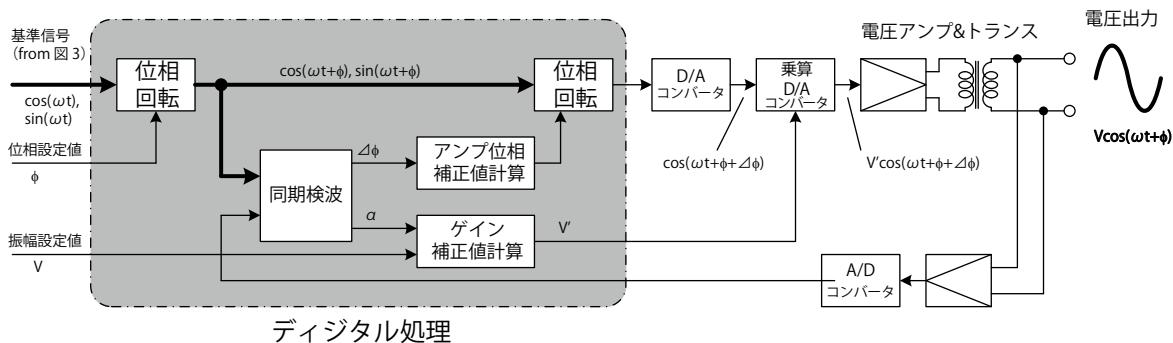


図5 振幅位相制御部

3.3 同期運転

発生器を複数台連結して電力発生を行う場合（同期運転），機器間の同期を保証しつつ，交流信号発生の設定パラメータ（周波数，振幅，位相）を連動する必要がある。LS3300 は，同期信号伝搬のための同期用 BNC ケーブルと，設定連動のための制御用 USB ケーブルとをそれぞれ接続する構成にしている。BNC ケーブルによりマスター機からスレーブ機へ同期信号を供給することにより，機器間の同期は常に保証できる。設定パラメータを変更した場合でも，同期関係は失われることなく設定連動するため，同期運転を容易に実現できる。

図 6 に，LS3300 を 3 台使用した三相 4 線電力校正の接線図を示す。LS3300 の出力端子を，校正対象である電力計の各エレメントに接続し，マスター機を操作することで，各スレーブ機へ自動で平衡条件を設定できる。平衡条件であれば，マスター機ですべてのパラメータを設定可能である。また，スレーブ機で過負荷などの異常動作が発生した場合は，マスター機が異常を通知し，すべての機器を連動して出力をオフすることが可能であり，あたかも 1 台の機器のような操作性，動作を実現した。不平衡条件についても，平衡状態から容易に移行可能である。そのため，三相電力校正時においても，ユーザーの設定作業を簡易化できる。

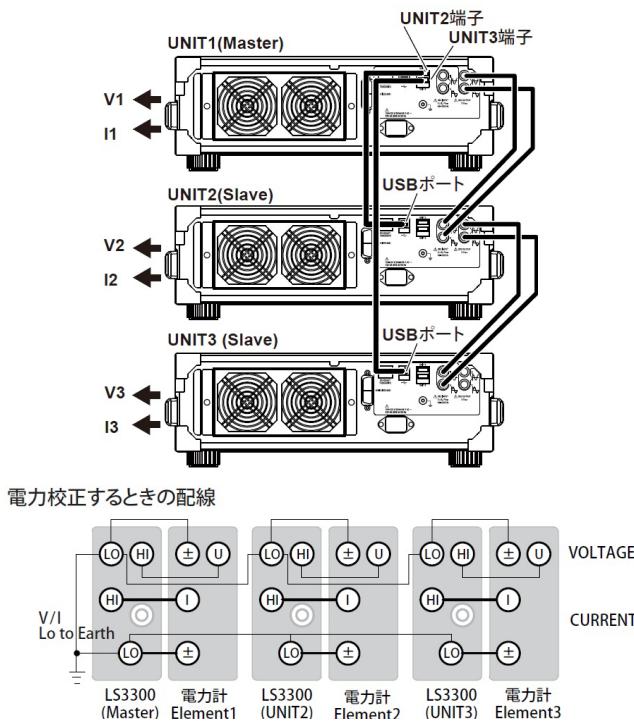


図 6 三相 4 線電力校正 結線図

図 7 に大電流発生の概要を示す。LS3300 の同期運転により，三相電力発生だけでなく，高安定な大電流出力も可能である。三相電力発生時と同様に，マスター機の

操作により，各スレーブ機へ電流の並列出力を設定できる。最大で 180 A を超える大電流出力が可能であるため，高精度な変流器やシャント抵抗の校正に最適である。

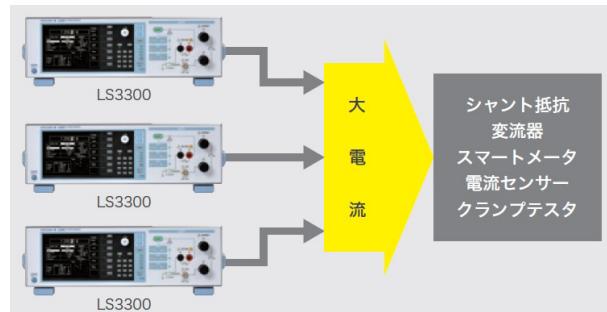


図 7 大電流出力

図 8 に，設定連動時のマスター機の画面表示例を示す。画面より，各相の位相状態を確認することができるため，誤配線を防止することができる。位相表示については，位相 0° の向きを右向き（TYPE-1）もしくは上向き（TYPE-2）で選択可能とし，ユーザーは使い慣れた画面表示にて位相状態を確認できる。

LS3300 はマスター機能とスレーブ機能とを兼ね備えるため，柔軟な機器構成が可能である。例えば，多数の単相電力計を校正するような場合，LS3300 の連結を解除することで，校正作業を並行して実施可能である。校正対象に応じて台数を変更可能ため，ユーザーは様々な運用が可能である。

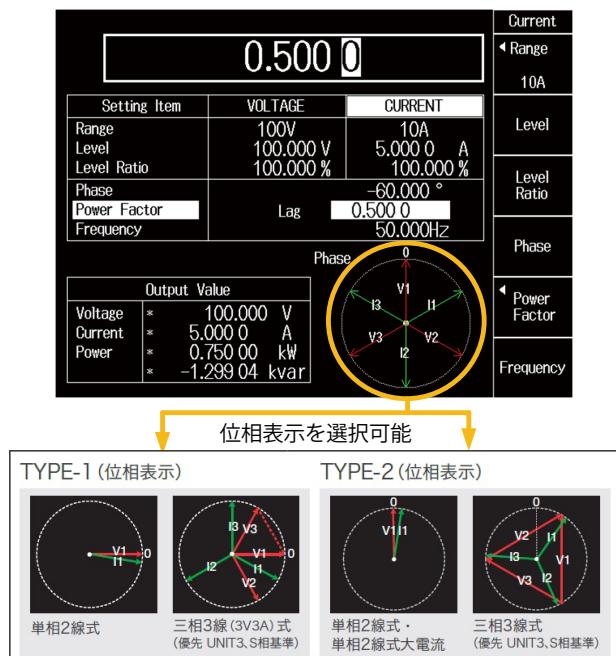


図 8 設定連動時の画面表示例

4. 安定度測定値

LS3300 は、デジタルアシストアナログ技術により、振幅・位相共に優れた安定度を実現した。

図 9 に、100 V / 5 A 力率 1 (=位相 0°) の電力発生をプレシジョンパワーアナライザ WT3000E で測定した結果を示す。力率 1 の場合、式 (1) の \sin の項が 0 となるため、電力誤差は電圧・電流の振幅に依存する。変動の実測値は ± 20 ppm 程度であり、振幅が高安定であることがわかる。

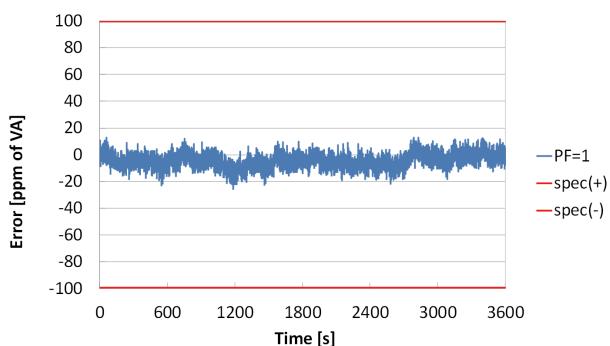


図 9 電力（力率 1）の 1 時間安定度

図 10 に、100 V / 5 A 力率 0 (=位相 90°) における同様の測定結果を示す。力率 0 の場合、式 (1) の \cos の項が 0 となるため、電力誤差は位相に依存する。変動の実測値は ± 10 ppm 程度である。位相制御技術により、力率 0 においても高安定な電力発生を実現した。

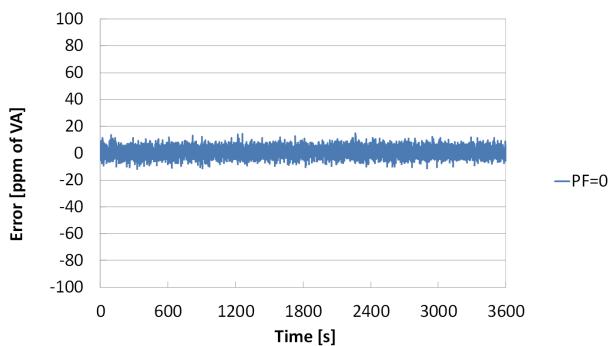


図 10 電力（力率 0）の 1 時間安定度

図 11 に、100 V / 10 A 力率 0 (=位相 90°) における電圧電流間の位相差の測定結果を示す。安定度は ± 0.001 ° と WT3000E の測定限界以下の高い安定度が得られた。

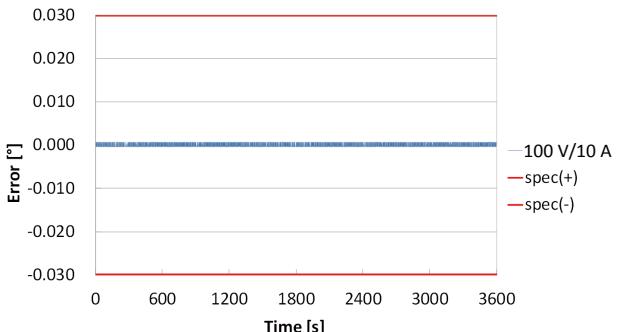


図 11 位相差の 1 時間安定度

5. おわりに

横河計測は、2558A の交流発生技術を発展させ、新たに獲得した位相制御技術を導入し、LS3300 を開発した。ユーザーは LS3300 により電力計の校正システムを容易に構築し、確実かつ簡易に校正を実施できる。LS3300 は三相電力発生や大電流発生にも対応可能であり、様々な校正ニーズに応えられる。また、電力計だけでなく、高精度が要求される標準電力量計や電力モニタ、クランプテスタの調整・校正用途として、市場で大いに活用されることを期待する。YOKOGAWA として、電力計を開発するだけでなく、それらを校正する電力校正器を開発することで信頼性の高い電力計測をお客様に提供していく。

参考文献

- 井上賢, “校正作業効率を追求した交流標準電圧電流発生器 2558A”, 横河技報, Vol. 57, No. 1, 2014, p. 23-26