UDC 621.317.723.082.72

論 文

51-A 65

静電形交直流電圧比較器

電子技術総合研究所

山 崎 亨

1. は し が き

交流電圧 電流などの精密測定には二つの方法が考えられる。その一つは絶対測定により値付けされた交流用標準器を用いる方法であるが、交流電圧あるいは交流電流の絶対測定は、100 ppm より高い精度で実施された例がない⁽¹⁾から、現状ではこれより高い精度は得がたい。他の一つは交流の測定量を交直流比較器（交直流トランスファ標準器とも呼ばれるが、本稿では交直流比較器と呼ぶことにする）と呼ばれる仲介器を用いて直流の標準量と比較測定する方法であり、この方法は古くから広く採用されている。

交直流比較器には交・直流の量の比較にあたっての誤差、いわゆる交直差が小さいことが要求され、その代表的なものに交直両用計器の原理を応用した電流計形、熱電形および静電形がある。中でも、熱電形は近年著しく発達し、高精度と実用性を兼ね備えた優れたものが開発され、使われている⁽²⁾。静電形は一般に駆動トルクが小さく、高感度を得るため細いつり線を用いて可動部をつるから、構造が繊細で扱いにくい。反面静電形は交直差が小さく、また電流計形や熱電形が電流にตอบสนองして動作するのに対して、電圧にตอบสนองして動作する点が注目される。しかし従来、静電形の交直流電圧比較器として使われていた静電電圧計は測定方式が偏読法であるので、分解能の制限により 100 ppm より高い測定精度は得難いと考えられる。

著者は、象限電位計を一對の静電電圧計素子が、差動的に結合された高感度トルク平衡計器⁽³⁾として用いてトルク平衡式の静電形交直流電圧比較器⁽⁴⁾を構成した。この比較器は測定電圧 100 V、周波数 20 Hz～20

kHz において ± 2 ppm 以上の分解能と 11 ppm より良い精度を持つ。電総研ではこの比較器と並行して熱電形交直流電圧比較器も開発したので、これら2種類の比較器の交直差を実験的に比較した。この実験により、あらかじめ個別に見積られていた両比較器の交直差の精度が 60 Hz～4 kHz において実験的にも確かめられた。熱電形交直流電圧比較器はその後著しく改良され、それを用いて我が国の交流電圧標準が確立・維持されている。その精度の現状は 20 kHz 以下で 15 ppm より良く、100 kHz でも 30 ppm より良い。静電形交直流電圧比較器（以下、SVC と略称する）の研究は、このような我が国の交流電圧標準確立のために理論的・実験的に重要な根拠の一つとなっている。

本稿で用いられている主な記号を第1表に示す。

第 1 表 主要な記号

Table 1. List of principal symbols.

記 号	記 号 の 説 明
v_a	静電形交直流電圧比較器の測定用電圧計素子への入力交流電圧の瞬時値
V_a	v_a の実効値
ω	v_a の角周波数
V_d	静電形交直流電圧比較器の測定用電圧計素子への入力直流電圧
V_r	静電形交直流電圧比較器の平衡用電圧計素子に与えられる直流参照電圧
V_{ra}	静電形交直流電圧比較器の測定用電圧計素子への入力が交流電圧 V_a であるときの V_r の値
V_{rd}	静電形交直流電圧比較器の測定用電圧計素子への入力が直流電圧 V_d であるときの V_r の値
V_f	静電形交直流電圧比較器を自動的に平衡させるために V_r に重ね合されて平衡用電圧計素子に帰還される電圧
V_{fa}	静電形交直流電圧比較器の測定用電圧計素子への入力が交流電圧 V_a であるときの V_f の値
V_{fd}	静電形交直流電圧比較器の測定用電圧計素子への入力が直流電圧 V_d であるときの V_f の値
δ_{AB}	静電形交直流電圧比較器の測定用電圧計素子と平衡用電圧計素子の感度の差。本稿では静電形トルク平衡計器の非対称感度係数とも呼ばれる。
G_0	静電形交直流電圧比較器の帰還回路の開ループ伝達関数の定常値
α_S	静電形交直流電圧比較器の交直差
C_{NA}	静電形交直流電圧比較器の測定用電圧計素子の入力静電容量

Electrostatic AC-DC Voltage Comparator. By Tōru Yamazaki, Member (Electrotechnical Laboratory, Ministry of International Trade and Industry).

山崎 亨：正員，電子技術総合研究所標準計測部電気標準研究室

2. 原 理

幾何学的に良い対称性を持つ象限電位計は等しい感度を持ち、1本の可動軸に可動部が差動的に結合された一対の静電電圧計素子、すなわち、第1図における(固定電極Aと可動電極N)および(固定電極Bと可動電極N)からなる静電形トルク平衡計器であるとみなせる。これらの素子の前者をSV-A、後者をSV-Bと呼び、SV-Aを測定用、SV-Bを平衡用の素子とする。

第2図のように電極Nを金属ケースと共に接地し、まずSV-Aに実効値 V_a なる交流電圧 v_a 、SV-Bに直流可変参照電圧 V_r を同時に与える。 $V_r=V_{ra}$ なるときNが基準位置に静止したならば、トルクの平衡条件は

$$V_a^2 = (1 + \delta_{AB}) V_{ra}^2 \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 δ_{AB} はSV-AとSV-Bの感度の差を表し、著者は非対称誤差係数と呼んでいる。

次に、SV-Aの入力を直流電圧 V_d (ただし、 $|V_d| \simeq V_a$)とし、 $V_r=V_{rd}$ なるときNが基準位置に静止したならば、 δ_{AB} が上と同じ値をとるとして

$$V_d^2 = (1 + \delta_{AB}) V_{rd}^2 \dots\dots\dots (2)$$

(1),(2)式から

$$(V_a - |V_d|)/|V_d| = (|V_{ra}| - |V_{rd}|)/|V_{rd}| \dots\dots\dots (3)$$

第1図 象限電位計の構造

Fig. 1. Construction of quadrantelectro meter.

第2図 SVCの原理

Fig. 2. Principle of SVC.

(3)式によると、 V_d が既知であれば V_{ra} および V_{rd} を測定して V_a を知ることができる。

3. 原理の検討

〈3.1〉 交直差 一般に交直流電圧比較器の交直差はその指示または出力を V_0 ならしめる交流入力 V_{ia} 、直流入力を $|V_{id}|$ として次式の α で定義されている。

$$\alpha = (V_{ia} - |V_{id}|)/V_0 \simeq (V_{ia} - |V_{id}|)/|V_{id}| \dots\dots\dots (4)$$

これによると、SVCの交直差は、(i)SV-AおよびSV-Bに駆動トルクを生じさせる電圧と、それらへの入力電圧との不一致、(ii)交・直流電圧に対するSV-Aの感度の差、を主要原因として生じる。これらの詳細は第5章で具体的に検討するが、SVCが交直差を持つならば、それを α_s とし、 $|\alpha_s| \ll 1$ 、 $|V_{ra}| \simeq |V_{rd}|$ とすると、(3)式は次のようになる。

$$(V_a - |V_d|)/|V_d| = (|V_{ra}| - |V_{rd}|)/|V_{rd}| + \alpha_s \dots\dots (5)$$

〈3.2〉 非対称誤差係数 δ_{AB} の電圧特性 非対称誤差係数は電極の形状・配置の非対称性に関係し、特に電極A,BとNとの間隔の不ぞろいにより、電極Nに垂直に働く静電引力の非対称性が大きく影響する。実測例⁽⁹⁾によると、SVCに使った象限電位計では δ_{AB} の電圧係数を0.3ppm/Vにできるから、SVCでそれを100ppm/V以下にすることは容易である。いま、 $V_d=100$ Vとすると、SVCは通常は V_a と V_d との差を0.1%より小さくして使われるから、 δ_{AB} の電圧係数の影響によるSVCの誤差は1ppmより十分小さくして無視できる。

〈3.3〉 手動-自動混合平衡方式の採用 SVCの応答時間の短縮と平衡操作の簡易化を図り、次のような手動-自動混合平衡方式を採用した。

第3図において、SV-Aへの入力電圧 V_a および V_d はほぼ等しいとする。また、SV-Bへの入力電圧

第3図 SVCの平衡方式

Fig. 3. Balancing method of SVC.

V_r はあらかじめ V_a および V_r とほぼ等しく調整し、以後は一定値に保つ。まず、 V_a を SV-A に、 V_r を SV-B に同時に与える。このとき可動電極 N が回転すればそれを光電的に検出し、電圧 V_{fa} を得て V_r に重ね合せ、SV-B に帰還する。角変位-電圧変換器、増幅器および位相補償回路の利得の定常値をそれぞれ G_1, G_2, G_3 とし、SV-A への入力電圧が v_a (実効値 V_a)、SV-B への帰還電圧が V_{fa} になると、可動電極が静止したならば $|V_r| \approx V_a$ だから $|V_{fa}| \ll |V_r|$ 、従って、

$$V_a = |V_r + V_{fa}| \left(1 + \alpha_s + \frac{\delta_{AB}}{2} + \frac{V_{fa}}{G V_r^2} \right) \quad (6)$$

ただし、SV-A の感度定数を S_A 、SVC の可動部の復帰定数を U_0 として $G = G_1 G_2 G_3 S_A / 2U_0$ とする。

同様に SV-A への入力電圧が V_d で、帰還電圧が V_{fd} であるとき、可動電極 N が静止したとすると

$$|V_d| = |V_r + V_{fd}| \left(1 + \frac{\delta_{AB}}{2} + \frac{V_{fd}}{G V_r^2} \right) \quad (7)$$

従って、次式により交・直流電圧を比較できる。

$$\frac{V_a - |V_d|}{|V_d|} = \frac{V_{fa} - V_{fd}}{|V_r|} \left(1 + \frac{1}{G |V_r|} \right) + \alpha_s \quad (8)$$

この制御系の定常偏差は(6)式の $V_{fa}/G|V_r|$ および(7)式の $V_{fd}/G|V_r|$ で与えられる。上述のように $|V_{fa}|, |V_{fd}| \ll |V_r|$ であるから、これらの定常偏差を小さくすることは容易である。これは平衡操作の簡易化とならぶ本方式の大きな特色である。

〈3・4〉 過渡特性と分解能 SV-A への入力が直流電圧 V_d であるとき、SVC が $\theta = \theta_0, V_{fd} = V_{fd0}$ なる平衡状態にあるとする。ここで、 V_d に微小変化 $\Delta V_d(t)$ を与えたときの電極 N の回転角を $\theta = \theta_0 + \Delta\theta(t)$ とすると、 $\Delta\theta(t)$ は次式で与えられる。

$$(Jp^2 + Dp + U)\Delta\theta(t) = 2S_A V_d \Delta V_d \quad (9)$$

ただし、 p は微分演算子、

$$D = D_0 + 2S_A G_0 V_r \tau_0$$

$$U = U_0 + 2S_A G_0 V_r$$

であり、可動部の慣性モーメントを J 、制動定数を D_0 、制御定数を U_0 とし、 $G_1(p)$ は角変位-電圧変換器の、 $G_2(p)$ は直流増幅器の、 $G_3(p)$ は位相補償回路の利得とする。また、 $G(p) = G_1(p)G_2(p)G_3(p)$ は $|\Delta\theta(p)| \ll 1$ であり、且つ $G_3(p)$ の定常値が1より十分小さければ、 G_0, τ_0 を定数として近似的に $G(p)$

$= G_0(1 + \tau_0 p)$ なる一次式で表わせることを用いて(9)式を導いた。

SVC に用いた象限電位計は固有周期 36 秒、制動比 0.18 の著しい不足制動状態にあるが、上式の G_0, V_r および τ_0 の選択により固有周期を短く、制動比を大きくして過渡特性を改善できる。

SVC の固有角周波数 $(U/J)^{1/2}$ を ω_n として $\eta = 2\omega/\omega_n$ とおくと、SV-A への入力電圧が $v_a = \sqrt{2} V_a \sin \omega t$ であるとき、電極 N のふれ角 θ は定常状態でほぼ $(S_A/U) \cdot (V_a/\eta)^2$ を振幅とする振動成分を含む。〈4・4〉節(3)項に示すように ω_n は約 1.2 rad/s であるから、 $\omega = 120 \text{ rad/s}$ になると $\eta = 200$ となる。従って v_a の周波数が 20 Hz であるとき、電極 N は $(S_A/U) V_a^2 \times 2.5 \times 10^{-5}$ を振幅として振動し、 θ を直接に観測しては V_a の約 25 ppm 以上の分解能は得難い。しかし、SVC では帰還回路に含まれた直流増幅器の出力電圧を零中心の可動コイル形電圧計で測定する。この電圧計の固有角周波数は約 6 rad/s であるから、これを ω_n' とし、 $\eta' = 2\omega/\omega_n'$ とすると、この電圧計の指示に含まれる振動成分は $(S_A/U) \cdot (V_a/\eta')^2$ となり、検出できなくなる。従って、交・直流入力に対して SVC は等しい分解能を持つとみなせる。

4. 装置の構成と基礎的特性

以上の考察に基づき、SVC を第4図のように構成した。次に、その要点と基礎的特性につき述べる。

〈4・1〉 象限電位計 黄銅製円板を四等分してできる4枚の象限片を点対称に配置する。このような象限片群を二組作り、上・下に対向させて固定電極とした。アルミ薄板を2本の扇のかなめの位置で互いに重ね合せて点対称に配置した形に型抜きして可動電極とした。これは上・下固定電極群の中央に電磁オシログラフ用 No. 48 りん青銅ストリップを用いてつった。固定電極用象限片は半径 45 mm、厚さ 4 mm、可動電極は半径 25 mm、中心角 50°、厚さ 0.1 mm であり、

第4図 SVC の構成

Fig. 4. Composition of SVC.

ストリップの長さは 200mm とした。下部の象限片と可動電極は上下に平行移動させて、SVC の感度が高く、非対称誤差が小さくなるように電極間隔を調節する。この方針により決定した固定・可動両電極の間隔は約 1.5mm である。可動電極の軸は下端を自由端にし、電位計の基板の水平度を微調整して固定・可動両電極の相対的な位置関係を変化させ、非対称誤差を調整した。可動軸には、その回転角を光電的に検出するために平面鏡を取り付けた。各電極と可動軸に金を蒸着し、金属面の酸化を防ぐと共に電圧計素子 SV-A および SV-B に大きな表面電位差が生じないようにした。電位計本体は黄銅製容器内に収めて静電しゃへいした。容器に付けた観測用ガラス窓の内面には透明な導電性塗料を焼付けてある。

〈4.2〉 帰還回路 帰還回路は光電的な角変位-電圧変換器、直流増幅器および位相進み回路からなる。角変位-電圧変換器は一对の CdSe 光導電素子を用いる散乱光形の差動光電変換セル⁽⁹⁾を二辺とする直流ブリッジである。このブリッジの出力電圧の変化は可動軸の回転角に比例するから、これを増幅した電圧 V_i を位相進み回路を通して帰還電圧 V_f に変換する。直流増幅器は利得 20dB の直結形トランジスタ差動増幅器を用いた。位相進み回路は $R_1=90\text{ k}\Omega$, $R_2=10\text{ k}\Omega$, $C_1=16\text{ }\mu\text{F}$ にしたので近似的に利得は p の一次形であるとみなせる。角変位-電圧変換器や直流増幅器の利得は、この帰還回路で扱われる超低周波領域では定数とみなせるから、〈3.4〉節で仮定した $G(p)=G_0(1+\tau_0 p)$ なる近似が成り立つ。

電圧 V_f は別に直流安定化電源から得られる参照電圧 V_r に重ね合わせて SV-B に帰還される。また、電圧 V_i は SVC の出力として零中心の可動コイル形電圧計により測定される。

〈4.3〉 入力回路 SV-A と SV-B に互いに連動する可変分圧器を前置した。これらの分圧器は入力抵抗が $17\text{ k}\Omega$ であり、これらを用いてそれぞれの入力電圧をほぼ同時に $(n/12)^{1/2}$ ($n=0, 1, 2, \dots, 12$) なる比で段階的に分圧できる。測定にあたっては、まず $n=0$ として両分圧器への入力電圧をほぼ等しく調整する。次に、 n を順次増して最後に $n=12$ として分圧器への入力電圧を直接に SV-A および SV-B に印加する。実測によると、分圧比を 0 から 1 あるいは 1 から 0 まで変化させると、 V_f は約 20mV のピーク電圧を含むが、短時間内に定常値に落ちつく。また、この操作を繰り返しても V_f の定常値の変動は、 $\pm 0.1\text{ mV}$ より小さかった。

〈4.4〉 基礎的諸特性 SVC の安定度、雑音、分

第 5 図 特性測定回路

Fig. 5. Measuring circuit of characteristics.

解能、過渡特性および定常偏差を第 5 図に示した接続により測定した。これらの測定結果の検討に先だち、SVC の表面電位差とその影響につき整理しておく。

SV-A および SV-B の電極面には水分などの有極性分子あるいはイオンが吸着して電気二重層をなし、ここに生じる二重層電位差は接触電位差と共に入力電圧に重ね合わせられて駆動トルクの大きさに影響する。接触電位差と二重層電位差との和をここでは表面電位差と呼ぶ。表面電位差は電極面に均一には分布せぬが、たかだか 100mV 程度であり、SVC の測定範囲 100V より十分低いから、等価的には電極の全面にわたる平均値を用いることができる。このような表面電位差が SV-A で p_A , SV-B で p_B であるとする。

いま、SV-A への入力が V_d , SV-B への入力が V_d+V_f で、 $G|V_d|\gg 1$ のとき可動電極が静止したならば、トルクの平衡条件により、

$$V_f = p_A - p_B - (\delta_{AB} V_d / 2) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、SV-A の入力を $V_d + \Delta V_d$ にすると SV-B への入力が $V_d + V_f + \Delta V_f$ になったならば

$$\Delta V_f \approx \{1 - (\delta_{AB} / 2) - (1/G|V_d|)\} \Delta V_d \quad \dots\dots\dots (11)$$

(1) 安定度および雑音 $V_d=100\text{ V}$, $\Delta V_d=0\text{ V}$ として記録した V_f を第 6 図に示す。(10)式によるとこの図は SVC の零点の安定度を表す。 V_f は振幅が最大 0.5mV、通常は 0.2mV 程度の雑音を含む。また、 V_f のドリフトは 0.2mV/h 程度である。このドリフトは(10)式によると表面電位差 p_A, p_B あるいは非対称誤差 $\alpha_{AB} V_d / 2$ によると考えられるが、同式に現れないつり線あるいは光電変換器の零点のドリフトにもよると考えられる。SV-A の入力電圧 20~100V に比較して V_f のドリフトは小さく、直線的である。更に、SVC の使用手順は SV-A への入力を交流-直流(正)-直流(負)-交流の順に切換えて測定し、一つの平均値を求める。これを数回繰り返して測定を終わるが、その所要時間は約 20 分であるから、ドリ

第 6 図 $\Delta V_d - V_f$ 特性Fig. 6. V_f vs. ΔV_d .

フトの影響による誤差は無視できる。なお、上記諸要因のうちいくつかの影響が大きいかかわらず、それが相殺して結果的に V_f のドリフトが小さくなる可能性は非常に少ない。従って表面電位差、非対称誤差などのドリフトは生じるとしても、いずれも 0.2mV/h と同程度以下であるとみなしてさしつかえないであろう。

(2) 分解能 第 6 図の右端に ΔV_d の階段状変化に伴う ΔV_f の変化の状態を示した。それによると入力が 100V のとき SVC は約 2ppm の分解能を持つ。

(3) 過渡特性 第 6 図は自動平衡式 2 ペン記録計による記録であり、 ΔV_f は ΔV_d より $1/4$ 目盛遅れて記録されている。使用した記録計の応答は SVC の応答より十分早いから、同図には ΔV_f が忠実に記録されたとみなせる。これによると、SVC の固有周波数は 0.2Hz 、制動比は 0.8 、応答時間は約 3 秒である。

(4) 定常偏差 $V_d = 100\text{V}$ として測定した $\Delta V_d - \Delta V_f$ 特性は $\Delta V_f = 0.980 \Delta V_d$ なる関係にあったから、SVC の定常偏差は 2.0% である。従って、SVC により比較される交・直流電圧が約 100V で、両者の差が 100ppm であると、測定値は定常偏差に因して約 2ppm の補正を要する。

5. 交直差に関する考察

先に著者は静電電圧計一般の交直差⁽⁶⁾に関して考察した。これを参照すると、SVC の交直差は次の諸要因により生じる恐れがある。

(1) 交・直流の入力電圧の電極間電圧との不-

致：電極の表面電位差、電極間の酸化被膜、つり線のインピーダンスなどの回路定数

(2) 交・直流電圧に対する電極間静電容量の不一致：電極面への吸着物質、電極の形状・寸法
更に、SVC 本体とは別に、使用する電圧の波形ひずみの影響も挙げられる。

〈5.1〉 表面電位差の影響 SVC の表面電位差が外部電界に無関係に一定であれば、SV-A の入力電圧が直流電圧であるとき、その極性を転換して得る二つの測定値の平均を直流の測定値として表面電位差の影響を除去できる。前述の文献(6)によると、SV-A の表面電位差のうち接触電位差は外部電界に無関係に一定であるが、二重層電位差は外部電界によりわずかに変化する可能性をもつ。いま、SV-A への正極性の直流入力電圧を V_d^+ 、負極性の直流入力電圧を V_d^- 、交流入力電圧を V_a とし、 κ を外部電界の影響による二重層電位差の変化率とする。表面電位差の影響による SVC の交直差を α_p で表すと、 α_p は次式で与えられる。ただし、 $V_d = (V_d^+ + V_d^-)/2$ と置いた。

$$\alpha_p \approx \kappa (V_d - V_a) / |V_r| \quad \dots\dots\dots (12)$$

SV-A への入力電圧が $20 \sim 100\text{V}$ であれば、(12)式において $\kappa (>0)$ は 10^{-5} より小さい。また、 V_d^+ 、 V_d^- 、 V_a 、 $|V_r|$ などはあらかじめほぼ等しくなるように調整しておくから、 α_p は 1ppm より小さくて無視できる。すなわち、SVC では SV-A への直流入力電圧を転換して得た二つの測定値の平均値を直流入力電圧に対する測定値として用いることにより表面電位差の影響を除去できる。しかし、実際には帰還電圧 V_{fa} および V_{fd} のドリフトを考慮して α_p は $0\text{ppm} \pm 1\text{ppm}$ 程度に見積るべきであろう。なお帰還電圧が入力 V_d^+ に対して V_{fa}^+ 、入力 $-V_d^-$ に対して V_{fa}^- であれば、 $(V_{fa}^+ + V_{fa}^-)/2$ を(8)式における V_{fa} として用いる。

〈5.2〉 酸化被膜の影響 SV-A の電極面が酸化被膜で覆われると、等価的には SV-A の固定・可動両電極が構成する空気コンデンサに被膜が構成するコンデンサが直列接続されたと見られる。このため、入力が交流であれば電極間電圧の入力電圧より低くなり正の交直差が生じる。しかし、SV-A の全電極面には金を蒸着してあるから、表面は酸化しない。従って、SVC の酸化被膜の影響による交直差は零とみなせる。

〈5.3〉 回路定数の影響 SV-A への入力が角周波数 ω なる交流電圧 V_a であるとき、SVC の等価回路は第 7 図のように書ける。同図で電極 A、B、N 相互間のインピーダンスは純容量性とみなせる。また、つり線および交流側の接続導線のインピーダンスをそ

第 7 図 交流入力に対する SVC の等価回路
Fig. 7. Equivalent circuit of SVC to AC input.

それぞれ $Z_{su} = R_{su} + j\omega L_{su}$, $Z_{la} = R_{la} + j\omega L_{la}$ とし、端子 N, B 間の参照電圧源その他の回路素子のインピーダンスを Z_d とする。 Z_{su} , Z_{la} , Z_d は $1/\omega C_{NA}$, $1/\omega C_{NB}$ および $1/\omega C_{AB}$ より十分小さい。従って、SVC の回路定数の影響による交直差を α_l とすると、

$$\alpha_l = -\omega^2 \{L_{la}(C_{NA} + C_{AB}) + L_{su}C_{NA}\} \quad (13)$$

ここで、 $C_{NA} = 7.5 \text{ pF}$, $C_{AB} = 15 \text{ pF}$ である。また、SV-A と分圧器との接続に用いたビニル被覆導線の長さは片道約 3m であるから、 L_{la} は約 $3 \mu\text{H}$ になる。また、つり線は幅 0.1mm、厚さ 0.05mm、長さ 200mm のリン青銅帯であり、これが内径 24mm の黄銅製円筒の中心軸に沿ってつられるから、 L_{su} は約 $0.2 \mu\text{H}$ 以下であろう。従って、20kHz 以下では $-1 \text{ ppm} < \alpha_l < 0 \text{ ppm}$ であると考えられる。

〈5・4〉 電極面への吸着物質の影響 SV-A の電極面への吸着物質のうち、拡散層にある分は固定層の近くで液相、次いで気相を示すであろう。これらのうち、主として液相の部分誘電体膜とみてその影響を検討する。

まず、吸着物質は水であるとする。電極 N, A の表面にできる水の膜の厚さを t_1, t_2 、電極間隔を d とし、空気の誘電率を ϵ_a 、水の誘電率を ϵ_w とすると、 $t_1, t_2 < d \times 10^{-6}$ であろうから、電極 N, A 間の単位面積あたりの静電容量を C_{NA}' で表して、

$$C_{NA}' \approx 1 / \left(\frac{d}{\epsilon_a} + \frac{t_1 + t_2}{\epsilon_w} \right) \quad (14)$$

可聴周波以下では $\epsilon_a \approx 1$, $\epsilon_w \approx 80$ であり、(14) 式右辺の分母の第 2 項は第 1 項に対して無視できる。従って、電極面に吸着した水の影響による SVC の交直差は無視できる。但し、電極面に油を付着させると、SVC に交直差を生じさせる恐れがある⁽⁷⁾ ので注意を要する。

〈5・5〉 電極の寸法・形状の影響 空気コンデンサ

第 8 図 C_{NA} , C_s の比較法
Fig. 8. Comparing method of C_{NA} and C_s .

の静電容量に対する電極系の形状寸法の影響は、電極中の電流分布と電極間の電界分布の周波数特性に起因し、理想的なガードリング形コンデンサの計算例では静電容量の周波数誤差は周波数の平方に比例して増すが、20kHz 以下では 1ppm より十分小さい⁽⁸⁾。しかし、SV-A の電極系の形は複雑であるから、この例を直接には適用できず、また計算も困難である。そこで、SV-A のとは形状・寸法が全く異なる標準可変空気コンデンサの静電容量と SV-A の静電容量の周波数特性を相互比較して検討することにした。

比較は第 8 図のように三巻線変成器ブリッジを用い、可変空気コンデンサ C_r を仲介にして置換法により 0.5~20kHz において行った。SV-A の入力静電容量を C_{NA} 、標準可変空気コンデンサの静電容量を C_s とする。 C_{NA} は周波数 f_1 および f_2 のときそれぞれ $C_{NA1} = C_{NA}(1 + \delta_{NA1})$, $C_{NA2} = C_{NA}(1 + \delta_{NA2})$ となり、これらに対応する C_s の測定値が C_{s1}, C_{s2} であり、それらの補正率が δ_{s1}, δ_{s2} であれば $|\delta_{s1}|, |\delta_{s2}|, |\delta_{NA1}|$ および $|\delta_{NA2}|$ が 1 より十分小さいとき、

$$(C_{s2} - C_{s1})/C_{s1} \approx (\delta_{NA2} - \delta_{NA1}) - (\delta_{s2} - \delta_{s1}) \quad (15)$$

C_s には目盛の直線性に特に留意した垂直回転式の Zickner 形標準可変空気コンデンサ⁽⁹⁾を用いた。これは同軸に配置した 2 個の円弧状電極を主電極とし、これらの間に 1 個の円弧状電極をそう入してガード電極とし、これを回転させて主電極間の静電容量を変える。主電極は厚さ 4mm、ガード電極は厚さ 3mm の黄銅製で、全表面に金をめっきしてある。このコンデンサは最大目盛 10pF で最小 $5 \times 10^{-5} \text{ pF}$ の変化を直読でき、この実験で予想される微小調整範囲では目盛間隔に関する補正率は一定である。SV-A の軸は熔融

第9図 C_{NA} , C_S の比較結果Fig. 9. Result of comparison of C_{NA} and C_S .

水晶片ではさみ、電極 N の位置の変動とそれに伴う C_{NA} の変動を抑制した。

第9図に測定結果を示す。同図の各点は 0.5~20 kHzにおいて周波数の上げ下げを3サイクル繰り返す間に得られた測定値の平均を表す。これらにより導いた実験式は C_{NA} と C_S の周波数特性が一致していることを示す。この傾向は文献(8)を引用すれば直流まで延長できるであろう。比較された二種のコンデンサの電極は形状・寸法が著しく異なるから、それらの影響が大きいならば周波数特性が一致する可能性は少ない。従って、 C_{NA} と C_S の周波数依存性は 20kHz 以下では 1ppm より小さくて無視できる。ただし、その確率誤差は 2ppm であったから、電極の形状・寸法の影響による SVC の交直差 α_c は 20kHz 以下では不正確さ 6ppm を見込んで 0ppm とみなすべきであろう。

(5・6) 電源電圧の波形の影響 SVC では交流電圧 v_a の実効値と直流電圧 V_d が参照電圧 V_r を介して比較される。従って、 v_a の波形ひずみ、 V_r のリップルが小さければ、それらによる誤差は 1ppm より十分小さくて無視できる。 V_d が含むリップル ΔV_d (波高値) は誤差の原因となり、その影響による SVC の交直差を α_r とすると、

$$\alpha_r = (\Delta V_d / \sqrt{2} V_d)^2 \dots\dots\dots (16)$$

計測用定電圧源から供給される V_d のリップルは 40 μ V (実効値) 程度にできる。 $V_d = 20$ V としても α_r は 1ppm より十分小さくて無視できる。

6. 交直差の実験的検討

前章の考察により、20Hz~20kHz における SVC の交直差 α_s には、表面電位差に関する不正確さ ± 1 ppm、電極間静電容量に関する不正確さ ± 6 ppm と回路定数の影響による -1 ppm が関係し、総合的には精度を 8ppm として 0ppm とみなせる。但し、この結論は SVC に交直差をもたせる恐れのある要因を可能な限り挙げ、それらの影響を検討した結果であるにすぎない。このような SVC の領域内のみでの検討によっては上記の結論が必ずしも高い信頼性をもつとは判断し難い。しかし、この結論の実証に使える高精度の

標準器は現状では存在しない。但し、交直差が SVC と同程度の精度で決定された熱電形交直流電圧比較器 (以下、TVC と略称する) はあるので、両比較器の交直差を相互比較により検討した。TVC は原理的には電流-電圧変換作用の交直差が小さい真空熱電対のヒータに周波数特性の良い抵抗器を直列接続して構成され、その交直差は SVC の交直差と著しく異なる原因により生じるから、SVC との比較の対象として理想的である。

使用した TVC は絶縁形真空熱電対のヒータに、パラフィン油に浸した金属被膜抵抗器を直列接続したもので、これを第10図のように SV-A に並列接続した。両比較器に交・直流電圧を〈4・4〉節(1)項に述べた手順で印加し、熱電対の起電力が交・直流入力電圧に対して等しくなるように直流入力電圧を調整する。いま、帰還電圧が V_{fa} および V_{fd} になるとき SVC の電極が静止したならば、TVC および SVC の交直差のうち補正可能な分をそれぞれ α_r' , α_s' とし、補正不可能な分をそれぞれ α_r'' , α_s'' とすると、オフセット誤差を無視すると、

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &\equiv \alpha_r'' - \alpha_s'' \\ &= (V_{fa} - V_{fd}) / |V_r| - (\alpha_r' - \alpha_s') \end{aligned} \dots\dots\dots (17)$$

TVC はヒータにニクロタール線を用い、 α_r' は 60 Hz で -10 ppm、1kHz で -22 ppm、4kHz で -41 ppm、 α_r'' は上の周波数帯で ± 16 ppm とされていた。なお、この実験に用いた TVC は当所で初期に開発されたもので、最近では直列抵抗器をはじめ多くの点が著しく改善され、上記周波数帯で α_r' は -10 ppm、 α_r'' は ± 15 ppm とされている。一方、SVC では α_s' は 0ppm、 α_s'' は ± 8 ppm と見積ったことは上に述べた。

測定電圧を 100V として得た $\Delta\alpha$ の平均値を第11図に示す。各測定値の確率誤差は測定電圧の変動の影響

第10図 TVC と SVC との相互比較

Fig. 10. Circuit for intercomparison of TVC and SVC.

第 11 図 TVC と SVC との比較の結果

Fig. 11. Result of intercomparison of TVC and SVC.

響により $\pm 8 \text{ ppm}$ になった。同図によると、 α_r'' と α_s'' は $60 \text{ Hz} \sim 4 \text{ kHz}$ において $\pm 10 \text{ ppm}$ の範囲内で一致する。この範囲は α_r'' と α_s'' の値を用いて計算した $\Delta\alpha$ の不正確さ $\pm 19 \text{ ppm}$ より狭い。これらのことから、 $(i)\alpha_r''$ と α_s'' がともに $\pm 10 \text{ ppm}$ より十分大きな値をもちながら互いに相殺して $\Delta\alpha$ が $\pm 10 \text{ ppm}$ の範囲にある可能性は少なく、 $(ii)\alpha_r''$ と α_s'' とは共に $60 \text{ Hz} \sim 4 \text{ kHz}$ において $\pm 10 \text{ ppm}$ の範囲内にある、と言えるであろう。なお、この実験では 4 kHz 以上では α_r' が大きくなり、(17)式における V_{fs} が SVC の測定範囲を越えるので実験できなかった。

前章の考察によると、SVC の交直差 α_s は周波数依存性が小さく、 $20 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$ において、精度を 8 ppm として 0 ppm と考えられる。上述の実験によると、 α_s は $60 \text{ Hz} \sim 4 \text{ kHz}$ において $(0 \pm 10) \text{ ppm}$ とみなせる。これらの二つの結論から、 α_s は $20 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$ において精度を 10 ppm として 0 ppm であるとしてさしつかえないであろう。なお、TVC については補正不可能な交直差 α_r' が $\pm 16 \text{ ppm}$ とされていたが、この実験によると $\pm 10 \text{ ppm}$ としてさしつかえないと考えられる。

7. ま と め

象限電位計を静電形トルク平衡計器として用いる静電形交直流電圧比較器 (SVC) を構成した。SVC の主な性能を第 2 表に示す。この SVC は静電形計器として最高級のものであるばかりでなく、交直流電圧比較器としても高性能のものの一つである。しかし、SVC は装置がデリケートで持ち運びに不便であり、応答時間が長いなどの欠点を持つ。従って、実用性には欠けるが、前章に述べた熱電形交直流電圧比較器との相互

第 2 表 SVC の特性

Table 2. Performance of SVC.

比較方式	交流電圧(実効値)-直流電圧の置換法	
使用電圧範囲	20~100V	
比較範囲	使用電圧の $\pm 100 \text{ ppm}$ 以内	
使用周波数範囲	20 Hz~20 kHz	
応答時間	3 秒	
	測定電圧 100V の場合	測定電圧 20V の場合
零点のドリフト	2 ppm/時	10 ppm/時
平衡検出限界	$\pm 2 \text{ ppm}$	$\pm 10 \text{ ppm}$
交直差	$0 \pm 2 \text{ ppm}$	$0 \pm 10 \text{ ppm}$
オフセット誤差 (補正可能)	2 ppm	10 ppm
非対称誤差 (調整後)	$< 1 \text{ ppm}$	$< 1 \text{ ppm}$
参照電圧の安定度	$\pm 1 \text{ ppm}$	$\pm 1 \text{ ppm}$
R S S	11 ppm	15 ppm

比較を通じて、我が国の交流電圧標準の確立に一つの重要な根拠を与えた。近年、電気計測の精度向上が重視されているので、この面では SVC の研究は今後とも重要な意義をもつであろう。

終わりに、この研究を進めるにあたり、多大の御援助を賜った元電子技術総合研究所標準計測部長(現玉川大学教授)菅野 允博士、同所標準計測部電気標準研究室長平山宏之博士、共同実験の結果を引用させていただいた同研究室の岩本俊一氏をはじめ、象限電位計の製作に積局的に協力して下さった元東京精密測器(株)社長池辺常刀博士に深く感謝する。

(昭和 50 年 10 月 20 日受付)

文 献

- (1) 山崎: 電子計測 14, 19 (昭 49-7)
- (2) 岩本・平山: 電気学会電気測定研究会 EM-74-32 (昭 49-5)]
- (3) 山崎: 電気学会論文誌 95-A, 379 (昭 50-9)
- (4) 山崎・緒方: 電気試験所集報 29, 786 (昭 40-10)
- (5) 桜井: 計測制御学会予稿集 278 (昭 40)
- (6) 山崎: 電気学会論文誌 96-A, 111 (昭 51-3)
- (7) B. D. Inglis: IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-24 133 (1975)
- (8) 飯島: 電気試験所集報 20, 820 (昭 31-11)
- (9) 飯島, 他: 電気試験所研究報告 No. 670, 50 (昭 41)