

雑音重畳回路を用いた低周波ラインインピーダンスの測定

Measurement of Low-Frequency Powerline Impedance Using a Noise Superimposer

甲木昭彦・石丸仁志・松島雅寛

九州工業大学 情報工学部

福岡県飯塚市川津680-4 (〒820-8502)

A. Katsuki, S. Ishimaru, and M. Matsushima

Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

680-4, Kawazu, Iizuka-shi, Fukuoka 820-8502

(1998年10月15日受理, 1999年1月21日採録)

A new method for measuring the low-frequency impedance of energized single-phase powerlines is proposed, and measured data in the frequency range of 100 Hz–20 kHz are presented. To estimate the quantity of noise generated in commercial ac lines, we have to know the frequency characteristics of the line impedance. In the high-frequency range (20 kHz–30 MHz), experimental results have already been reported. However, it seems that data on the low-frequency range have not yet been reported. Because the audio-frequency range contains many harmonics of higher frequency than commercial ac, the data in this frequency range are indispensable for evaluating distortions. The proposed measurement circuit was constructed by using our original noise superimposer.

Key words: commercial ac, line impedance, higher harmonics, distortion, noise superimposer

1. まえがき

商用交流は商用周波数以外にその高調波成分を含んでおり、高調波による障害は家電を含むエレクトロニクス全体の重大事と認識されている。交流ラインに非線形負荷を接続すると、ライン電圧が正弦波であっても高調波電流が発生する。高調波電流はラインのインピーダンスに応じて電圧を変動させるため電圧波形を歪ませることになり、低圧配電線での全高調波歪率が7~8%にも達することがあると言われている¹⁾。これらの高調波は、同じ系統に接続された機器に程度の差はあるが影響を与える。保護継電機器等の誤動作をはじめ、電力用コンデンサの発熱、劣化による信頼度の低下、焼損、更にはこれらが原因で人身事故に至った例も報告されるなど社会問題化している。

そこで最近では、高調波電流を抑制するための規格あるいは規制を満たすように設計製作された機器が増えてきた。規格・規制は、国際電気標準会議IEC (International Electrotechnical Commission) が作成した高調波に関する抑制規格に整合することを基本とし、各国の特殊事情を考慮して制定される。例えば比較的小電力で多数使用される機器を対象としたものとしては、一般低電圧電力系統に接続する機器の入力電流16 A以下の機器に対する高調波発生限度値を含むIEC規格である1000-3-2²⁾を基本とした国内のガイドラインが、文献(3)に示されている³⁾。

従来、商用交流で動作する電子機器の電源の入力部分には、整流回路とコンデンサ入力型平滑回路とが使われてき

た。この場合、ライン電流がパルス状になるため高調波電流を発生し、同時にライン電圧よりも電流の位相が進むため力率の低下が起こる。結果として、電力系統における設備投資が増え、消費者は電力料金に関して不利益を被ることにもなる。そこで、入力電流を正弦波に近づけかつ入力力率を1に近づけることを目的としたPFC (Power Factor Correction) 回路またはアクティブフィルタと呼ばれる電源回路が開発され実用に供せられている⁴⁾。

商用交流ラインに生ずるノイズを定量的に評価するには、ラインインピーダンスの周波数特性を把握しておく必要がある。高周波領域(通常、20 kHz~30 MHz)を対象とした測定結果は既に報告されているが^{5),6),7)}、高調波の周波数帯については測定結果の報告例は見当たらないようである。しかし、文献(3)では、機器が発生する高調波電流の測定に際して、基準ラインインピーダンスの値を指定している。すなわち、歪みおよび電圧変動が少なく周波数が正確な測定用電源と供試機器との間に測定用機器を接続し、測定用機器の入力インピーダンスと測定用電源の内部インピーダンスとを加算した値を基準インピーダンス(例えば単相2線100 V機器の場合は、直流抵抗分 $0.4 \Omega \pm 8\%$ とインダクタンス分 $0.37 \text{ mH} \pm 8\%$)に合わせる。基準インピーダンスは、実際のラインインピーダンスを正確に模擬しようとしたものではなく、機器の試験という立場から安全策となるよう実際のインピーダンスと比較して同等または低めかつ簡単なインピーダンス回路で表されるように決められたものと考えられる。

このような背景から、本論文では、低次の高調波成分が含まれる100 Hzから20 kHzまでの周波数帯について、ラインインピーダンスの測定結果を報告する。低周波におけるラインインピーダンスは高周波におけるそれよりも低いことが予想されるため、筆者らが以前に提案した雑音重畳回路⁸⁾を用いた新しい測定回路を考案して使用した。その結果、ラインインピーダンスは、約10 kHz以下で周波数にあまり依存せず1~3程度程度の低い値であることなどが分かった。

2. 測定回路

提案する測定回路をFig.1に示す。この回路は、雑音重畳回路とLC負荷とからなっている。 f_c , f_n , および Z_{cn} は、それぞれ商用交流周波数、測定信号周波数、および単相コンセントから配電線側をみたインピーダンスを表す。 v_c , v_n , i_c , および i_n は、それぞれコンセント端子間電圧の商用交流

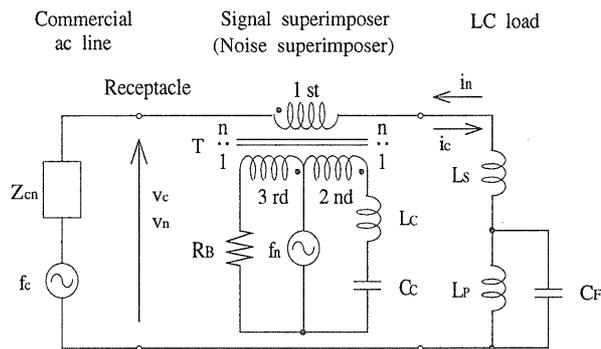


Fig. 1 Circuit of the noise superimposer for measuring powerline impedance.

成分, 同じく測定信号成分, 商用交流電流, および測定信号電流である.

2. 1 雑音重畳回路

雑音重畳回路は, 巻数比 $n:1:1$ の3巻線変成器T, インダクタ L_c , およびキャパシタ C_c とからなる. L_c と C_c とは, f_c で共振する直列共振回路を構成する. すなわち,

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} \quad (1)$$

いま, 抵抗 R_b をこの共振回路の f_c に対するインピーダンス(共振回路の損失分)に相当する値に選ぶと, 変成器ブリッジの原理により測定信号源に商用交流電流は流れない. 一方, 測定信号電流は, f_n が f_c に接近していなければ, R_b を通してTの3次側から1次側へと流れ出る.

Tの1次側巻線端子からみた雑音重畳回路の f_n に対するインピーダンスは, 測定信号源の内部インピーダンスが十分低いとすると, R_b を1次側に換算した値 $n^2 R_b$ と同巻線の巻線抵抗, 漏れインダクタンスなどの和になる. n を1に比べて十分小さく選べば, このインピーダンスを極めて低くすることができる. 同時に, 測定インピーダンスが低い場合でも, 測定信号源からみた負荷インピーダンスを適正な値に変換することができる.

2. 2 LC負荷

測定のための負荷は, 電力消費ができるだけ少ないことが好ましいので, LおよびCの組み合わせ回路を用いた. f_c に対しては並列共振し高インピーダンスを示して i_c を抑制でき, f_n に対しては直列共振し低インピーダンスを示して i_n を低いインピーダンスで送出できる回路とした. 今回の測定では f_n が f_c よりも高いこと, かつできるだけ少ない数のLまたはCを用いることを考慮して, Fig.1に示したLC負荷を用いた. ここで,

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_f}} \quad (2)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L_s L_p}{L_s + L_p} C_f}} \quad (3)$$

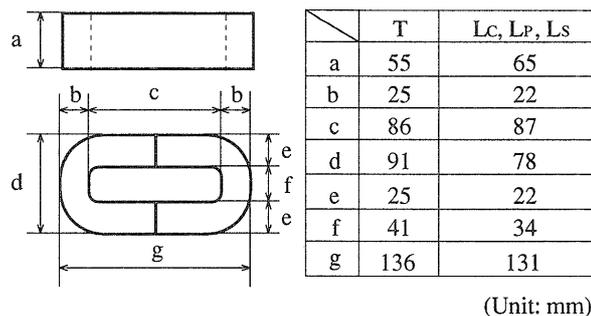


Fig. 2 Dimensions of magnetic cores.

2. 3 測定方法

v_n と i_n を求めると Z_{cn} を算出できる. i_n については, Tの1次側巻線端子からみたインピーダンス(2. 1参照)とLC負荷の直列共振時の損失抵抗との和に相当する出力インピーダンスでラインへ送り出される. 測定しようとするラインインピーダンスが低いと予想される場合は, 出力インピーダンスをできるだけ小さくすることが測定精度の点から好ましい.

商用交流電流に関しては, LC負荷のインピーダンスを大きくして i_c を小さな電流とし, 次に n を1に比べて十分小さくしてTの2次側および3次側巻線を通る電流を小さくし, さらに変成器ブリッジの原理により測定信号源に流入する商用交流電流を極めて小さな値に抑制している. コンセント端子間電圧に商用交流の高調波成分を含む場合, 高調波周波数に対しては商用周波数に対してよりもLC負荷のインピーダンスが小さくなるが, 各高調波周波数成分電圧の大きさは基本波電圧の大きさに比べて低次高調波でも数%程度以下であるから, 測定信号源に流入する高調波電流も同様に極めて小さな値に抑制される. このことから, 測定信号源には通常の低周波電力増幅器を使うことができる.

3. 実験結果

我々の実験室で単相100Vの商用交流ラインについてインピーダンス測定を行った. f_c は60Hzである. T, L_c , L_p , および L_s にはFig.2に示すような形状(インダクタのみギャップ有り)の方向性ケイ素鋼板C型カットコアを用いた. 低いラインインピーダンスに対しても測定を可能にするため, インダクタには低損失のコアを使用した. n は0.2とした.

まず, 測定信号電流の大きさを決めるために, ラインインピーダンスの電流依存性を調べた. i_n の大きさについては, 約0.6A以下では測定の際にノイズの影響を受けやすいこと, 必要以上に大きな電流をラインに流し込むと同じライン上の他の機器に悪影響を及ぼす可能性があることから, Fig.3に示す $|Z_{cn}|$ の i_n 依存性の測定データを考慮して今回は0.8Aとした.

Fig.4に, $|Z_{cn}|$ の周波数特性についての測定値を示す. Fig.4のデータは, 1997年10月, 1998年1月, 4月, および7月の平日および休日に, それぞれ午前8時頃, 午後2時頃, および8時頃の3回測定して得たものである. 各測定周波数について, プロットした点は24回のデータの平均値を表している. その点の上下に, それぞれ最大値および最小値が示

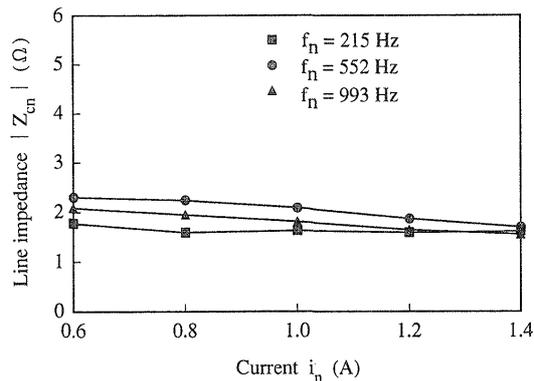


Fig. 3 Dependence of the line impedance on the measurement current.

されている。今回は、安定した測定を行うため、測定信号電圧および電流の平均処理時間を十分長くした。Fig.4から、約10 kHz以下ではインピーダンスの変化が少なくなることが分かった。これについては、ラインのインダクタンス分がインピーダンスにあまり影響を与えなくなり、代わって電源端子から見た機器のインピーダンスが支配的になるためと思われる。更に、約300 Hz付近にピークが現れることも分かった。なお、各測定日ごとのデータは付録を参照されたい。1年にわたる測定の結果から、季節、平日・休日、または測定時刻に対するインピーダンスの依存性の有無を明確に確認することはできなかった。

Fig.5は、基準ラインインピーダンス（抵抗0.4 Ωおよびインダクタ0.37 mHの直列回路のインピーダンス）の大きさの周波数特性を計算したものである。Fig.5とFig.4とを比較すると、約700 Hz以下では基準ラインインピーダンスの方が実際のラインインピーダンスよりも低いという結果を得た。機器が発生する高調波電流の供給源が機器内部にある電圧源と考えられる場合は、ラインインピーダンスが低いほど高調波電流が大きくなるため、機器の試験としては基準ラインインピーダンスの大きさを実際のラインインピーダンスの大きさに比べて同等または小さめに設定することは安全策であると言える。電源電流に含まれる高調波の大きさは次数の増加と共に通常小さくなることを考慮すると、より重要な低次高調波の周波数帯で基準ラインインピーダンスが有効であることを確認できた。

4. むすび

可聴周波数のうち100 Hzから20 kHzまでについて、筆者らの実験室において商用コンセントから配電線側をみたインピーダンスを測定し、1 Ω程度の低インピーダンスのラインに対しても通常の低周波電力増幅器で無理なく測定電流を流し込めることを確認した。電力システムに含まれる高調波は負荷の性質（特に整流回路を持つ家電品の占める割合）およびシステムの短絡容量などに依存するため、ラインインピーダンスも時々刻々変動する。従って、今後の課題として測定信号処理回路の改善が挙げられる。インピーダンスの実時間演算、インピーダンスの変動周期を考慮した最適な平均化処理の方法等について検討する必要があると思われる。

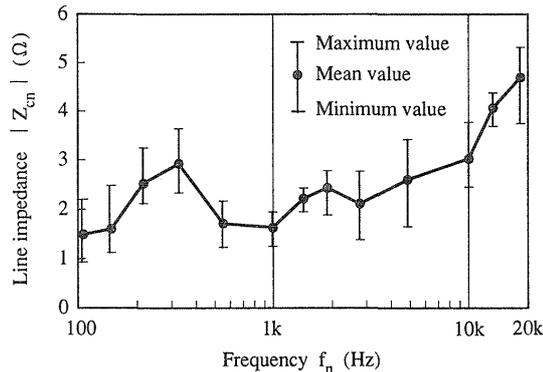


Fig. 4 Measured data on the low-frequency line impedance.

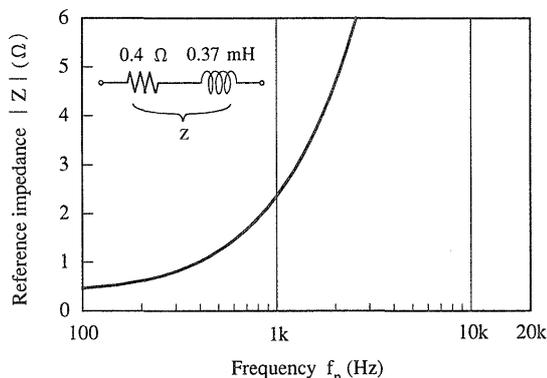


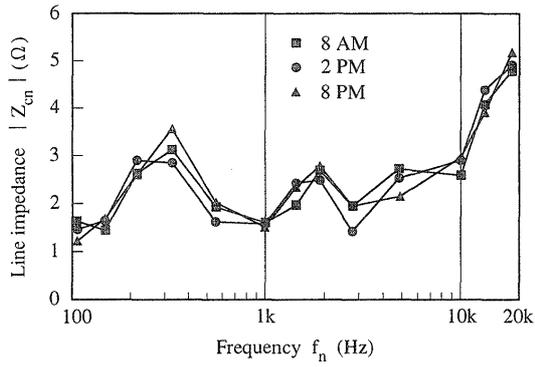
Fig. 5 Calculated values of the reference line impedance.

付 録

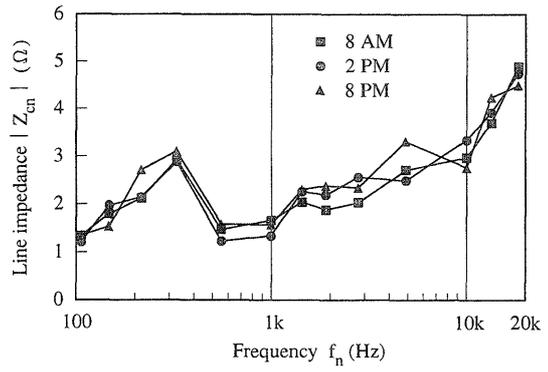
ラインインピーダンスの測定結果をFig.A1 (a) ~ (h) に示す。Fig.A1 (a) は1997年10月26日（日曜日），(b) は1997年10月30日（木曜日，平日），(c) は1998年1月22日（木曜日，平日），(d) は1998年1月24日（土曜日），(e) は1998年4月26日（日曜日），(f) は1998年4月27日（月曜日，平日），(g) は1998年7月3日（金曜日，平日），および (h) は1998年7月5日（日曜日）のデータである。

文 献

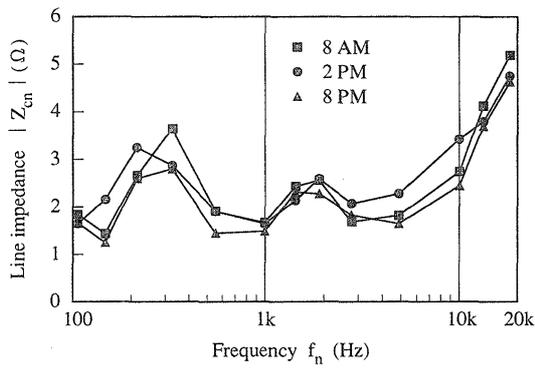
- 1) 原田耕介監修：スイッチング電源ハンドブック，p.357（日刊工業新聞社，東京，1993）。
- 2) IEC 1000-3-2, Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase) (1995)。
- 3) 通産省公報，高圧又は特別高圧で受電する需要家及び家電・汎用品の高調波抑制対策ガイドラインの策定について（1994）。
- 4) 原田耕介監修：スイッチング電源の高調波対策，p.28（日刊工業新聞社，東京，1997）。
- 5) 例えば，J.Qian and F.C.Lee: Proc. APEC 97, Atlanta, 1997, p.281（The IEEE Power Electronics Society and the IEEE Industry Applications Society, 1997）。
- 6) J.H.Bull: Electrical Review, 191, 745 (1972)。
- 7) J.A.Malack and J.R.Engstrom: IEEE Trans. EMC, 18, 36 (1976)。
- 8) 甲木昭彦，松島雅寛：日本応用磁気学会誌，18, 591 (1994)。



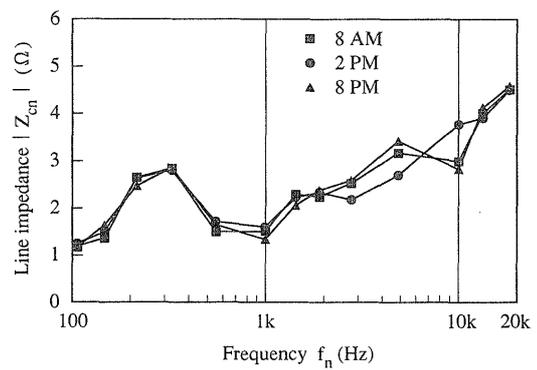
(a) October 26, 1997 (Sunday)



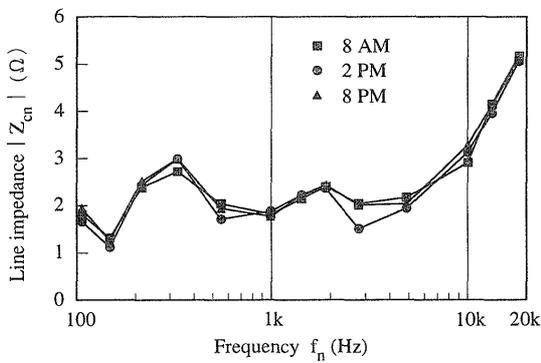
(e) April 26, 1998 (Sunday)



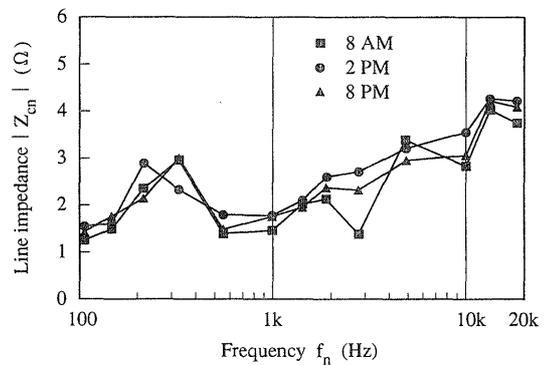
(b) October 30, 1997 (Thursday)



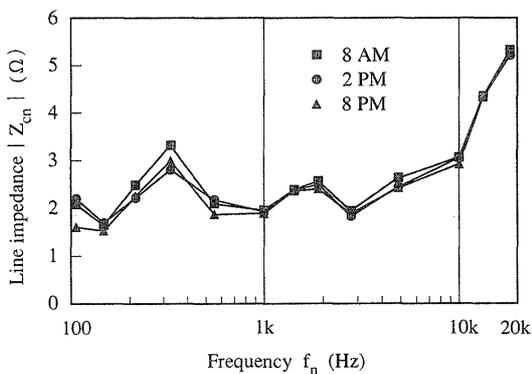
(f) April 27, 1998 (Monday)



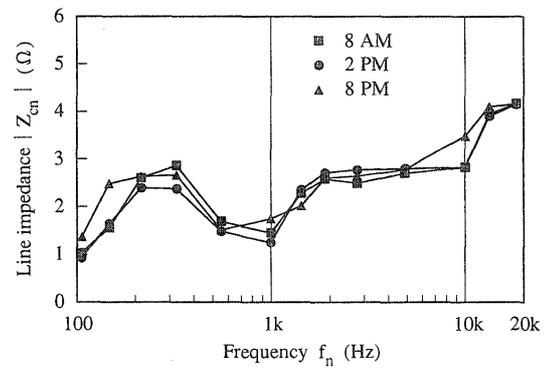
(c) January 22, 1998 (Thursday)



(g) July 3, 1998 (Friday)



(d) January 24, 1998 (Saturday)



(h) July 5, 1998 (Sunday)

Fig. A1 Measured data on low-frequency line impedance.