

21-P16

CHARACTERISTIC PARAMETERS OF CURRENT TRANSFORMER

Kenichi YANAGIDA, Hiroshi YOSHIKAWA, Shinsuke SUZUKI, Akihiko MIZUNO,
 Hironao SAKAKI, Toshihiko HORI, Yuichi Itho, Masahiko KODERA,
 Atsushi KUBA and Hideaki YOKOMIZO
 JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team
 JAERI, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, JAPAN

ABSTRACT

Optimization of characteristic parameters K_i and ω_i which determine the output of current transformer are studied. K_i is a parameter of maximum voltage generation per 1A and ω_i^{-1} is a minimum droop time of i -th droop. They depend on relative permeability, packing factor and size of the core. When the number of secondary windings is small, less than 3 turns, two or more droops appear because of not smaller K_i ($i \geq 1$).

電流トランスに於ける特性パラメータ

1.はじめに

線型加速器等に於いて壁電流モニタ（以下WCMと記す）や電流トランス（以下CTと記す）が電流モニタとして使用される。CTは勿論のこと、WCMに於いてもコアを用いる場合がある。それはドループ時間を長くする（バンド幅を上げる）ためである。コアを用いることによって、電磁結合によって信号を得ているWCMの周波数特性が著しく変化し、場合によってはCTとWCMの区別が明確ではなくなる。本論文ではコアの特性とCT及びWCMの出力特性との関係に就いて述べる。

2.CTの等価回路

CTの等価回路は、ビーム電流 I_b をシングルターンの1次電流 I_1 とし、コアに巻かれた N ターンのコイル上を2次電流 I_2 が流れるものとする。ここで、WCMは $N=1$ のCTと見なす。 I_2 の流れる向きは、コアの内側で I_b と同じ向きとする。 I_2 の負荷を抵抗 R とする。実際にはキャパシタンス C との並列接続であるが、 C は立上りに寄与する項であり、ここでは、立上り後を議論するので十分小さいとして省略する。我々は R の両端の電圧 V を出力としてオシロスコープ等で観測する。

コアの磁束変化によって発生する誘導起電力 V_L を、相互インダクタンス L_m 、2次側の自己インダクタンス L_s で表すと、;

$$V_L = -j\omega(L_m I_b + L_s I_2) \quad (1)$$

と表される。 L_m 及び L_s をシングルターンインダクタンス L 及び N で書き変えると以下のようなになる。

$$V_L = -j\omega N L (I_b + N I_2) \quad (1a)$$

$$L = \mu_r \mu_0 A \quad (2)$$

$$A = \frac{\eta S}{2\pi r} \quad (3)$$

ここで μ_0 は真空の透磁率、 μ_r はコアの比透磁率、 η はコアの線積率、 S はコアの断面積及び r はコアの平均半径である。 R に発生する電圧 V は I_2 と R の積であるが、(1a)との位相差 $\Phi(\omega)$ が存在するとし、(4)となる。 I_2 と I_b の関係は(5)になる。

$$\Phi(\omega) V = \Phi(\omega) I_2 R = V_L \quad (4)$$

$$I_2 = - \frac{1}{N + \frac{\Phi(\omega) R}{j\omega N L}} I_b \quad (5)$$

(5)に於いて、純抵抗負荷の場合、 I_2 と I_b は常に逆位相と考えられるので、 $\Phi(\omega) = j$ である。(4)及び(5)から V は以下のようなになる。ここで Z_e を実効インピーダンスと呼ぶ。

$$V = -I_b Z_e(\omega) \quad (6)$$

$$Z_e(\omega) = \frac{R}{N + \frac{R}{\omega N L}} \quad (7)$$

3. 周波数特性

μ_r が ω によって変化するため $Z_e(\omega)$ も変化する。一般にコアの μ_r はある特定の周波数 ω_0 まで μ_{r0} で一定であり、 ω_0 以上では、 μ_r は ω^{-1} に比例して低下する。そこで μ_r は模型的に(8)のように表せるとする。 $\omega \gg \omega_0$ では(8)は(9)の様に近似できる。

$$\mu_r = \frac{\mu_{r0}}{1 + \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (8)$$

$$\mu_r = \frac{\omega_0 \mu_{r0}}{\omega} \quad (\omega \gg \omega_0) \quad (9)$$

実際のコアでは $\omega \gg \omega_0$ に於いて、共鳴等により μ_r がもり上がった部分が存在する。この μ_r の非線形性を一般化して以下のように表す。

$$\mu_r = \frac{\mu_{r0}}{1 + \frac{\omega}{\omega_0}} + \frac{\mu_{r1}}{1 + \frac{\omega}{\omega_1}} + \dots \quad (8a)$$

$$\mu_r = \frac{\omega_0 \mu_{r0}}{\omega} \quad (\omega_1 \gg \omega \gg \omega_0) \quad (9a)$$

$$\mu_r = \frac{\omega_0 \mu_{r0} + \omega_1 \mu_{r1}}{\omega} \quad (\omega_2 \gg \omega \gg \omega_1)$$

.....

(7)に(2)(3)(8a)を代入すると;

$$Z_e(\omega) = \frac{R}{N + \frac{R}{\omega N \mu_0 A (\frac{\mu_{r0}}{1 + \frac{\omega}{\omega_0}} + \frac{\mu_{r1}}{1 + \frac{\omega}{\omega_1}} + \dots)}} \quad (10)$$

であり、(7)に(2)(3)(9a)を代入すると;

$$Z_e = \frac{R}{N + \frac{R}{N K_0}} \quad K_0 = \omega_0 \mu_{r0} \mu_0 A \quad (\omega_1 \gg \omega \gg \omega_0) \quad (10a)$$

$$Z_e = \frac{R}{N + \frac{R}{N(K_0 + K_1)}} \quad K_1 = \omega_1 \mu_{r1} \mu_0 A \quad (\omega_2 \gg \omega \gg \omega_1)$$

.....

である。ここで、 K_i は抵抗(Ω)の次元を持つ定数である。各 ω_i の中間領域で Z_e は ω に依らず一定になる。 $K_0 + K_1 + \dots (=K)$ は1A当たりの最大起電力を支配するパラメータである。最大値は $N = \sqrt{RK^{-1}}$ のと

き $Z_{e,max} = \frac{\sqrt{RK}}{2}$ である。

(10)に於いて、 Z_e がある K_i に対して仮想的(他の K_i が存在しないと仮定した時)に半分になる周波数の逆数 ω_{ci}^{-1} をドループ時間 τ_i とする(11)。ドループ時間は ω_i^{-1} より短くならないことがわかる。

$$\frac{1}{\tau_i} = \omega_{ci} = \frac{\omega_i}{1 + \frac{R}{N^2 K_i}} \quad (11)$$

上記 K_i 及び ω_i を出力 Z_e 及びドループ時間 ω_{ci}^{-1} を特徴付ける特性パラメータと呼ぶ。

4. 時間特性

Z_e をタイムドメインで観測した場合、矩形パルス電流入力(開始時刻を $t=0$ とする)に対して、出力は指数関数的に減衰し、ドループ時間 ω_{ci}^{-1} が時定数である。場合によっては、複数のドループ成分が現れることがある。これは(8a)のように μ_r が複数の ω_i を持っているためである。複数のドループ成分を組み込んだ $Z_e(t)$ は(12)で表せるとする。

$$Z_e(t) = A_0 e^{-\omega_0 t} (1 + a_1 e^{-\omega_1 t} (1 + a_2 e^{-\omega_2 t} (1 + \dots))) \quad (12)$$

(12)が(10a)を満たすように、 A_0 及び a_i を K_i, N 及び R で表すと以下の様になる。

$$A_0 = \frac{R}{N + \frac{R}{N K_0}} \quad (13)$$

$$a_1 = \frac{K_1}{K_0} \frac{R}{N^2 (K_0 + K_1) + R}$$

$$a_2 = \frac{K_2}{K_0 + K_1} \frac{R}{N^2 (K_0 + K_1 + K_2) + R}$$

.....

5. 実験値との比較

ここではオフビーム試験[1]によって得られた K_i 及び ω_i の理論値との比較を行う。今回は $V(t)$ (電圧波形)のみ解析を行った。CTにパルス矩形電流を入力し、出力をオシロスコープ等で測定する。測定された $V(t)$ を I_b で除し、適当な時間間隔でサンプリングし、最小2乗法により A_0, a_i 及び ω_{ci} を求めた。用いたコアは3種類、700L(トーキン), 6025F(バキュームシュメルツ)及びFT-1M(日立金属)である。コアのデータシートから計算した K_0 及び ω_0 を表1中の K_0-D 及び ω_0-D に示す。700L及び6025F

をCTに組み込みNを変化させ、また700L及びFT-1MをWCMに組み込んでRを変化させV(t)を測定した。

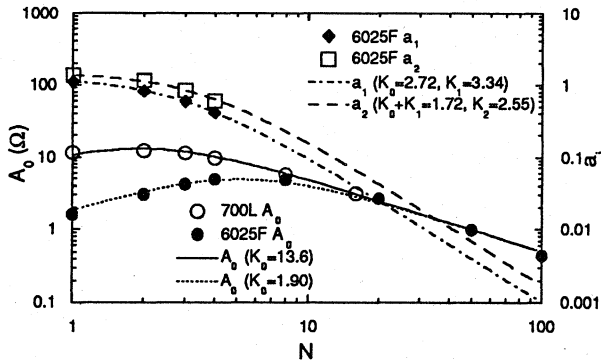


図1 CTに於ける A_0 及び a_2 のN依存性。

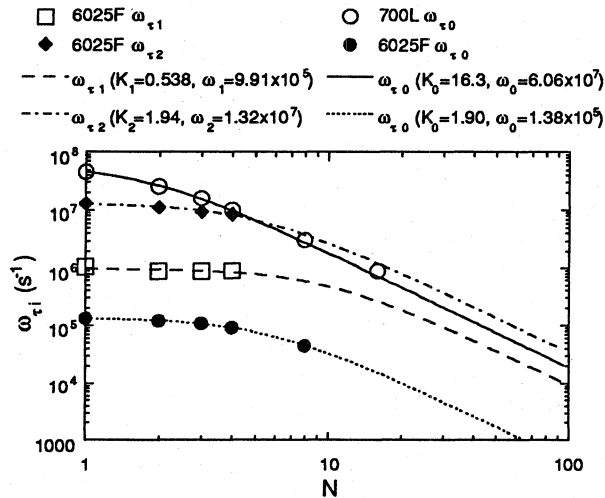


図2 CTに於ける ω_{τ_i} のN依存性。

図1~4に A_0 , a_i 及び ω_{τ_i} を、また表1に K_i 及び ω_i を示す。図中点は測定V(t)からの計算値であり、線は(10a)または(11)に適当な K_i 及び ω_i を代入したものである。

6.まとめと議論

コアを含んだ電流モニタにはコアの特性に起因する特性パラメータ (K_i 及び ω_i) が存在し、出力特性を決定する。ドループ時間を長くするためには、Nをおおきくすれば良いが、浮遊容量の増加等で立上りが遅くなる。一方WCMではN=1なので、 ω_0 の大きなコアを選べばよいが、 $K_1, K_2...$ が大きな素材を使うと、ドループ時間(バンド幅)が $\omega_1, \omega_2...$ で決まってしまう、ドループ時間が短くなり且つ波形も乱れてしまう。WCMやN=1~3のCTでは $K_1, K_2...$ の小さなコアを選ぶべきである。

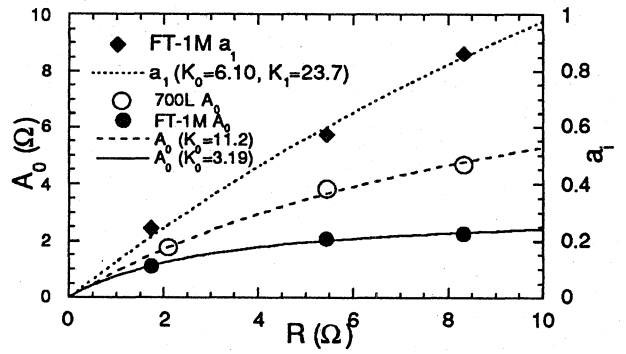


図3 WCMに於ける A_0 及び a_1 のR依存性

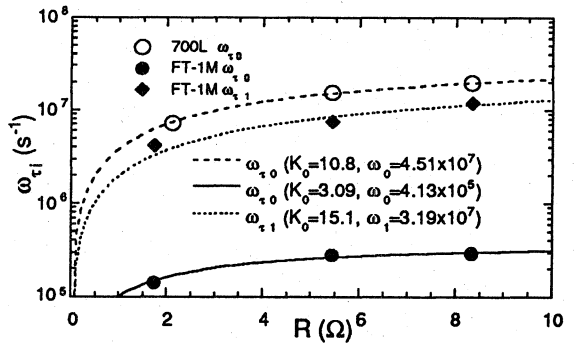


図4 WCMに於ける ω_{τ_i} のR依存性。

表1 コアの K_i 及び ω_i

	700L	6025F	FT-1M
K_0 -D	13	3.6	3.8
K_0	11~16	2.0~2.7	3.1~6.1
ω_0 -D	3.8×10^7	3.7×10^5	3.6×10^5
ω_0	$4.5 \sim 6.1 \times 10^7$	1.4×10^5	4.1×10^5
K_1		0.058~3.3	15~24
ω_1		9.9×10^5	3.2×10^7
K_2		1.9~2.6	
ω_2		1.3×10^7	

参考文献

[1] K.Yanagida, et al., "立ち上がりの速いビーム電流モニタの開発." Proc. of 18th Linear Acc. Meeting, Tuskuba, July, 1993, pp.97-100.