

論 文

電気集塵性能に及ぼす電源の影響（その 1）

コロナ放電特性に及ぼす電源波形

飯 島 歩*, 増 田 閃 一**

(1986 年 7 月 3 日受理)

Effects of Ripples in Voltage on Corona *V-I* Characteristics in ESP

A. IIJIMA* and S. MASUDA**

(Received July 3, 1986)

Effects of voltage ripples on the mean corona *V-I* characteristics of electrostatic precipitators (ESP's) are studied using a model ESP and full scale ESP. Two types of DC high-voltage power supplies are used in the experiment for the model ESP. In one type the ratio of ripple voltage to average voltage changes with the variation of output current, while another one can maintain a desired constant ratio of the ripple voltage independent of current level. With the increase in ripple factors, a higher peak voltage was necessary to maintain a constant corona current, while the necessary average voltage decreased. An empirical formula was proposed to estimate the mean corona *V-I* characteristics under direct applied voltage with ripple components and was confirmed practical use in the full scale electrostatic precipitators.

1. まえがき

電気集塵装置の性能に関する各種の研究が発表されているが、使用した印加電圧は、脈動の少ない直流のものがほとんどである。実際に使用されている直流高圧電源装置の大部分は、単相全波整流方式であり、印加電圧波形には大きな脈動分が含まれておらず、その脈動分の大きさは広い範囲に分布している。

コロナ放電に対する電源装置の影響に関する文献は非常に少なく、White¹⁾が直流、単相全波および半波整流についてわずかに述べているぐらいである。

実際の電気集塵装置において、整流回路の交流側電源を三相および単相にしたときのコロナ放電特性についての予測は、これまで困難であった。

筆者らは、印加電圧波形の脈動分がコロナ放電特性にどのような影響を与えるかを調べ、その特性を定式化することによって簡単に予測する方法を見だした。本論文ではそれらの結果について報告する。

2. 実験装置および方法

図 1 は実験に用いた直流印加電圧の脈動を可変できる電源部とモデル集塵装置の概要である。実際の集塵装置用電源には、単相全波整流電源が多く使用されており、その電源の出力波形は商用周波数の 2 倍の基本周波数の脈動を含んだものである。また、直流印加電圧の脈動は、電源装置のインピーダンス、集塵装置の構造、処理ガス温度等によって大きく変化する。

図 1(a)は、印加電圧の脈動分を変化させるためにモデル集塵装置と並列に可変できるコンデンサと抵抗器を備えている。この方法では、負荷電流の増加に伴って脈動率が増加する特性になる。同図(b)は、負荷電流を変えても脈動率を簡単な操作で一定に保つため、直流電圧に 100 Hz の交流を重畠したものである。同回路の動作の概要是次のとおりである。商用周波の交流を単相全波整流し、フィルタ回路を通して脈動率(脈動率は(1)式のものを使用)を 1% 以下の直流にした後、マスタインバータによって 100 Hz の交流に変換して変圧器 T₁により昇圧し、脈動率 3% 以下で約 50 kV の直流電圧を発生させた。マスタインバータに同期させたスレーブインバータで 100 Hz の交流を発生し、変圧器 T₂により約 30 kV に昇圧し、直流阻止用コンデンサ C₂を通して直流電源に交流を重畠して脈動分を含んだ直流高圧電源を得るようにした。印加電圧の脈動分を可変するために、

* オリジン電気株式会社 (171 東京都豊島区高田 1-18-1)
Origin Electric Co., Ltd., 18-1, Takada 1-chome,
Toshima-ku, Tokyo, 171 Japan

** 東京大学工学部電気工学科 (113 東京都文京区本郷 7-3-1)
Department of Electrical Engineering, Faculty of
Engineering, University of Tokyo, 3-1, Hongo 7-
chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan

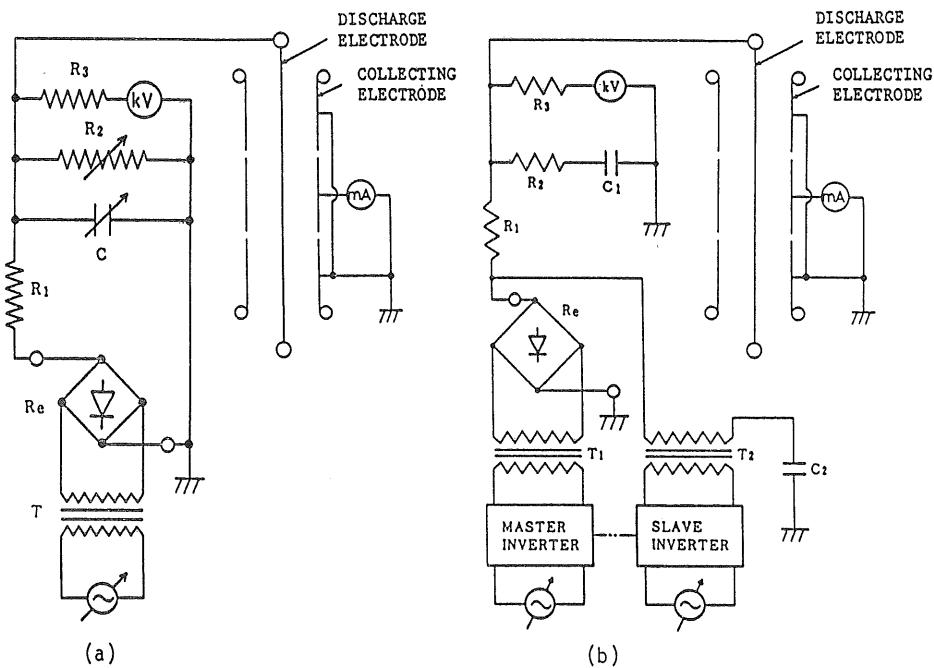


図 1 電源装置とモデル集塵装置の概要

Fig. 1 Schematic diagram for experimental apparatus.

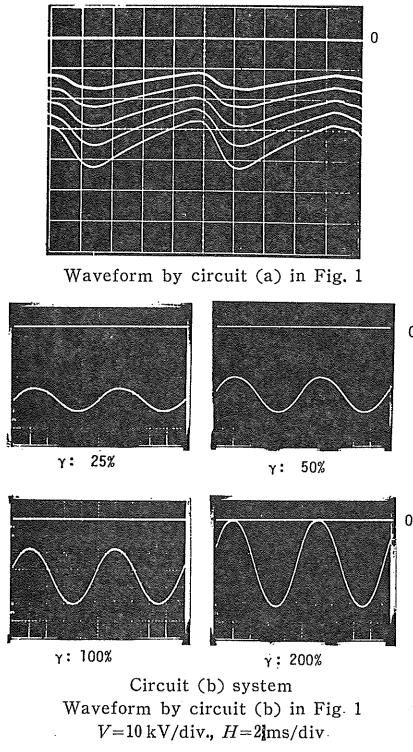


図 2 実験に使用した印加電圧の波形

Fig. 2 Voltage waveforms obtained by the high-voltage sources used.

交流入力側にスライドトランジスタを挿入している。

$$\text{脈動率} = [(\text{最大値} - \text{最小値}) / \text{平均値}] \quad (1)$$

図 1(a), (b) の両電源とも、直流出力の極性を簡単に変えられるような構造の直流高圧発生装置とした。

図 2(a)に図 1(a)の電源装置の負極出力電圧波形を、(b)に図 1(b)の電源における出力波形の様子を示す。

集塵装置のモデルは、円筒型の集塵電極のものを使用した。円筒型電極の大きさは、直径 10 cm、長さ 30 cm であり、円筒電極の中心に放電極として直径 0.05 cm の鋼線を配置して、中心にイオン電流密度を測定するために上下のガード電極と絶縁した主電極(プローブ電極)を備えている。

3. 実験結果および考察

3.1 コロナ放電特性

図 3, 4 は図 1(a)の回路を使用した場合の負極コロナ電流特性である。印加電圧の脈動率 (γ) を変化した場合の電圧・電流特性の中で、ピーク電圧対電流(平均値)特性を図 3 に、平均電圧対電流(平均値)特性を図 4 に示す²⁾。印加電圧の極性を変えた場合の正極コロナ放電の同様な電圧対電流特性を図 5, 図 6 に示す。

図 3, 4 に示したデータは、電源回路の構成上から出力電流の増加とともに脈動率が増加するものであり、実験で得られたコロナ放電電流密度と脈動率 (γ) の関係を

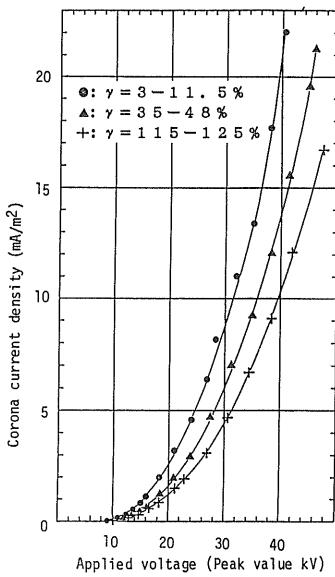


図 3 負極コロナ放電の電圧(ピーク値), 電流特性

Fig. 3 Effect of ripple voltage on negative corona V-I characteristics.

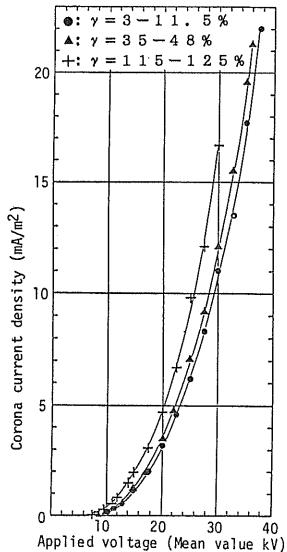


図 4 負極コロナ放電の電圧(平均値), 電流特性

Fig. 4 Effect of ripple voltage on negative corona V-I characteristics.

図 7 に示す。同図において表示のマークは、図 3, 4 と同一のものであり、 γ は、●印 : 3~11.5%, ▲印 : 35~48.5%, +印 : 115~125% の範囲でそれぞれコロナ放電電流の増加とともに上昇している。

図 1(b)に示したような出力電流の増加に対して脈動率を一定にできる回路を使用し、印加電圧の脈動率(γ)を 4% 以下, 25%, 50%, 100%, 200% と変化した場

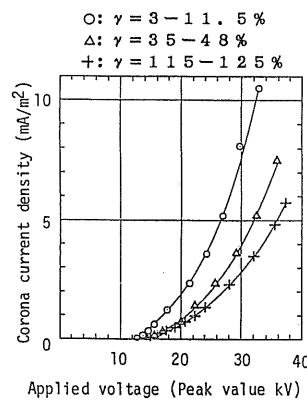


図 5 正極コロナ放電の電圧(ピーク値), 電流特性

Fig. 5 Effect of ripple voltage on positive corona V-I characteristics.

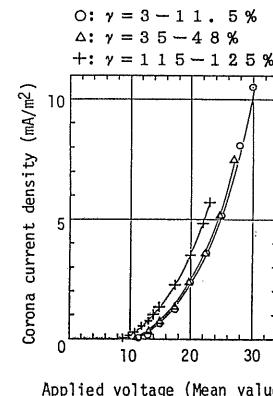


図 6 正極コロナ放電の電圧(平均値), 電流特性

Fig. 6 Effect of ripple voltage on positive corona V-I characteristics.

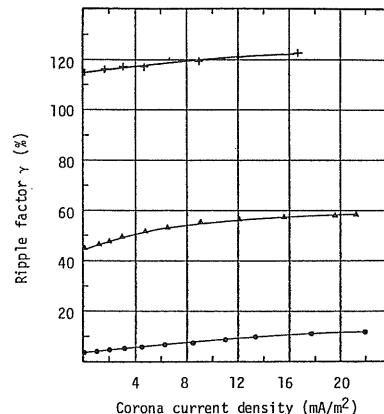


図 7 コロナ放電電流と脈動率の関係

Fig. 7 Ripple factor vs. corona current.

合の負極コロナ放電の電圧・電流特性を図 8, 9 に、 γ を同様にした正極コロナ放電の電圧・電流特性を図 10,

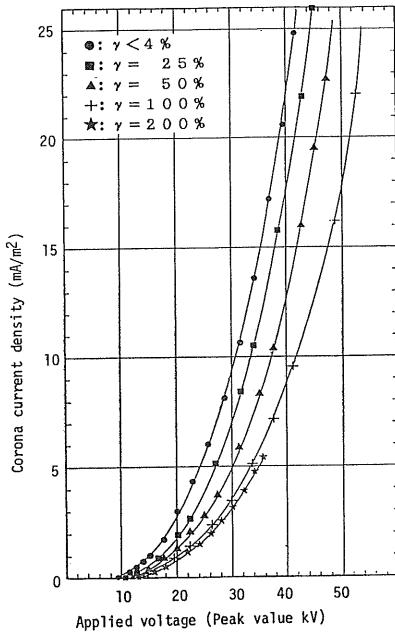


図 8 負極コロナ放電の電圧(ピーク値), 電流特性

Fig. 8 Effect of ripple voltage on negative corona V-I characteristics.

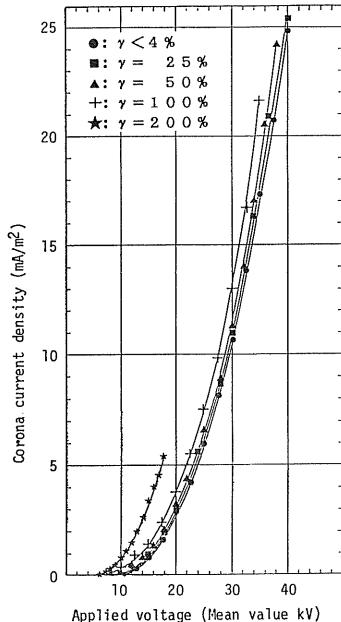


図 9 負極コロナ放電の電圧(平均値), 電流特性

Fig. 9 Effect of ripple voltage on negative corona V-I characteristics.

11 に示す³⁾。脈動率 200% のコロナ放電特性は、電源容量の制限を受けたため印加電圧 36 kV 以上のデータが得られなかった。

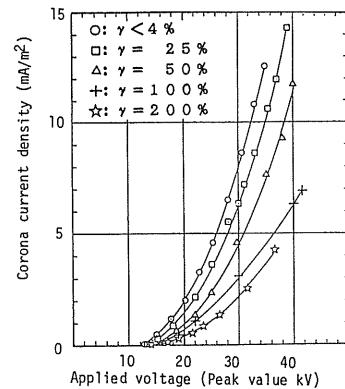


図 10 正極コロナ放電の電圧(ピーク値), 電流特性

Fig. 10 Effect of ripple voltage on positive corona V-I characteristics.

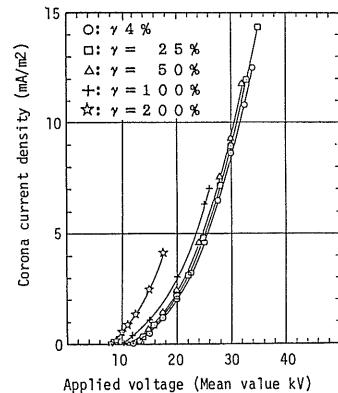


図 11 正極コロナ放電の電圧(平均値), 電流特性

Fig. 11 Effect of ripple voltage on positive corona V-I characteristics.

以上の図から明らかなように、負極および正極コロナ放電特性において、印加電圧をピーク値で表示すると、印加電圧の脈動率が大きくなるに従って同一印加電圧に対する平均コロナ放電電流が小さくなる。印加電圧を平均値で表示すると、脈動率が大きくなるほどコロナ放電電流は大きくなる。したがって、同一の印加電圧の平均値に対しては脈動分の大きいほうがコロナ放電電流を多く流することになる。

同一の印加電圧に対して、負極コロナ放電電流のほうが、正極コロナに比較して約 10~50% 大きな値を示している。

図 12 に、図 3 のコロナ放電電流の増加に従って脈動率の増えるときのデータと図 9 に示したような脈動率を一定にしたときのデータを比較して示す。●, ■, ▲印の曲線は、図 9 に示した脈動率 (γ) 4% 以下, 25%, 50% のものであり、○印は図 3 の γ : 3~11.5%, △印は γ : 35~48.5% のデータである。○印の特性はコロナ放電

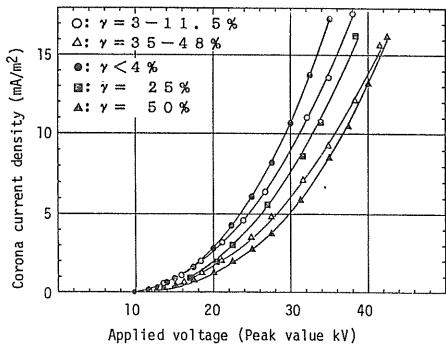


図 12 印加電圧の脈動率変化による負極コロナ放電特性
Fig. 12 Effect of ripple voltage on negative corona V-I characteristics.

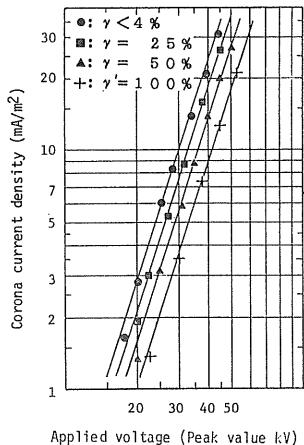


図 13 両対数目盛りによる負極コロナ放電特性
Fig. 13 Effect of ripple voltage on negative corona V-I characteristics.

電流の増加に従って $\gamma : 25\%$ の特性に近づき、△印の特性は電流の増加とともに $\gamma : 50\%$ の特性に近づいていく。

3.2 コロナ放電特性の考察

電気集塵装置のコロナ放電特性は実用範囲において近似的に指數関数で表示できる。本研究における印加電圧に脈動を含んだ電源により得られた図 8 に示すコロナ放電特性も両対数のグラフ用紙に描くと図 13 のようになり、直線として近似できる。すなわち、コロナ放電特性は次の(2)式に示すような指數関数で近似できる。しかし、実際の電気集塵装置においては高圧電源装置を操作してコロナ開始電圧付近まで出力電流を低下することができないため、コロナ開始電圧の測定が困難である。したがって、実用的な近似式として(3)式が使用されている⁴⁾。

$$I = A (V - V_c)^B \quad (2)$$

ここで、 I ：コロナ放電電流 (mA)、 V ：印加電圧 (kV)、 V_c ：コロナ開始電圧 (kV)、 A 、 B ：定数、であり次式で与えられる

$$B = \frac{\log (I_2/I_1)}{\log \{(V_2 - V_c)/(V_1 - V_c)\}}$$

$$A = I_1/(V_1 - V_c)^B$$

ここで、 $I_1 : V_1$ の印加時のコロナ電流、 $I_2 : V_2$ の印加時のコロナ電流。

$$I = CV^D \quad (3)$$

ここで、 V ：印加電圧 (kV)、 C 、 D ：定数、であり次式で与えられる

$$D = \frac{\log (I_2) - \log (I_1)}{\log (V_2) - \log (V_1)}$$

$$C = I_1/V_1^D$$

脈動分を含んだ印加電圧 V_a は直流に交流を重畠したものであるから、印加電圧の平均値は(4)式で与えられる。

$$V_a = V/(1+\gamma/2) = \{2V_p/(2+\gamma)\} \quad (4)$$

ここで、 γ ：脈動率、 V_p ：電圧のピーク値
脈動電圧は

$$V_{pp} = 2\gamma V_p/(2+\gamma) \quad (5)$$

直流電圧を印加したときのコロナ放電特性がわかれば、脈動分を含んだ直流電圧を印加したときのコロナ放電特性は次のようにして近似的に求められる。脈動分を含んだ直流電圧を次式で与えられるものとすれば、

$$V = V_{DC} + V_{pp} \sin(\omega t)/2 \quad (6)$$

コロナ放電電流の平均値 (I_a) は、コロナ放電電流の近似式を(2)および(3)式を使用すると、次の(7)および(8)式により求められる。

$$I_a = (1/T) \int_0^T I dt = (1/T) \int_0^T A (V - V_c)^B dt \quad (7)$$

$$I_a = (1/T) \int_0^T CV^D dt \quad (8)$$

図 8 に示した印加電圧の脈動率をパラメータとしたコロナ放電特性において、直流電圧を印加したときの特性曲線を基準にして(2)、(7)式により印加電圧の脈動率をパラメータとしたコロナ放電特性を数値計算で求めた結果を図 14 に示す。すなわち、同図は脈動のない直流電圧を印加したものとして、コロナ開始電圧 7 kV (V_c)、 $V_1=20$ kV、 $I_1=3$ mA/m²、 $V_2=40$ kV、 $I_2=22$ mA/m² の値を(2)式に代入すると式(9)が得られ、この式から算出したものである。

$$I = 0.0124338 (V - 7)^{2.13881} \quad (9)$$

直流電圧を印加したときの特性曲線を基準にし、(3)、(8)式により印加電圧の脈動率をパラメータとしたコロナ放電特性を数値計算で求めたグラフを図 15 に示す。

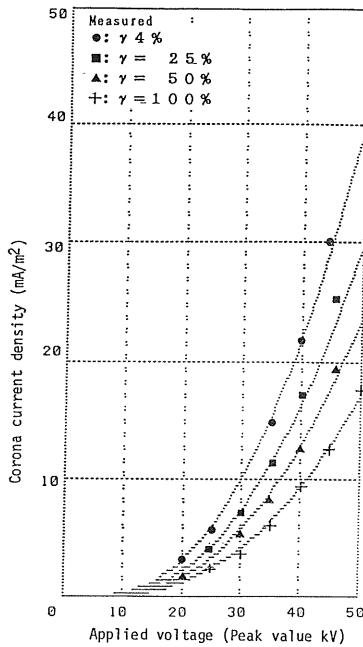


図 14 (2) 式で負極コロナ特性の脈動率に依る影響を計算機により算出した特性

Fig. 14 Negative corona V - I characteristics by computer simulate using Eq. (2).

同図は(3)式に図 14 同じ条件の、 $V_1=20$ kV, $I_1=3$ mA/m², $V_2=40$ kV, $I_2=22$ mA/m² を代入すると(10)式が得られる。

$$I = 5.46199 V^{2.87447} \times 10^{-4} \quad (10)$$

両図とも実測値のデータをプロットしているが、実験データに近い特性が得られている。

実際の電気集塵装置においては、高圧電源装置を操作してコロナ開始電圧付近まで出力電流を絞り込むことが困難であるため、実用的には(3)式のようにコロナ放電特性の 2 点をとり、指数関数として近似する方法が便利である。

工業用の電気集塵装置に使用されている高圧直流電源装置の大部分は、単相全波整流電源である。したがって実際に運転されている印加電圧の脈動率は、広い範囲に分布している。上記のような脈動の少ない直流から脈動分の多い直流のコロナ放電特性を算出する方法は、利用する機会が少ない。ある任意の脈動率のコロナ放電特性がわかれば、脈動のない直流から脈動分を含んだ直流のコロナ放電特性を求める方法が実用的である。

脈動のない直流電圧を印加したときのコロナ放電電流を(8)式により得た値を I_D とすると、脈動分を含んだときのコロナ放電電流の平均値 I_a は(11)式のようになる。

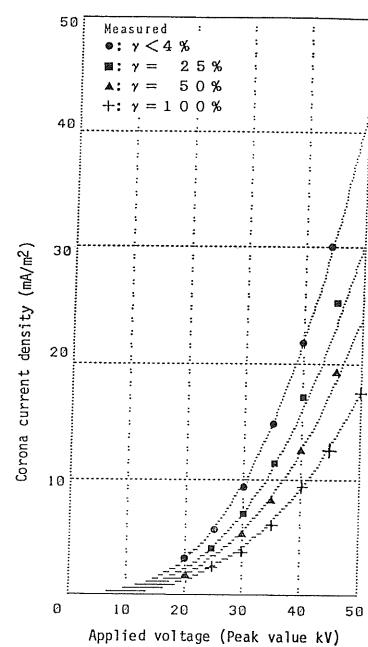


図 15 (3) 式で負極コロナ特性の脈動率に依る影響を計算機により算出した特性

Fig. 15 Negative corona V - I characteristics by computer simulate using Eq. (3).

$$\begin{aligned} I_a &= (1/T) \int_0^T C V_{DC}^D \{1 + (\gamma/2) \sin \omega t\}^D dt \\ &= (C V_{DC}^D / T) \int_0^T \{1 + (\gamma/2) \sin \omega t\}^D dt \end{aligned} \quad (11)$$

上式は、 $f(x) = X^D$ として、

$$f(x+h) = f(x) + f^{(1)}(x) \cdot h + f^{(2)}(x) / 2! \cdot h^2 + \dots$$

で表わされ、 $x=1$, $h=(\gamma/2) \sin \omega t$ とすると、奇数項の積分値は、 $\int_0^T h dt = 0$ となるので、

$$\begin{aligned} \int_0^T f(1+h) dt &= \int_0^T f(1) dt + \frac{f^{(2)}(1)}{2!} \int_0^T h^2 dt \\ &\quad + \frac{f^{(4)}(1)}{4!} \int_0^T h^4 dt + \dots \end{aligned}$$

上式の 2 次項までとると、次式になる。

$$\begin{aligned} \int_0^T f(1+h) dt &= T + \frac{D(D-1)}{2} \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2 \left(\frac{T}{2}\right) \\ I_a &= \frac{C V^D}{T} \int_0^T f(1+h) dt \\ &= C V^D \left\{ \frac{1+D(D-1)}{4} \cdot \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2 \right\} \end{aligned}$$

印加電圧のピーク値を一定にすれば、 I_D と I_a の関係は(12)式のようになる。

$$I_D = I_a \left\{ \frac{1+D(D-1)}{4} \cdot \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2 \right\} \quad (12)$$